

机电与自动化

综掘工作面智能化开采技术研究

张科学^{1,2,3,4,5}

(1. 中国煤炭科工集团北京天地玛珂电液控制系统有限公司,北京 100013;2. 中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,北京 100083;3. 煤炭科学研究总院智能控制技术研究院,北京 100013;4. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083;5. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室(安徽理工大学),安徽淮南 232001)

摘要:基于现场调研、统计分析和数值计算相结合的方法,研究了综掘工作面智能化开采技术现状及发展趋势,确定了综掘工作面智能化无人开采技术分2个阶段,即可视远程干预型智能化无人开采和自适应型智能化无人开采;指出了综掘大断面巷道围岩变形的极值宽度为4.5 m,且综掘智能化工作面断面宽度不宜超过4.5 m;得到了综掘工作面智能化开采工序、控制系统(围岩探测系统、生产控制系统和视频监控系统)和技术路线;提出了大断面巷道变形智能控制技术、掘进机智能化技术、锚杆支护智能化技术、运输系统智能化技术和视频监控智能化技术是综掘工作面智能化开采的关键技术。研究成果可为综掘工作面智能化开采技术的后续长足发展提供借鉴和参考。

关键词:综掘工作面;智能化开采;无人化;开采工序

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2017)07-0106-06

Study on intelligent mining technology of fully-mechanized heading face

Zhang Kexue^{1,2,3,4,5}

(1. Beijing Tiandi-Marco Electro-Hydraulic Control System Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Intelligent Control Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 4. State Key Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 5. Key Laboratory of Safety and High-efficiency Coal Mining, Ministry of Education (Anhui University of Science and Technology), Huainan 232001, China)

Abstract: Based on a method combined with the site investigation, statistic analysis and numerical calculation, the paper had a study on the present status and development tendency of the intelligent mining technology for the fully-mechanized heading face, and a determination on the two stages divided from the intelligent mining technology of the fully-mechanized heading face. Thus the two stages would be a visible remote intervention mode intelligent and unmanned mining and a self-adaptive mode intelligent and unmanned mining. The paper pointed out that a limit width of the surrounding rock deformation in the fully-mechanized large cross section heading roadway was 4.5 m and the cross section width of the fully mechanized intelligent heading face should not be over 4.5 m. The paper had an intelligent mining procedure of the fully mechanized heading face, a control system (surrounding rock detection system, production control system and video monitoring system) and the technical route. The paper provided that the deformation intelligent control technology of the mine large cross section roadway, the intelligent technology of the mine roadheader, the bolt support intelligent technology, the intelligent technology of the transportation system and the video monitoring intelligent technology would be the key technologies of the intelligent mining for the fully-mechanized heading face. The study results could provide the references to the late development of the intelligent mining technology for the fully-mechanized heading face.

Key words: fully-mechanized heading face; intelligent mining; unmanned; mining procedure

收稿日期:2017-05-28;责任编辑:赵瑞 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.07.019

基金项目:煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金资助项目(SKLCRSM16KFB08);中国煤炭科工集团科技创新基金资助项目(2017QN010);煤炭科学研究总院科技创新基金资助项目(2016ZYQN004);煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金资助项目(JYBSYS2017105)

作者简介:张科学(1986—),男,河南永城人,助理研究员,博士。Tel:13366030731, E-mail:zhkexue@163.com

引用格式: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.

0 引言

煤炭是我国的基础能源,占一次能源资源总量的94%,2016年,我国煤炭产量34.1亿t,煤炭消费占一次能源消费的比例为65%,煤炭仍是国民经济发展的重要保障^[1-3]。我国煤炭开采分井工开采和露天开采2种方式,其中以井工开采为主,约占90%。采掘工作面是井工开采的重要生产空间,分为回采工作面和掘进工作面,一般比例为1:3,目前回采工作面综采机械化程度约占90%,综掘机械化程度约占30%。随着综采工作面自动化技术、智能化技术以及无人化技术的快速发展^[4-5],使综采工作面采煤效率也大幅提高,进一步造成矿井采掘衔接矛盾更加突出,严重制约着矿井的安全高效生产。同时,采掘工作面一直是煤矿灾害事故的高发区,据不完全统计^[6-7],近年来我国煤矿重大事故中,掘进事故最多,约占全部事故的40%以上。

目前,综掘工作面一线工人处于高粉尘、高湿度和高噪声等恶劣环境,且面临着冒顶片帮、冲击地压、煤与瓦斯突出和底板突水等危险,综掘工作面不仅是矿井安全性最差、作业环境最恶劣的场合之一,也是自动化程度较低的场合之一,远低于综采工作面。因此,只有将人从综掘工作面解放出来,才能彻底改变这种局面,实现“人得解放、无人则安”的目的。

国内外综掘工作面技术与装备的发展趋势是从机械化、自动化、智能化到无人化,此发展趋势与综采工作面整体一致,因此,借鉴综采工作面智能化无人开采的成功经验^[8-9],提出综掘工作面智能化无人开采分2个阶段,即可视远程干预型智能化无人开采和自适应型智能化无人开采。基于此,笔者通过分析综掘工作面智能化开采技术与装备现状,提出了综掘工作面智能化开采的关键技术及发展趋势。

1 综掘工作面智能化开采技术与装备现状

1.1 综掘工作面开采技术研究现状

20世纪中后期,我国矿井设计取消了岩石集中巷的开拓布置方式,大幅增加了煤巷在矿井开拓布局中的比例,目前煤巷约占总掘进巷道工程量的70%^[8,10-11],随着矿井开采体系的发展,煤巷占比越来越大,但有向少掘进巷道和不掘进巷道的工作面布局方式发展的趋势。因此,笔者重点研究煤巷综掘工作面开采技术与装备。

1.1.1 综掘工作面技术与装备现状

我国综掘工作面技术研究开发应用经历了2个阶段^[12]:①引进、消化和研制阶段,使综掘技术使用和研制提高到一定水平,如AM-50和S100综掘机技术;②自主开创、设计和发展阶段,使综掘技术研究制造水平迈上新台阶,如EBJ-120TP、EBH-120和EBZ-160HN综掘机技术。目前,我国掘进机及综掘技术已初具规模,今后的发展方向是在煤巷大量应用轻、中型掘进机,半煤岩巷和大断面掘进应用重型机,采掘锚机组的研制和应用是综掘技术发展的一个重要方向,更有利于现代化大型安全高效矿井的需求。

综掘工作面开采技术的发展与其装备水平具有重要关系。目前综掘工作面高效开采技术主要有4种方式:①煤巷综合机械化掘进;②大断面连续采煤机高效掘进;③连续采煤机为基础的掘锚机组一体化高效掘进;④悬臂式掘进机和机载锚杆钻机为基础的掘锚机组一体化高效掘进。综掘工作面高效开采技术装备配备^[8]见表1。

表1 综掘工作面高效开采技术装备配备

Table 1 Efficient mining technology and equipment of fully-mechanized heading face

方式	配套设备	特点及适应范围
1	悬臂式掘进机、单体锚杆钻机、桥式转载机、带式输送机、机载除尘设备	适用于单巷掘进,适应范围广,掘锚不能平行作业
2	悬臂式掘进机机载锚杆钻机、桥式转载机、带式输送机、机载除尘设备	适用于单巷掘进,适应范围广,有利于提高支护效率
3	连续采煤机、梭车、给料破碎机、带式输送机、四臂锚杆钻车、铲车	适用于巷道条件较好的大断面双巷或多巷掘进,掘锚交叉作业,掘进速度快,适应范围小
4	掘锚机组、桥式转载机、带式输送机	适用于巷道条件较好的大断面单巷掘进,掘锚平行作业,掘进速度快,适应范围较小

1.1.2 综掘工作面装备与国外差距

与国际领先及先进水平相比,我国煤矿巷道综掘装备在破岩能力、可靠性及适应性等方面还存在差距^[8]。巷道掘进工作面使用的大型装备多数被国外厂商(或合资)所占领,如美国JOY公司、奥地利奥钢联公司和德国艾柯夫公司等,我国综掘装备在设计制造水平、加工工艺水平、自动化水平及关键

技术指标等方面同国际先进水平还存在差距。但经过自主研发及技术攻关,我国综掘装备科研单位及厂商在大功率重型悬臂式掘进机技术、掘锚机组技术等方面也取得了长足的发展,其中典型代表机构有煤炭科学总院上海研究院、煤炭科学总院太原研究院(EBZ(H)系列)、佳木斯煤机厂(S(EBZ)系列)、三一重装(EBZ系列)、兖矿集团(ABM20-S型)和淮南煤机厂等。我国悬臂式掘进机主要技术参数^[10]见表2。

表2 我国悬臂式掘进机主要技术参数

Table 2 Main technical parameters of boom type roadheader boring machine in China

项目	EBZ-160SH	AM-50	EBJ-160	S-200M
最大掘进高度/m	4.3	4.0	4.4	5.1
最大掘进宽度/m	6.0	4.8	5.8	6.5
切割硬度/MPa	80~100	≤60	≤80	≤80
适用掘进坡度/(°)	16	16	16	15
挖底深度/mm	250	100	200	400
总装机功率/kW	314	163	345	295
切割功率/kW	160	100	160	200
行走速度/(m·min ⁻¹)	2.7~7.1	5.0	2.4~4.8	3.5~8.0
质量/t	53	24	50	56
切割方式	纵轴式	横轴式	横轴式	纵轴式
外形规格/(m×m×m)	10.5×2.7×1.5	7.5×2.1×1.6	1.1×2.7×1.6	10.5×3.6×1.8
生产单位	煤炭科学总院上海研究院	淮南煤机厂	煤炭科学总院太原研究院	佳木斯煤机厂

1.2 综掘工作面开采技术发展趋势

1.2.1 综掘工作面掘锚一体化技术

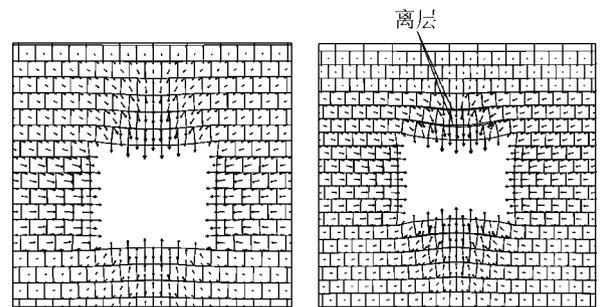
综掘工作面掘锚一体化技术是将工作面掘进和支护进行一体化施工的开采技术,锚杆在顶板暴露后能有效及时进行钻眼、装药、铺网及安装,使锚杆支护速度和施工质量大幅提高,支护效果明显改善,特别是对顶板条件不太好的巷道使用效果更加显著。基于连续采煤机的掘锚一体化技术和基于悬臂式掘进机的掘锚同步作业联合一体化技术是未来的发展方向;前者在澳大利亚、美国、英国等国家被广泛采用,被誉为世界采矿界煤巷掘进的一次技术革命;后者在国内具有普遍的适用性,也是掘锚一体化技术发展的重要方向。

1.2.2 综掘工作面自动化、智能化、无人化开采技术

随着掘进装备机械化程度的提高、自动控制系统的完善,人们对于掘进工作面的自动化需求越来越高。针对掘进机单机自动控制水平提高,锚杆支护机械化程度的提高,研究与掘进机相配套原煤运输、材料运输、巷道通风、工作面除尘等自动化、智能化系统集成,以及掘进工作面瓦斯、顶板离层、锚杆锚索等安全保障的自动、智能在线监测,构建与综采自动化、智能化工作面相适应的掘进自动化、智能化工作面。目前,综掘工作面智能化开采技术还处于起步发展阶段,其利用主控计算机的智能化开采技术将是一个可行的发展方向;综掘工作面无人化开采技术还处于概念发展阶段。

1.2.3 综掘工作面配套技术水平

综掘工作面配套技术水平的提高是综掘开采技术得以成功推广应用的基本保障,其配套技术主要包括综掘工作面综合防尘技术、综掘工作面围岩探测技术、视频监控技术和大断面巷道围岩控制技术,特别大断面巷道围岩稳定机理及智能控制技术是配套技术中的重要技术。目前,综掘工作面端面跨度一般较大,多为矩形,且顶板和两帮多为煤层(巷道掘进一般沿底掘进),加上巷道围岩强度低、受力复杂,所以,大断面巷道围岩稳定性相对较差,进而造成围岩变形量及破裂范围较大,巷道支护较为困难。因此,综掘工作面的高效掘进必须开展大断面煤巷围岩的稳定机理及智能控制技术研究,进一步确定自动化、智能化及无人化掘进工作面的合理支护参数,同时也为煤矿实现安全、高效和绿色生产提供技术保障。不同大断面巷道宽度围岩位移矢量,如图1所示。巷道宽度与巷道变形关系,如图2所示。



(1) 巷道宽4.25 m

(2) 巷道宽4.50 m

图1 不同大断面巷道宽度围岩位移矢量

Fig. 1 Displacement vector of surrounding rock in different large section roadway widths

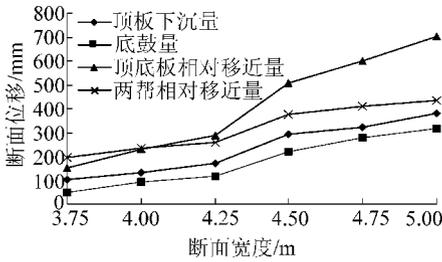


图2 巷道宽度与巷道变形关系

Fig. 2 Relationship between roadway width and roadway deformation

由图1和图2分析可知:随着巷道宽度的增加,巷道变形量增大,当巷道宽度大于4.5 m,巷道变形显著增大。当巷道宽度小于4.5 m,虽然巷道的变形量较大,顶板也出现了整体弯曲下沉现象^[13-14],但顶、底都未出现明显的离层破坏现象,说明巷道并未表现出大断面煤巷的变形破坏特点;当巷道宽度超过4.5 m后,不但变形量急剧增大,而且顶板也出现了离层破坏现象,随着宽度的进一步增加,离层值也在逐渐增大,具有明显的大断面巷道的离层破坏特点。因此,综掘大断面巷道围岩变形的极值宽度为4.5 m,且综掘工作面断面宽度不宜超过4.5 m。

1.3 综掘智能化工作面开采技术现状

综合查阅“综掘工作面智能化”、“综掘智能化”和“掘进工作面智能化”等关键词的国内外相关文献发现^[1-5,8-11,15-16];综掘工作面智能化开采技术的相关研究目前仍处于空白。国内外学者多集中在对综掘工作面掘进机、锚杆钻机、掘锚一体机等单机装备的自动化、甚至智能化方面的研究,相关研究结论对综掘工作面智能化开采技术的发展奠定了有益基础。

2 综掘工作面智能化开采技术发展

2.1 综掘工作面智能化开采工序

综掘工作面智能化开采技术是以煤壁为输入对象,原煤和支护成型巷道为输出对象,且探测控制、生产控制和视频控制在综掘工作面电液控制系统的协同作用下完成的智能化开采方式。综掘工作面信号来源复杂,可测量、不可测量、可控制和不可控制信号交叉存在。综掘工作面探测工序有岩层移动、超前地质勘探、水源探测、瓦斯抽采等;生产工序有割煤、支护、运输等;视频工序有供电、通风、排水、顶板监测和瓦斯监测等。综掘工作面智能化开采工序,如图3所示。

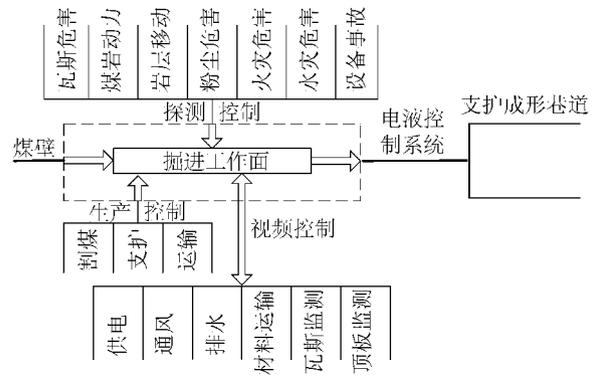


图3 综掘工作面智能化开采工序

Fig. 3 Intelligent mining process of fully-mechanized heading face

2.2 综掘工作面智能化开采控制系统

根据综掘工作面智能化开采工序可将综掘工作面智能化开采控制分为三大系统,分别为围岩探测系统、生产控制系统和视频监控系统。综掘工作面智能化开采控制系统,如图4所示。

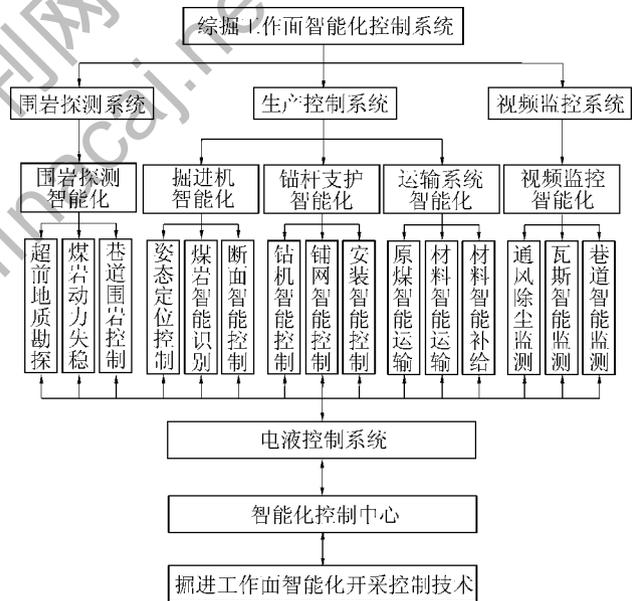


图4 综掘工作面智能化开采控制系统

Fig. 4 Intelligent mining control system of fully-mechanized heading face

2.3 综掘工作面智能化开采关键技术

根据综掘工作面智能化开采工序和控制系统分析可知,综掘工作面智能化开采技术旨在针对综掘工作面的智能化程度,从大断面巷道变形智能控制技术、掘进机智能化技术、锚杆支护智能化技术、运输系统智能化技术和视频监控智能化技术等入手,从系统控制的角度研究巷道掘进的智能化集成。综掘工作面智能化开采关键技术路线如图5所示。

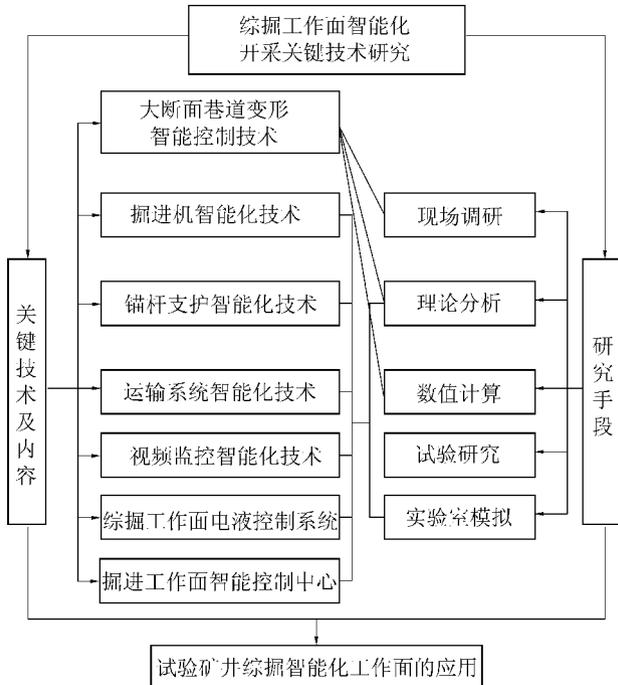


图5 综掘工作面智能化开采关键技术路线

Fig. 5 Key technology routes for intelligent mining of fully-mechanized heading face

2.3.1 大断面巷道变形智能控制技术

随着综采工作面自动化、智能化及无人化程度的提高和重型设备的应用、工作面产量的增加以及瓦斯涌出量的增大,对回采巷道提出加大巷道断面的要求。大断面巷道与目前一般断面的巷道变形破坏规律一致的是,巷道开挖后,如果未采取及时、有效的支护,巷道的破坏区与塑性区会越来越大^[20-21]。但破坏区与塑性区的扩展有一个时间过程,若及时对巷道施加高预紧力锚杆支护,增加煤岩体的峰值强度和残余强度^[20],可使巷道处于稳定状态。所以,及时采用高预紧力锚杆及锚索支护是目前控制大断面煤巷围岩变形的一种有效支护技术。但综掘智能化工作面对大断面巷道变形要求具有智能感知和智能控制的功能,因此需要对大断面巷道围岩稳定机理及变形特征做进一步研究,以达到智能控制、适应及预测围岩变形的目的。

2.3.2 掘进机智能化技术

掘进机是综掘智能化工作面的核心装备,对实现综掘工作面智能化开采起到关键作用。掘进机姿态定位控制、煤岩智能识别和断面智能成型控制等方面是目前需要重点研究的方向,其中基于光纤陀螺的惯性导航、激光制导和机器视觉测量等实时检测掘进机在推进过程中的定位技术,可以揭示掘进

机与巷道开掘前后的空间耦合关系,并能进一步构建掘进机推进过程中的自主导航体系,是目前掘进机智能化技术的前沿研究热点。

2.3.3 锚杆支护智能化技术

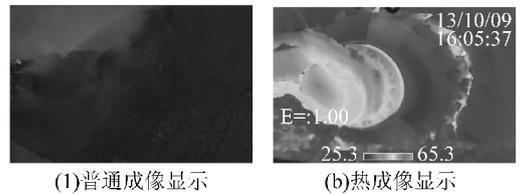
锚杆支护是综掘智能化工作面的常用支护方式,其钻孔智能化、铺网智能化和安装智能化是锚杆支护智能化技术实现的关键。目前,钻孔和安装智能化在采用掘锚一体化钻机等方式后,取得了长足的进步,但铺网智能化发展较为缓慢,缺乏成套的解决方案,可在锚杆支护全工序内进行优化创新,找到智能化铺网的解决途径。

2.3.4 运输系统智能化技术

运输系统智能化关键在于原煤运输、材料运输和补给的智能化。原煤运输智能化目前具有可行的解决方案,材料运输和补给的智能化受综掘工作面空间、材料的自动搬运等限制很难取得突破,可采用矿用机器人或智能装备代替人工装卸材料的方式,最终实现运输系统的智能化发展。

2.3.5 视频监控智能化技术

视频监控智能化技术是实现综掘工作面可视远程干预型智能化无人开采的关键技术。由于综掘工作面存在粉尘极大、视频晃动等问题,可视远程视频不易分辨、看清,因此,建立综掘工作面成像轮廓与掘进机转速、电流、机头温度等工况参数的非线性规律关系,探索基于热成像技术的综掘工作面高清成像研究,是实现视频监控智能化技术的一个可行研究方向。高粉尘下的热成像显示效果较好,如图6所示。



(1)普通成像显示

(b)热成像显示

图6 高粉尘下的热成像显示效果

Fig. 6 High thermal imaging performance under high dust

3 结 论

1) 确定了综掘工作面智能化无人开采分2个阶段,即可视远程干预型智能化无人开采和自适应型智能化无人开采。

2) 指出了综掘大断面巷道围岩变形的极值宽度为4.5 m,且综掘智能化工作面断面宽度不宜超过4.5 m。

3)得到了综掘工作面智能化开采工序、控制系统(围岩探测系统、生产控制系统和视频监控系統)和技术路线,提出了综掘工作面智能化开采关键技术,即大断面巷道变形智能控制技术、掘进机智能化技术、锚杆支护智能化技术、运输系统智能化技术和视频监控智能化技术。

参考文献(References):

[1] 王金华,黄乐亭,李首滨,等.综采工作面智能化技术与装备的发展[J].煤炭学报,2014,39(8):1418-1423.
Wang Jinhua, Huang Lengting, Li Shoubin, *et al.* Development of intelligent technology and equipment in fully-mechanized coal mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1418-1423.

[2] 任怀伟,王国法,李首滨,等.7 m 大采高综采智能化工作面成套装备研制[J].煤炭科学技术,2015,43(11):116-121.
Ren Huaiwei, Wang Guofa, Li Shoubin, *et al.* Development of intelligent sets equipment for fully-mechanized 7 m height mining face[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(11): 116-121.

[3] 黄曾华.可视远程干预无人化开采技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(10):131-135,187.
Huang Zenghua. Study on unmanned mining technology with visualized remote interference[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(10): 131-135, 187.

[4] 黄乐亭,黄曾华,张科学.大采高综采智能化工作面开采关键技术研究[J].煤矿开采,2016,21(1):1-6.
Huang Leting, Huang Zenghua, Zhang Kexue. Key technology of mining in intelligent fully mechanized coal mining face with large mining height[J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(1): 1-6.

[5] 黄曾华,南柄飞,张科学,等.基于 Ethernet/IP 综采机器人一体化智能控制平台设计[J].煤炭科学技术,2017,45(5):9-15.
Huang Zenghua, Nan Bingfei, Zhang Kexue, *et al.* Design on intelligent control platform of mechanized mining robot based on Ethernet/IP[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 9-15.

[6] 张科学.构造与巨厚砾岩耦合条件下回采巷道冲击地压机理研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(4):1040-1046.
Zhang Kexue. Mechanism study of coal bump under tectonic and ultra-thick conglomerate coupling conditions in mining roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 1040-1046.

[7] 张科学,何满潮,姜耀东.断层滑移活化诱发巷道冲击地压机理研究[J].煤炭科学技术,2017,45(2):12-20,64.
Zhang Kexue, He Manchao, Jiang Yaodong. Mechanism research of roadway pressure bump induced by fault slip and activation[J].

Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 12-20, 64.

[8] 王虹.综采工作面智能化关键技术研究现状与发展方向[J].煤炭科学技术,2014,42(1):60-64.
Wang Hong. Development orientation and research state on intelligent key technology in fully-mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 60-64.

[9] 黄曾华,苗建军.综采工作面设备集中控制技术的研究应用[J].煤炭科学技术,2013,41(11):11-17.
Huang Zenghua, Miao Jianjun. Application research of equipment centralized control technology in fully-mechanized coal face[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(11): 11-17.

[10] 何敬德.我国煤矿采、掘、运装备的研制现状和发展对策[J].煤炭科学技术,2007,35(2):1-7.
He Jingde. Present status and development of chinese mining, driving and transportation equipment in China coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(2): 1-7.

[11] 陶永芹.我国综掘技术及其发展研究[J].煤矿机械,2005,24(7):1-2.
Tao Yongqin. Chinese synthesis tunnelling technology and developmental research[J]. Coal Mine Machinery, 2005(7): 1-2.

[12] 肖同强,李化敏,涂兴子,等.岩巷综掘五位一体快速成巷技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(12):1-7.
Xiao Tongqiang, Li Huamin, Tu Xingzi, *et al.* Study on five-in-one rapid excavation technology of rock roadway with fully-mechanized method[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 1-7.

[13] 张科学,姜耀东,张正斌,等.大煤柱内沿空掘巷窄煤柱合理宽度的确定[J].采矿与安全工程学报,2014,31(2):255-262,269.
Zhang Kexue, Jiang Yaodong, Zhang Zhengbin, *et al.* Determining the reasonable width of narrow pillar of roadway in gob entry driving in the large pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(2): 255-262, 269.

[14] 张科学.深部煤层群沿空掘巷护巷煤柱合理宽度的确定[J].煤炭学报,2011,36(S1):28-35.
Zhang Kexue. Determining the reasonable width of chain pillar of deep coal seams roadway driving along next goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 28-35.

[15] 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.

[16] David C Reid, Mark T Dunn, Peter B Reid, *et al.* A practical inertial navigation solution for continuous miner automation[C]. Proceedings of the 2012 Coal Operators' Conference, Wollongong, Australia, 2012.