

文章编号: 1671-251X(2023)04-0033-09

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022100062

煤矿智能化掘进关键技术研究

李飞¹, 张林¹, 尚宇琦¹, 孔德中¹, 王玉亮¹, 陈龙¹, 张枝伟^{2,3}

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省煤矿设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550025;
3. 贵州省矿山安全科学研究院有限公司, 贵州 贵阳 550025)

摘要:介绍了近年来煤矿巷道掘进主要技术(悬臂式掘进机综掘技术、连续采煤机掘进技术及掘锚一体化掘进技术)的研究成果,分析了这3种主要巷道掘进技术在我国适用性及推广价值,指出:①悬臂式掘进机综掘技术仅能“前掘后锚”,掘进与支护的过程不能同时进行,限制了掘进效率。②连续采煤机掘进技术仅可在近水平煤层条件下进行,且对顶板的稳定程度有一定要求,适用性不强。③掘锚一体化掘进技术仅适用于巷道断面大的单巷快速掘进,所用到的掘锚一体机机身大且价格昂贵,并对所掘进巷道的底板稳定性有一定的要求。相比连续采煤机掘进技术,掘锚一体化掘进技术在我国有较好的应用前景。将原有掘进机的掘进功能拓展为掘进兼支护的功能,这对掘锚一体化掘进技术的研究与普及可起到推动作用。分析了近年来煤矿巷道机器人化智能掘进技术中智能截割、远程智能监控、智能协同控制3个方面的研究成果,得出:①智能截割技术主要集中在对煤岩自适应识别方面的研究。②远程智能监控技术已从远程实时监测向远程可视化监控方向发展,虚拟仿真技术的发展将井下掘进巷道的情况可视化地展现在地面,并将控制信号反馈到掘进工作面来对掘进工作面掘进机组进行远程同步控制,成为当前巷道掘进远程监控智能化的重要标志。③目前针对智能协同控制技术的研究较少。探讨了煤矿巷道掘进智能化的发展方向:加强掘进设备集成协同化、设备模块化组合、5G矿用无线网络设备、掘进远程智能监控系统及难掘慢掘巷道掘进工程等方面的研究。

关键词:巷道快速掘进;悬臂式掘进机综掘技术;连续采煤机掘进技术;掘锚一体化掘进技术;智能截割;远程智能监控;智能协同控制

中图分类号: TD67

文献标志码: A

Research on key technologies of coal mine intelligent excavation

LI Fei¹, ZHANG Lin¹, SHANG Yuqi¹, KONG Dezhong¹, WANG Yuliang¹, CHEN Long¹, ZHANG Zhiwei^{2,3}

(1. Mining College of Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Coal Mine Design Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550025, China;

3. Guizhou Mine Safety Scientific Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550025, China)

Abstract: This paper introduces the research results of the main coal mine roadway excavation technologies in recent years. The technologies include cantilever roadheader comprehensive excavation technology, continuous shearer tunneling technology, and integrated excavation technology. The applicability and promotion value of these three main roadway excavation technologies in China is analyzed. The following points are pointed out. ① The comprehensive excavation technology of the cantilever roadheader can only "excavate before anchoring". The excavation and support processes cannot be carried out simultaneously, which limits the excavation

收稿日期: 2022-10-19; 修回日期: 2023-03-30; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(52164002, 52164005); 贵州省科技厅科技支撑项目(黔科合支撑(2020)2Y032号, 黔科合支撑(2020)2Y033号)。

作者简介: 李飞(1999—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要研究方向为矿山压力与岩层控制, E-mail: 1763850957@qq.com。通信作者: 孔德中(1989—), 男, 河南永城人, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为矿山压力与岩层控制, E-mail: dzkong@gzu.edu.cn。

引用格式: 李飞, 张林, 尚宇琦, 等. 煤矿智能化掘进关键技术研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(4): 33-41.

LI Fei, ZHANG Lin, SHANG Yuqi, et al. Research on key technologies of coal mine intelligent excavation[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(4): 33-41.



扫码移动阅读

efficiency. ② The continuous shearer tunneling technology can only be carried out in near horizontal coal seam conditions. It has certain requirements for the stability of the roof. The applicability is weak. ③ The integrated excavation technology is only suitable for rapid excavation of single roadways with large cross-sections. The integrated excavation and anchoring machine used is large and expensive. The machine has certain requirements for the stability of the bottom plate of the excavated roadways. Compared to the continuous mining machine excavation technology, the integrated excavation technology has a good application prospect in China. Expanding the excavation function of the original roadheader to the function of excavation and support can promote the research and application of integrated excavation and anchoring technology. The study analyzes the research achievements of intelligent cutting, remote intelligent monitoring, and intelligent collaborative control in the robotized intelligent excavation technology of coal mine roadways in recent years. The following points are concluded. ① Intelligent cutting technology mainly focuses on the research of adaptive recognition of coal and rock. ② Remote intelligent monitoring technology has evolved from remote real-time monitoring to remote visual monitoring. The development of virtual simulation technology visualizes the situation of underground excavation roadways on the ground. And it feeds back control signals to the excavation working face to remotely synchronize and control the excavation working face roadheader unit. This becomes an important symbol of the current intelligent remote monitoring of roadway excavation. ③ There is currently limited research on intelligent collaborative control technology. This study explores the development directions of intelligent coal mine roadway excavation. The directions include strengthening the integration and collaboration of excavation equipment, modular combination of equipment, 5G mining wireless network equipment, remote intelligent monitoring system for excavation, and research on difficult and slow excavation roadway excavation engineering.

Key words: rapid excavation of roadways; cantilever roadheader comprehensive excavation technology; continuous shearer tunneling technology; integrated excavation technology; intelligent cutting; remote intelligent monitoring; intelligent collaborative control

0 引言

我国煤矿分为井工煤矿和露天煤矿 2 类,井工煤矿约占所有煤矿数量的 95%,露天煤矿占有煤矿数量的 5% 左右^[1-2]。采掘工作面作为井工开采的重要组成部分,其安全问题一直都是国内外学者研究的热点。研究掘进工作面的快速推进是提高采掘工作面生产效率的关键,但掘进工作面的机械化程度多年来都很难得到提升^[3]。20 世纪,我国煤矿巷道掘进从传统的钻爆法掘进过渡到综合机械化掘进,随着技术的不断变革,我国煤矿巷道掘进的机械化程度也得到了一定的提升,但由于巷道掘进过程中的支护时间难以缩短、掘支平行作业难以达到最大限度等原因,巷道掘进缓慢的问题依然是煤矿生产中难以攻克的难题之一。据统计,目前我国综采工作面的机械化程度约占采掘工作面综合机械化程度的 90%,综掘工作面仅占到了 10%^[4]。综采和综掘所耗费的时间在整个采掘过程中所占比例与其机械化程度在采掘工作面综合机械化程度所占比例严重不符,机械化程度较低的综掘作业难以与高效率的综采作业相适应,在掘巷过程中事故屡屡发生,采掘

比例严重失调现象导致目前国内巷道月掘进长度远远跟不上采煤工作面月消耗的巷道长度,从而严重制约了我国煤矿安全高效生产^[5]。目前,随着机械化、智能化、无人化在我国煤矿的逐渐普及,对煤矿生产提出“采掘并重,掘进先行”的要求,掘进工作面的智能化成为一个重要的研究领域。

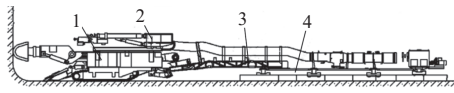
1 煤矿快速掘进技术

目前,国内外普遍使用的快速掘进技术主要包括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 3 种^[6]。

1.1 悬臂式掘进机综掘技术

我国和欧洲许多国家的煤矿多采用悬臂式掘进机综掘技术进行巷道掘进^[7]。悬臂式掘进机综掘技术应用的掘进设备为悬臂式掘进机,支护设备为单体锚杆钻机或机载锚杆钻机,配套设备主要包括桥式转载机与带式输送机等,悬臂式掘进机综掘机组如图 1 所示。

由于悬臂式掘进机的机身灵活,使其截割方式能够适应全煤、全岩、半煤岩条件下的巷道掘进^[8]。但悬臂式掘进机综掘技术仅能“前掘后锚”,掘进与



1—悬臂式掘进机;2—机载锚杆钻机;3—桥式转载机;4—带式输送机。

图1 悬臂式掘进机综掘机组

Fig. 1 Cantilever roadheader comprehensive excavation unit

支护的过程不能同时进行,降低了掘进效率,另外,煤矿赋存条件复杂性也在一定程度上限制了综掘作业的速度。许多学者针对该技术下巷道掘进效率较低的问题进行了研究。史德强等^[9]通过对掘进机与煤岩的相互作用进行力学分析,计算得到掘进过程中截割速度及工序所需时间的公式。王晨升等^[10]以悬臂式掘进机配以锚杆钻车的掘锚交叉作业方式代替传统的悬臂式掘进机配以单体锚杆钻机的作业方式,既可减少施工人数,又能提高巷道掘进效率。吴森等^[11]提出了一种基于悬臂式综掘机的掘支锚联合平行作业技术,结合自移式临时支架结构与锚杆作业车,提高了掘支锚平行作业率,从而提升巷道掘进效率。李慧平^[12]将连续采煤机掘进工艺应用到悬臂式掘进机掘进工程中,能够提高大断面顶板不稳定巷道的掘进效率。易香保等^[13]对巷道掘进施工工艺进行改进,对原掘进机组中的掘支运等设备进行改进,并采用软岩底板排水固结技术,能够提高大断面软岩巷道的掘进效率。李瑞等^[14]采用自移式临时支架的异步耦合多液压缸调平控制方法,能够实现煤矿巷道的快速有效支护,对于综掘工作面的快速掘进有着重要意义。

许多学者针对悬臂式掘进机综掘技术智能化、无人化水平较低的问题展开了研究。符世琛等^[15]针对煤矿井下综掘工作面的实际工况,提出了一种基于超宽带定位技术的悬臂式掘进机自主定位定向方法,有效防止因偏掘引起的巷道错位,实时提供掘进机位置状态及位姿参数,为实现掘进机自主巡航奠定基础。刘延生^[16]针对目前综掘感知与远程控制技术中的不足,综合利用多种传感器对综掘机进行定位,并对综掘系统中的多个截割子系统进行改进,使悬臂式综掘技术向智能化和无人化的方向进一步迈进。

针对掘进、支护和打设锚杆所需时间的不平衡问题,需从提高该技术下支护与打设锚杆速度及截割效率方面进行研究。除了现场试验,研究手段还包括理论分析,但就目前的研究成果来看,采用力学分析方法比较普遍,尚未有针对掘进机截割头的截割速度与时间系统化计算的研究(如对不同截割路径下截割时间的计算)。在悬臂式掘进机综掘技术

的智能化和无人化研究中,学者们仅构建了理论体系,研究仅停留在理论层面,所得成果也只是使综掘无人化成为一种可能,而在普及化的道路上仍有很长的一段路要走。

1.2 连续采煤机掘进技术

美国、德国、英国等国家的煤矿多采用连续采煤机掘进技术进行巷道掘进^[17]。连续采煤机掘进技术应用的掘进设备为连续采煤机,支护设备为锚杆钻车,配套设备包括梭车、破碎机、铲车、带式输送机等,连续采煤机掘进技术的掘进与支护设备如图2所示。



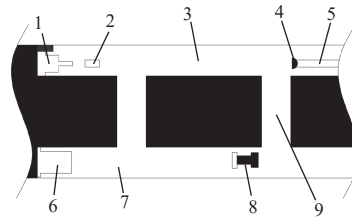
(a) 连续采煤机

(b) 锚杆钻车

图2 连续采煤机掘进技术的掘进与支护设备

Fig. 2 Continuous shearer tunneling technology tunneling and support equipment

连续采煤机掘进技术仅适用于双巷或多巷掘进工程中,连续采煤机在一条巷道进行掘进作业时,锚杆钻车在另一条巷道中同时进行支护作业,掘进循环结束后,掘进设备与支护设备交换位置进行作业,实现了“交叉交替作业”,双巷掘进过程中的设备布置如图3所示。该技术虽极大地提高了掘巷效率,缓解了采掘工作交替紧张的问题,但该技术仅可在近水平煤层条件下进行,且对顶板的稳定程度也有一定要求,同时,由于连续采煤机与锚杆钻车需要频繁交换位置进行作业,所以所掘的2条或多条巷道之间需间隔一定距离设置联络巷。



1—连续采煤机;2—梭车;3—主运输巷;4—破碎机;5—带式输送机;

6—锚杆钻车;7—辅运输巷;8—铲车;9—联络巷。

图3 连续采煤机掘进技术用于双巷掘进中设备布置

Fig. 3 Continuous shearer tunneling technology is used for equipment layout in double roadways tunneling

我国煤矿巷道所处地质条件比较复杂,因此国内对连续采煤机掘进技术的研究相对较少,目前对于该技术的研究多以掘进效率影响因素探究与掘进效率提升为主。部分学者将连续采煤机应用在地质条件较好的煤矿巷道掘进中,并取得了较好的应用

效果。张振等^[18]通过分析国产 EML340 连续采煤机在我国煤矿中的应用效果,阐明了掘进巷道所处的地质条件,特别是掘进巷道的顶板条件会极大地影响连续采煤机的开机率,从而影响巷道掘进效率。翟慧兵等^[19]阐明了影响连续采煤机掘进速度的主要因素有掘进设备、支护设备、运输系统的故障问题及瓦斯含量、单巷掘进等问题,指出通过加强掘进工作面的瓦斯预抽采工作与三巷掘进的方式,能够很大程度地提高连续采煤机的掘进效率。贺安民^[20]以神东矿区 1.7 m 以下厚煤层的半煤岩巷为研究对象,通过对现场的观测和分析,指出煤层厚度与日进尺之间的关系,这对薄及中厚煤层巷道内的连续采煤机掘进技术研究有着积极作用。范晓东等^[21]利用 EDEM 软件构建了镐形截齿仿真模型,阐明了连续采煤机不同截齿安装角条件下的截割阻力变化幅值不同,对提高连续采煤机的截割效率有着重要意义。梁大海等^[22]对连续采煤机掘进技术进行了改进,将连续采煤机台阶法掘进技术应用于实际工程中,并通过时空 2 个方面阐明了正规作业循环进尺 6 m 的可靠性,这对连续采煤机掘进技术的拓展研究有着重要作用。

连续采煤机掘进技术较悬臂式掘进机掘进技术的掘进速度更快,但适用性不强,因此该技术在我国没有得到广泛应用,掘进工作面各种突发情况也阻碍了连续采煤机掘进技术的推广,更加限制了我国学者对该技术的研究。目前,许多学者通过探究掘进工程中的顶板条件、掘支运系统故障问题、瓦斯含量、连续采煤机截齿安装角等因素对连续采煤机掘进效率的影响规律,以提高连续采煤机掘进技术的掘进效率,并促进其在我国煤矿中的推广应用。

1.3 掘锚一体化掘进技术

澳大利亚煤矿多采用掘锚一体化掘进技术进行巷道掘进^[23]。掘锚一体化掘进技术应用的掘进设备为掘锚一体机,配套设备包括行走破碎、转载机、桥式胶带转载机、可伸缩带式输送机等,掘锚一体化掘进机组如图 4 所示。



1—掘锚一体机;2—锚杆钻车;3—桥式转载机。

图 4 掘锚一体机机组

Fig. 4 Excavation anchor integrated tunneling unit

掘锚一体化掘进技术融合了悬臂式掘进机综掘技术与连续采煤机掘进技术的优点,将掘进设备与支护设备融于一体,可做到掘锚平行作业,实现了

“边掘边锚”,能够极大地提高掘巷效率。但该技术仅适用于巷道断面大的单巷快速掘进,所用到的掘锚一体机机身大且价格昂贵,并对所掘巷道的底板稳定性有一定的要求。

为了解决面对复杂地质条件时,掘锚一体化掘进技术不再适用的问题,许多学者进行了研究。崔旭芳^[24]通过改进掘锚机的临时支护装置,以增大临时支护面积、减小控顶距来保证顶板安全稳定,使掘锚机组能够适应高瓦斯、高应力等复杂地质条件。吴建星等^[25]针对实际工程中掘锚一体机掘进初期掘进效率低的问题,进行了理论分析和数值模拟,并在降低支护成本的基础上,对原支护参数和施工技术进行了优化,有效缓解了煤矿采掘衔接紧张。任水泉^[26]分析了神华包头能源有限责任公司万利一矿 2011—2012 年的 MB670 掘锚机掘进情况,指出了掘锚机在单巷掘进过程中可能限制其效率的主要因素包括掘进与支护所耗时间、设备检修时间等,这对提高掘锚一体化掘进技术单巷掘进效率有着重要意义。陈大广^[27]通过数值模拟方式确定了巷道掘进过程中的支护参数,提出了以“三七一三”制代替“三八”制的劳动组织方式,极大地提高了掘进速度。董庆等^[28]将掘锚一体化掘进技术应用于特厚煤层开采大断面回采巷道的掘进工程中,以 MB670 掘锚机代替原本的普通综掘机,提高了巷道月进尺量。

由于掘锚一体机机侧的锚杆钻机上下滑动范围有限,在面对地质条件复杂的情况时,还需通过人工打锚杆的方式对巷道进行支护。李旺年^[29]设计了一款能够完成巷道掘进工程中两侧上排锚杆打设工作的配套用机载锚杆钻机,提高了支护效率。范要辉^[30]在原有掘进机的基础上将临时支护与支护系统融合,设计了六臂掘锚机,从而实现掘进、临时与永久支护于一体。

相比连续采煤机掘进技术,掘锚一体化掘进技术在我国有较好的应用前景,但复杂地质条件的限制、新设备的引入和各种不确定影响因素都可能会滞缓煤矿巷道掘进进程,因此研究适合我国煤矿的掘锚一体化技术及掘进工艺方案等对煤矿巷道快速掘进有着重要意义。通过数值模拟手段来研究该技术,可为煤矿巷道快速掘进技术的研究提供新思路;在原掘进机上进行改进,将原掘进机的掘进功能拓展为掘进兼支护功能,这对该技术的研究与普及起到了推动作用。

2 煤矿巷道机器人化智能掘进

自 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》起,煤矿巷道掘进机器人的研究正式被提上日程^[31],而我国相比美英德等煤炭产业技术发达的国家,除了需要研发高精尖技术,还要克服我国复杂的煤矿巷道地质条件,这对我国煤炭行业来说是一个不小的挑战。国内对于煤矿巷道机器人化智能掘进的研究主要以智能截割技术、远程智能监控技术及智能协同控制技术为主,而这些技术的研究与改进工作是煤矿巷道掘进机器人化的重要路径。

2.1 煤矿巷道掘进智能截割技术

我国大多数煤矿巷道掘进工程多采用悬臂式掘进机,导致煤矿巷道掘进智能截割技术主要以悬臂式掘进机综掘技术为主。针对智能截割技术的研究,近年来我国专家学者作了较多研究。田劼^[32]通过建立悬臂式掘进机截割头的空间轨迹运动学模型,提出了截割头空间轨迹测控传感方法,研发出了煤巷掘进断面自动截割成形系统,为后来煤矿无人或少机器人化智能掘进的研究奠定了基础。王苏或^[33]首次将巷道断面轮廓的概念引入巷道掘进工程中,并提出了掘进机记忆截割控制方法,其研究成果为后来煤矿无人或少机器人化智能掘进的研究奠定了基础。针对悬臂式掘进机截割头不能自适应地对不同煤岩进行识别以达到智能截割的问题,伍普照^[34]提出了一种用于悬臂式掘进机的智能截割控制系统,即通过监测截割电动机的电流、转矩和转速3个指标来达到变频器速度档位切换的目的,这种将硬件、软件与截割控制技术相结合的方法对智能截割技术的发展有着重要作用。谢苗等^[35]针对悬臂式掘进机横摆速度的控制进行了研究,利用 Matlab 软件中的神经网络模块建立掘进机横摆摆速、煤岩坚固性系数与截齿截深3者之间的拟合关系模型,进而研发出掘进机横摆智能调速系统。张德义等^[36]为了保障掘进机在掘进过程中的平稳程度,同时为了提高掘进机使用寿命,提出了一种“红外热像+记忆截割”的智能截割技术,该技术适用范围广,对巷道掘进智能截割具有重要意义。王鹏江等^[37]利用多种传感器信息,通过改进粒子群算法优化的 BP 神经网络,实现掘进机截割臂摆速的自适应截割。

对于掘进智能截割技术的研究已由最初的记忆截割向智能截割方向深入发展,目前对于该技术的研究主要集中在煤岩自适应识别,通过多种传感器监测及红外热像等技术,结合多个指标的实际情况以提高自适应系统的准确性,部分学者还引入了神经网络法建立多个指标与截割臂横摆速度的关系模型,以达到自适应智能截割的目的。从近年来智能

截割系统所依据的指标变化情况来看,指标体系不断优化完善,这对未来智能截割技术的研究有着重要意义。

2.2 煤矿巷道掘进远程智能监控技术

掘进工作面智能化程度与掘进机远程监控技术有着十分密切的联系,许多学者针对煤矿综掘工作面悬臂式掘进机远程监控存在实时数据采集传输难、控制系统适用性差的问题进行了研究。伍小杰等^[38]基于可编程计算机、工业计算机、Linux 操作系统与矿井环网,提出了一种适用于悬臂式掘进机的远程监控系统,该系统在实际应用中具有良好的可靠性、适应性。张敏骏等^[39]基于机载可编程控制器、机载传感系统、视频监控系统及工控机,设计了一种用于对掘进工作面悬臂式掘进机的实际状态与参数进行实时监控的系统,并构建了一种用于对各种掘进机位姿检测精度进行验证的高精度掘进机位姿检测验证系统。张旭辉等^[40-42]提出了一种基于虚拟现实技术的煤矿掘进机器人虚拟仿真与远程控制系统,设计了一种基于 DSP(Digital Signal Processing, 数字信号处理)的悬臂式掘进机控制系统,对掘进机实际状态进行数据收集并进行计算,与外部设备进行实时信息传输,并将数字孪生驱动与虚拟仿真技术融合,结合悬臂式掘进机模型,设计了数字孪生驱动的悬臂式掘进机智能操控系统,为煤矿巷道掘进工作面掘进机智能远程监测与控制技术的研究提供了极具创新意义的思路。郝俊信^[43]基于 5G 无线网络或 WiFi 连接技术,研究了综掘机可视化远控智能控制技术,对实现巷道智能化掘进可视化操作有着重要意义。

巷道掘进远程智能监控技术已从远程实时监测向远程可视化监控方向发展,随着网络通信技术的不断发展,矿井网络也由比较低端的矿井环网向 5G 无线网络方向逐渐过渡,这对煤矿巷道远程智能实时监控有着重要意义。近年来,虚拟仿真技术的发展为巷道掘进远程可视化监控系统的研究带来了巨大帮助,将井下掘进巷道的情况可视化地展现在地面,并将控制信号反馈到掘进工作面,对掘进工作面掘进机组进行远程同步控制,成为当前巷道掘进远程监控智能化的重要标志。

2.3 煤矿巷道掘进智能协同控制技术

若要实现煤矿巷道快速掘进,掘进工作面多种移动设备与运输设备的智能协同控制必不可少。呼守信^[44]设计了一种基于无线通信技术的掘锚机组电控系统,以实现数据双向交互、运输设备的联动控制及掘锚机与破碎机之间的协同控制。程凤霞^[45]基于

无线通信技术,研发了综掘工作面成套设备的协同控制系统,并被广泛应用。马宏伟等^[46]阐明了影响掘进效率的主要因素为截割机器人与钻锚机器人的协同并行控制,指出了钻锚机器人各排钻机最佳时空匹配策略,这对煤矿巷道机器人化智能快速掘进有着重要意义。

目前对于巷道掘进工程中智能协同控制技术的研究相对较少,研究也相对较浅薄,所采用的技术普遍存在于其他各种工程领域中,并没有实质性的创新成果,或不存在成体系的协同控制,有的只是部分设备的协同运作,且研究只停留在理论层面,协同控制的智能化研究还有较长的路要走,应将理论与实际更大程度地结合,研发具有较高实用价值的智能协同控制技术。

3 煤矿巷道智能快速掘进发展存在的问题

在我国煤矿广泛应用的悬臂式掘进机综掘技术存在掘进与支护不能同时进行的问题,而连续采煤机掘进技术也仅适用于双巷或多巷掘进的情况,由于其交替作业需要来回交换设备位置,所以对于巷道底板有一定的损伤,该技术逐渐在我国煤矿领域被淡化,比较有前景的掘锚一体化掘进技术因滚筒受力大而只能在岩石坚固性系数小于 4 的煤巷中被推广使用,且机身较重较长,在巷道底板条件较差的情况下,掘锚一体化掘进技术已失去了优势。从多个应用实例可看出,掘锚一体化掘进技术在单巷掘进中还是有非常大的优势,而国内对于悬臂式掘进机综掘技术的改进近年来逐渐有了些效果,但在往智能化方向发展过程中仍然存在一些问题。

1) 智能关键技术不成熟,掘进工序联合性较差,部分巷道掘进关键智能技术仅停留在理论层面,缺乏实际应用案例。虽然我国对于悬臂式掘进机综掘技术的研究已经有了起色,并相继推出了离机遥控、断面监测等研究成果,但设备故障检测、智能截割、位姿纠偏等技术相对薄弱,智能关键技术研究成果的不足是导致巷道掘进整体智能化水平偏低的根本原因。由于巷道掘进是一个系统性的工程,单独对某一工序进行优化设计的思路总是片面的,对于巷道掘进工序的系统性研究相对薄弱是导致整体工序联合性较差的关键。另外,尽管有些技术已经有了初步智能化成果,但其他技术的智能化研究大多仍停留在理论阶段,并没有实际应用,严重阻碍了掘进智能化的发展,因此,应该更多地将理论与实践相结合。

2) 运输网络技术水平低,常规网络技术难以达

到要求。在掘进工作面运输系统中需要利用多种传感器对工作面设备实际工况及设备周围环境情况进行实时监测,而大量监测点的存在意味着接入信息传输网络的节点越来越多。而目前煤矿中采用的网络技术多为网络传输速率低的 4G 与 WiFi 等矿用无线网络技术,整体网络水平偏低,一方面难以接收大量节点传回的信息,另一方面对于需要占用较大传输带宽的摄像机传回的现场影像视频等内容,难以通过这些传输速率低的网络技术进行传输,且会影响信息传输的及时有效性。近年来矿用 5G 无线网络技术逐渐被推广,能够较好地满足智能掘进工作面所需要的高带宽、广连接、低时延的网络需求,但 5G 基站等设备占用的功率大,矿用设备多被设计成了矿用隔爆型产品,因此对于基站的安装施工有一定难度。

3) 理论与实际效果有差距,测量精度受环境因素影响大且难以克服。一方面,根据近年来专家学者对煤矿巷道设备智能远程监控系统的研究,大多通过井上试验后才将系统投入井下试用,而在井上难以全方面模拟井下诸多环境方面的因素,如掘进过程中粉尘、水雾等,致使系统投入使用后难以达到原本的理想效果;另一方面,受到井下环境因素的制约,掘进机在规划截割形状时,难以达到巷道施工的精度要求,远程智能监控系统的研究目前达不到位姿测量的精度要求,而井下电磁场又会对部分传感器造成影响,目前井下大多采用视觉测量方法,但井下复杂的环境条件会严重影响视觉测量,因此,测量精度问题依然是影响巷道智能化掘进发展的重要因素。

4 煤矿巷道掘进智能化发展探讨

1) 加强掘进设备集成协同化的研究。目前,对于掘进工作面设备的集成化、协同控制的研究还不足,而加强集成协同化研究是当前加快巷道掘进速度、使采掘失衡得到缓解的必然要求。通过对掘进工艺进行改进、对悬臂式掘进机进行掘运支于一体的改进,在实现巷道掘进中的掘进、运输、支护工序的平行作业,加快巷道掘进速度的同时,使其能适应我国大多数煤矿巷道条件下的煤岩巷掘进。

2) 加强设备模块化组合与 5G 矿用无线网络设备的研究。目前巷道掘进现场多习惯使用多种类型传感器等设备对现场环境、设备工况等进行实时监测,多设备的共同运行一方面会加大信息分析的工作量,另一方面目前煤矿常用的无线通信技术难以满足多节点的信息输入,因此,对设备的模块化组合

设计的研究是非常有必要的。另外,还需要加深对矿用5G无线网络技术设备的研究,研究安全性高的矿用5G设备。

3) 加强对巷道掘进远程智能监控系统的研究。在智能化、无人化的要求下,远程智能监控系统成为当前研究的重点之一。同时,掘进工作面掘进设备测量精度难以满足巷道施工要求、掘进设备位姿纠偏不够精确等问题,为远程智能监控系统研究明确了前进方向,未来应侧重研究如何提高掘进设备的测量精度及如何对掘进设备位姿精准纠偏。此外,由于测量误差的存在,未来可通过多种方式配合下的测量技术(如惯性导航、传感器等),对测量数据进行综合分析,进而提高远程智能监控系统的测量精度。

4) 注重难掘慢掘巷道掘进的研究。对煤岩硬度大的巷道掘进工程,我国普遍使用重型悬臂式掘进机进行掘进,但仍然存在各种问题,未来应注重以中型、轻型、简约型掘进设备代替重型掘进设备的研究工作,同时要注重该条件下掘进设备的故障率及掘进工艺、高效致裂与截割等的研究工作,在降低掘进设备成本投入的同时间接提升巷道掘进效率。

5) 研发新型智能掘进技术。煤矿巷道掘进过程中伴随灾害繁多,如巷道突水、冲击地压等,对该方面的研究目前来说相对较少,因此研究巷道的新型智能掘进前探技术,保证掘进工作面环境的安全,对于巷道快速掘进来说具有十分重要的意义。在面对煤岩硬度较大巷道的掘进工程,可通过新型破碎围岩、促进掘进巷道超前部分煤岩中的裂隙发育的技术(如定向冲击波等技术的研究),缓解此类掘进工程所面临的问题。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 王虹. 我国煤矿巷道掘进技术和装备的现状与发展[J]. *煤炭科学技术*, 2010, 38(1): 57-62.
WANG Hong. Present status and development of mine roadway heading technology and equipment in China coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2010, 38(1): 57-62.
- [4] 张科学. 综掘工作面智能化开采技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(7): 106-111.
ZHANG Kexue. Study on intelligent mining technology of fully-mechanized heading face[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(7): 106-111.
- [5] 惠兴田, 田国宾, 康高鹏, 等. 煤巷掘进装备技术现状及关键技术探讨[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(6): 11-16.
HUI Xingtian, TIAN Guobin, KANG Gaopeng, et al. Discussion on equipment technology status and key technology of roadway driving[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(6): 11-16.
- [6] 张东宝. 煤巷智能快速掘进技术发展现状与关键技术[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(5): 56-59.
ZHANG Dongbao. Development status and key technology of intelligent rapid driving technology in coal seam roadway[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(5): 56-59.
- [7] 杨健健, 张强, 吴淼, 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.
YANG Jianjian, ZHANG Qiang, WU Miao, et al. Research progress of autonomous perception and control technology for intelligent heading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2045-2055.
- [8] 吕志, 朱建明, 胡宇, 等. 综掘巷道超前支护装置及其应用研究[J]. *金属矿山*, 2015(2): 45-48.
LYU Zhi, ZHU Jianming, HU Yu, et al. Forepoling device for fully mechanized roadway heading and its Application[J]. *Metal Mine*, 2015(2): 45-48.
- [9] 史德强, 陆刚, 秦帅韬, 等. 综掘工作面掘进机截割速度的分析与研究[J]. *煤炭工程*, 2016, 48(5): 106-108.
SHI Deqiang, LU Gang, QIN Shuitao, et al. Analysis and research on cutting speed and fault tree of heading machine in fully mechanized heading face[J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(5): 106-108.
- [10] 王晨升, 苏芳. 掘锚交叉综掘工艺工业性试验研究[J]. *工矿自动化*, 2016, 42(9): 43-47.
WANG Chensheng, SU Fang. Study on industrial test of fully mechanized fast excavation technology of alternating with advancing or bolting[J]. *Industry and Mine Automation*, 2016, 42(9): 43-47.
- [11] 吴淼, 李瑞, 王鹏江, 等. 基于数字孪生的综掘巷道并行工艺技术初步研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(增刊1): 506-513.
WU Miao, LI Rui, WANG Pengjiang, et al. Preliminary study on the parallel technology of fully mechanized roadway based on digital twin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S1): 506-513.
- [12] 李慧平. 连采机掘进工艺在综掘机掘进巷道中的应用[J]. *煤炭技术*, 2015, 34(8): 218-220.

- LI Huiping. Continuous mining machine driving technology application in excavation roadway digging machine in ensemble[J]. *Coal Technology*, 2015, 34(8): 218-220.
- [13] 易香保, 倪礼强. 大断面软岩巷道综掘快速施工技术[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(6): 75-77.
YI Xiangbao, NI Liqiang. Rapid construction technology of large section soft rock roadway[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(6): 75-77.
- [14] 李瑞, 蒋威, 王鹏江, 等. 自移式临时支架的异步耦合调平控制方法[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(10): 3625-3635.
LI Rui, JIANG Wei, WANG Pengjiang, et al. Asynchronous coupling approach for leveling control of self-shifting temporary support[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(10): 3625-3635.
- [15] 符世琛, 李一鸣, 杨健健, 等. 基于超宽带技术的掘进机自主定位定向方法研究[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(11): 2603-2610.
FU Shichen, LI Yiming, YANG Jianjian, et al. Research on autonomous positioning and orientation method of roadheader based on ultra wide-band technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(11): 2603-2610.
- [16] 刘延生. 唐口煤矿综掘机智能远程控制技术[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(9): 27-32.
LIU Yansheng. Intelligent remote control technology for fully-mechanized roadheader of Tangkou Coal Mine[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(9): 27-32.
- [17] 高云峰, 马进功. 国产化连续采煤机在国内的应用发展现状[J]. *煤炭工程*, 2017, 49(8): 145-148.
GAO Yunfeng, MA Jingong. Current application and development status of domestic continuous miner[J]. *Coal Engineering*, 2017, 49(8): 145-148.
- [18] 张振, 梁大海. 国产连续采煤机在神东矿区快速掘进中的应用[J]. *煤矿机械*, 2010, 31(5): 184-186.
ZHANG Zhen, LIANG Dahai. Application in Shendong ore district of domestic continuous miner for fast tunneling[J]. *Coal Mine Machinery*, 2010, 31(5): 184-186.
- [19] 翟慧兵, 孔宏伟, 陈军. 大采高工作面多巷连采机掘进技术研究[J]. *煤炭工程*, 2011, 43(2): 28-30.
ZHAI Huibing, KONG Hongwei, CHEN Jun. Study on the tunneling technology of multi-lane continuous mining machine in large mining and high working face[J]. *Coal Engineering*, 2011, 43(2): 28-30.
- [20] 贺安民. 连采机掘进半煤岩巷效率及工艺优化研究[J]. *煤炭工程*, 2013, 45(增刊1): 29-30, 34.
HE Anmin. Study on driving efficiency and technique optimization of continuous miner in semi coal and rock gateway[J]. *Coal Engineering*, 2013, 45(S1): 29-30, 34.
- [21] 范晓东, 闫红红, 张宏, 等. 连采机截齿安装角对截割性能的影响研究[J]. *煤矿机械*, 2019, 40(12): 32-35.
FAN Xiaodong, YAN Honghong, ZHANG Hong, et al. Study on influence of cutting angle on cutting performance of continuous mining machine[J]. *Coal Mine Machinery*, 2019, 40(12): 32-35.
- [22] 梁大海, 魏帅, 闫飞. 连续采煤机台阶法掘进技术研究[J]. *煤炭技术*, 2022, 41(5): 58-61.
LIANG Dahai, WEI Shuai, YAN Fei. Study on bench method driving technology of continuous miner[J]. *Coal Technology*, 2022, 41(5): 58-61.
- [23] 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.
- [24] 崔旭芳. 常村煤矿掘锚机快速成巷技术研究[J]. *金属矿山*, 2014(12): 57-60.
CUI Xufang. Research on technology of driving anchor machine quick tunneling in Changcun Coal Mine[J]. *Metal Mine*, 2014(12): 57-60.
- [25] 吴建星, 吴拥政. 基于掘锚一体机的煤巷锚杆支护参数及施工工艺优化研究[J]. *煤矿开采*, 2014, 19(6): 64-67.
WU Jianxing, WU Yongzheng. Optimization of supporting parameters and construction technique of coal roadway based on driving and anchor machine[J]. *Coal Mining Technology*, 2014, 19(6): 64-67.
- [26] 任水泉. 掘锚一体化技术在万利一矿的应用[J]. *煤炭工程*, 2015, 47(2): 47-49.
REN Shuiquan. Application of driving-bolting integration technology in Wanli No.1 Coal Mine[J]. *Coal Engineering*, 2015, 47(2): 47-49.
- [27] 陈大广. 掘锚一体化巷道支护参数分析与工序优化[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(10): 224-227, 231.
CHEN Daguang. Roadway supporting parameters analysis and process optimization for excavation and bolting integration[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(10): 224-227, 231.
- [28] 董庆, 蔡志炯, 赵洪. 掘锚一体机在特厚煤层大断面回采巷道支护中的应用[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(12): 35-40.
DONG Qing, CAI Zhijiong, ZHAO Hong. Application study on support technology for gateway of large section in extremely thick coal seam using intellectualized driving and anchor machine[J]. *Coal Engineering*, 2018, 50(12): 35-40.
- [29] 李旺年. 掘锚一体机机载锚杆钻机的研制[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(7): 138-141.
LI Wangnian. Development of bolting machine on anchor excavator machine[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(7): 138-141.

- [30] 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.
- [31] 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.
YANG Jianjian, ZHANG Qiang, WANG Chao, et al. Status and development of robotization research on roadheader for coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2995-3005.
- [32] 田劼. 悬臂掘进机掘进自动截割成形控制系统研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.
TIAN Jie. Research on boom-type roadheader auto cutting and profiling control system[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2010.
- [33] 王苏彧. 悬臂式掘进机记忆截割及自动截割控制方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
WANG Suyu. Study on memory cutting and automatic cutting control method of boom-type roadheader[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2014.
- [34] 伍普照. 悬臂式掘进机智能截割控制系统研究与设计[J]. 中国煤炭, 2017, 43(8): 100-104.
WU Puzhao. Research and design of intelligent cutting control system for boom-type roadheader[J]. China Coal, 2017, 43(8): 100-104.
- [35] 谢苗, 李晓婧, 刘治翔. 基于PID的掘进机横摆速度智能控制[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(1): 125-127, 132.
XIE Miao, LI Xiaojing, LIU Zhixiang. The intelligent control of roadheaders yaw velocity is established based on neural network PID control method[J]. Machine Design & Research, 2019, 35(1): 125-127, 132.
- [36] 张德义, 刘送永, 贾新庆, 等. 基于红外热像的夹矸巷道断面记忆截割试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3377-3385.
ZHANG Deyi, LIU Songyong, JIA Xinqing, et al. Experimental study on memory cutting of roadway cross-section containing gangue based on infrared thermography[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3377-3385.
- [37] 王鹏江, 杨阳, 王东杰, 等. 悬臂式掘进机煤矸智能截割控制系统与方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(增刊2): 1124-1134.
WANG Pengjiang, YANG Yang, WANG Dongjie, et al. Intelligent cutting control system and method of coal and gangue in robotic roadheader[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 1124-1134.
- [38] 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(3): 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(3): 87-90.
- [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 Fuyu, 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] 张旭辉, 陈利, 马宏伟, 等. 煤矿掘进机器人虚拟仿真与远程控制系统[J]. 工矿自动化, 2016, 42(12): 78-83.
ZHANG Xuhui, CHEN Li, MA Hongwei, et al. Virtual simulation and remote control system for coal mine roadheader robot[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(12): 78-83.
- [41] 张旭辉, 谢亚洲. 基于DSP的悬臂式掘进机控制系统设计[J]. 煤炭工程, 2019, 51(12): 172-176.
ZHANG Xuhui, XIE Yazhou. Design of roadheader control system based on DSP[J]. Coal Engineering, 2019, 51(12): 172-176.
- [42] 张旭辉, 张超, 王妙云, 等. 数字孪生驱动的悬臂式掘进机虚拟操控技术[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(6): 1617-1628.
ZHANG Xuhui, ZHANG Chao, WANG Miaoyun, et al. Digital twin-driven virtual control technology of cantilever roadheader[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(6): 1617-1628.
- [43] 郝俊信. 综掘机远程可视化智能掘进技术的研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(增刊2): 274-279.
HAO Junxin. Research on long-distance visual intelligent tunneling technology of full-mechanized driving machine[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(S2): 274-279.
- [44] 呼守信. 高效快速掘进系统的协同控制[J]. 工矿自动化, 2017, 43(4): 86-88.
HU Shouxin. Cooperative control of high-efficient and rapid excavation system[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(4): 86-88.
- [45] 程凤霞. 综掘成套装备协同联动控制系统设计[J]. 自动化仪表, 2020, 41(6): 96-99.
CHENG Fengxia. Design of coordinated linkage control system of comprehensive excavation equipment[J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41(6): 96-99.
- [46] 马宏伟, 王鹏, 王世斌, 等. 煤矿掘进机器人系统智能并行协同控制方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2057-2067.
MA Hongwei, WANG Peng, WANG Shibin, et al. Intelligent parallel cooperative control method of coal mine excavation robot system[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2057-2067.