



移动扫码阅读

范京道,徐建军,张玉良,等.不同煤层地质条件下智能化无人综采技术[J].煤炭科学技术,2019,47(3):43-52. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.03.006

FAN Jingdao, XU Jianjun, ZHANG Yuliang, et al. Intelligent unmanned fully-mechanized mining technology under conditions of different seams geology [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 43-52. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.03.006

不同煤层地质条件下智能化无人综采技术

范京道^{1,2},徐建军^{1,2},张玉良^{1,2},张科学^{3,4},李川^{1,2}

(1.陕西煤业化工集团有限责任公司,陕西 西安 710065;2.国家应急管理部 煤矿智能化开采技术创新中心,陕西 黄陵 727307;
3.华北科技学院 安全工程学院,北京 101601;4.华北科技学院 智能化无人开采研究所,北京 101601)

摘要:为进一步提升煤矿智能化开采技术装备水平,引领行业智能化开采技术科学发展,实现煤炭行业在新时代下的升级转型,结合陕煤集团黄陵矿业公司智能化无人开采成功实践经验,重点研究了复杂地质条件下薄煤层、中厚煤层和厚煤层智能化开采实践技术,得到了中厚及较薄煤层智能化无人综采的关键技术是液压支架全工作面跟机自动化与远程人工干预技术、采煤机全工作面记忆截割与远程人工干预技术、综采自动化集中控制技术、工作面视频监控技术、智能化集成供液控制技术和超前支护自动控制技术;厚煤层智能化无人综采的关键技术是大采高工作面防片帮智能控制技术、大采高工作面底软智能控制技术、大采高工作面高清晰视频监控技术和大采高工作面环境安全保障技术;得出了煤矿智能化无人开采支撑体系建设分为科技创新、信息化标准、安全保障技术、企业精细化管理和员工素质提升工程五大体系;提出了通过提高整体技术创新性与适应性和提高装备的可靠性与适应性方面的攻关研究,是不断推动煤炭智能化无人开采技术向智能开采高级阶段迈进的努力途径。最后,分析了目前国内外智能化无人开采技术应用现状及推广制约因素,并结合人工智能及新一代工业革命发展方向对煤炭智能开采技术进行了展望。

关键词:智能化综采;远程人工干预技术;视频监控;智能控制;复杂地质条件

中图分类号:TD67 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2019)03-0043-10

Intelligent unmanned fully-mechanized mining technology under conditions of different seams geology

FAN Jingdao^{1,2}, XU Jianjun^{1,2}, ZHANG Yuliang^{1,2}, ZHANG Kexue^{3,4}, LI Chuan^{1,2}

(1. Shaanxi Coal and Chemical Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710065, China; 2. Coal Mine Intelligent Mining Technology Innovation Center, National Emergency Management Department, Huangling 727307, China; 3. School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 4. Institute of Intelligent Unmanned Mining, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China)

Abstract: In order to further improve the level of intelligent mining technology and equipment, lead the scientific development of intelligent mining technology in the industry, and realize the upgrading and transformation of the coal industry in the new era, combined with the successful practice experience of intelligent unmanned mining of Shaanxi Coal Group Huangling Mining Company, focus on research intelligent mining practice technology of thin coal seam, medium thick coal seam and thick coal seam under complex geological conditions has obtained the key technology of intelligent and unmanned comprehensive mining of medium and thick coal seams. Hydraulic support full working surface with machine automation and remote manual intervention technology, coal mining machine full working surface memory cutting and remote manual intervention technology, comprehensive mining automation centralized control technology, working surface video moni-

收稿日期:2018-08-22;责任编辑:赵 瑞

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51804160,51704159);中国博士后科学基金面上资助项目(2017M620955);国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804304);深部岩土力学与地下工程国家重点实验室(北京)开放基金资助项目(SKLGDUK1822);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:范京道(1965—),男,陕西蒲城人,博士,教授级高级工程师,现任陕西煤业化工集团有限责任公司总经理助理,国家应急管理部煤矿智能化开采技术创新中心主任。E-mail: fanjd@126.com

ring technology, intelligent integrated liquid supply control technology and advanced support automatic control technology, and thick coal seam intelligent key technologies of unmanned fully mechanized mining are the intelligent control technology of large mining height working surface, the soft intelligent control technology of large mining height working surface, the high-definition video monitoring technology of large mining height working face and the environmental safety guarantee of large mining height working face; It is concluded that the construction of intelligent unmanned mining support system in coal mine is divided into scientific and technological innovation and informationization, safety protection technology, enterprise refined management and employee quality improvement project; The research on improving the reliability and adaptability of equipment by improving the overall technological innovation and adaptability, is to continuously promote the intelligentization of coal. The approach of human mining technology is to the advanced stage of intelligent mining. Finally, the paper analyzes the current application status and promotion constraints of intelligent unmanned mining technology at home and abroad, and combines the artificial intelligence and the development direction of the new generation industrial revolution to prospect the coal intelligent mining technology.

Key words: intelligent fully mechanized mining; remote manual intervention technology; video surveillance; intelligent control; complex geological condition

0 引 言

“十二五”以来,通过技术引进、消化、吸收和再创新,我国煤矿智能化综采技术有了长足发展,取得了一批先进科研成果,开启了我国智能化开采的新时代。2000年,中国煤炭科工集团天地科技股份有限公司北京开采设计事业部与外企合作开展了薄煤层自动化无人工作面的研究,并在小青煤矿应用实践;2004—2005年,山东新汶集团和大同煤业集团相继引进国外新技术,进行工作面的无人开采尝试;2008—2011年,北京天地玛珂电液控制系统有限公司先后自主研发了具有完全自主知识产权的我国第一套SAC型液压支架电液控制系统和SAM型综采自动化控制系统,打破了国外发达公司在中国长期的垄断地位和技术封锁^[1-2]。2014年5月,陕煤黄陵矿业有限公司(以下简称黄陵矿业公司)完成了1.4~2.2 m煤层国产装备智能化无人综采技术研究与应用,开创了国产成套装备智能化采煤的先河;在全国范围内,首次实现了地面远程操控,并形成了在地面指挥控制中心远程采煤作业的常态化。目前该项技术已在淮南矿业集团张集煤矿、阳煤集团新元矿、神东煤炭集团石圪台煤矿等进行了不同程度的推广应用。2017年3月,兖矿集团转龙湾煤矿在国内综采工作面首次应用LASC技术,实现了液压支架与刮板输送机自动校直,研制了具有惯导特性的智能化采煤机,行走位置控制精度 ± 3 cm,滚筒截割高度稳态重复精度 ± 4 cm^[3]。

随着智能化、互联网、大数据、人工智能、智能制造等技术日趋成熟,国家安全生产及科技管理等部门,在煤炭行业大力推进智能开采技术。2015年国家安全生产监督管理总局在煤矿等重点行业领域开展“机械化换人、自动化减人”科技强安专项行动,

重点是以机械化生产替换人工作业、以自动化控制减少人为操作,大力提高企业安全生产科技保障能力。2016年国家发展改革委和国家能源局发布的《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》,明确了能源技术创新的15个重点任务,其中首要一条,就是要实现煤炭无害化开采技术创新,2030年实现智能化开采,重点煤矿区基本实现工作面无人化,全国采煤机械化程度达到95%以上^[4]。2017年,科技部牵头相关部委制定了“十三五”国家重点研发计划“公共安全风险防控与应急技术装备”重点专项^[5],如目前由20家产学研单位承担的“煤矿智能开采安全技术与装备研发”项目,分课题重点研究煤层智能开采基于煤岩界面识别的工作面智能调高技术、煤矿智能开采透明工作面的构建技术、巡检机器人、智能开采大数据采集分析处理平台、智能开采安全技术和装备集成与示范等,精准攻关煤炭开采新技术,科学引领煤炭行业科技发展方向,实现智能化无人综采技术水平的不断提升。

智能化无人综采技术是指采用具有感知能力、记忆能力、学习能力和决策能力的液压支架、采煤机、刮板输送机等综采装备,以自动化控制系统为核心,以可视化远程监控为手段,实现综采工作面采煤全过程“无人跟机作业,有人安全巡视”的安全高效开采技术^[6]。这是信息化与工业化深度融合基础上煤炭开采技术的深刻变革,构建了煤矿创新发展、安全发展、可持续发展的全新技术体系,引领了世界煤炭技术发展的时代潮流,必将带来煤矿生产方式、组织方式、管理方式的深刻变革。该技术是实现生产过程工作面无人的主要技术手段,其关键在于采用远程操控技术控制采煤工艺的全过程,从而实现综采工作面生产这一随机动态过程的自动化操控。因此,笔者对智能化无人综采技术进行探索与创新,

以期为进一步提升煤矿智能化开采技术装备水平,引领行业智能化开采技术科学发展,实现煤炭行业在新时代下的升级转型做出贡献。

1 智能化无人综采技术的探索与实践

2014—2015年,黄陵矿业公司一号煤矿先后完成了较薄煤层与中厚煤层智能化无人开采技术研究与应用,目前已实现“一井两区两面智能化开采”的生产格局。2016—2017年,黄陵矿业公司二号煤矿开展了大采高(厚煤层)智能化综采技术研究,实现了智能化开采技术在厚煤层复杂地质条件下的常态化应用。2018年,黄陵矿业公司双龙煤层智能化无人开采推广项目和瑞能煤业公司薄煤层智能化开采与切顶卸压自动成巷无煤柱开采耦合技术应用研究项目也已全面启动,到2019年6月底,黄陵矿业公司所属4对矿井全部实现智能化开采,实现从薄煤层、中厚煤层到厚煤层的全覆盖。

1.1 中厚及较薄煤层智能化无人综采技术探索与实践

1.1.1 开采条件情况

黄陵矿业公司一号煤矿十盘区可采煤层为2号煤层,煤层厚度为1.1~2.8 m,平均厚度2.2 m,属较薄中厚煤层,煤层倾角 $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 。2号煤层直接顶板岩性变化较大,以黑色泥岩为主,局部为粉砂岩或细粒砂岩,呈厚层状,有时与煤层直接接触,中厚层状至薄层状,水平层理发育,易风化破碎,厚度0.7~20.6 m不等,一般9 m左右,抗压强度190~321 kg/cm²,抗拉强度10~24 kg/cm²,普氏系数 $f=4$,为较坚固-较松软岩石,中等稳定-不稳定的易冒落顶板,需及时维护。直接顶板以块状灰白色中细粒岩屑石英砂岩为主,俗称七里镇砂岩,为本区K2标志层,岩性较坚硬,厚层状,不易垮落,全区分布,层位稳定,厚度0.9~28.0 m,一般3.0~12.0 m。底板主要为一层厚度较薄的灰色团块状粉砂质泥岩,呈团块状结构,遇水膨胀,易发生底鼓,厚度0.4~5.0 m,具有波谷部位厚度较大,向两侧减薄的变化规律。首采1001工作面倾斜长度235 m,走向长度进风为2 271 m,回风2 291 m,开切眼长度235 m,采高1.1~2.3 m,工作面倾角属近水平煤层,煤普氏系数 $f=2.5\sim 3.0$,可采储量107万t,设计生产能力2 Mt。其中进风巷(运输巷)侧的煤层厚度极不平稳,有约500 m范围内的煤层厚度为1.1~1.6 m^[7]。

1.1.2 装备配套情况

黄陵矿业公司委托天地科技股份有限公司开采设计事业部进行整体智能开采技术方案设计,统一

了设备制造的技术标准和通信协议,解决了制约智能化集中控制的通信壁垒。控制系统选用SAM综合自动化控制系统、SAC电液控制系统和SAP集成供液控制系统。较薄煤层智能化装备配套明细见表1。

表1 较薄煤层智能化装备配套明细

Table 1 Detailed list of intelligent equipment for thinner coal seam

设备名称	设备型号	主要技术参数
液压支架	ZY6800/11.5/24D	工作阻力6 800 kN;中心距1.5 m;高度1.15~2.40 m
采煤机	MG2×200/925-AWD	截割功率2×2×200 kW;采高1.4~2.5 m;电压3 300 V
刮板输送机	SGZ800/2×525	功率2×525 kW;电压3 300 V;运输能力1 000 t/h
转载机	SZZ800/250	输送能力1 500 t/h;功率315 kW;电压3 300 V
破碎机	PCM200	破碎能力2 200 t/h;功率200 kW;排出粒径<300 mm;电压3 300 V
乳化液泵	BRW400/31.5 三泵两箱	工作压力31.5 MPa;额定流量400 L/min;电动机功率250 kW;电压1 140 V;液箱2个;容积3 000 L
喷雾泵	BPW400/16 两泵一箱	工作压力16 MPa,额定流量400 L/min;电动机功率125 kW;电压1 140 V;液箱1个;容积3 000 L
带式输送机	DSJ120/100/4×315	运量1 000 t/h;带宽1 200 mm;功率4×315 kW;电压1 140 V
超前支架	进风巷:ZQL2× 3200/18/35 回风巷:ZQL2× 5000/22/42	进风巷支护高度800/3 500 mm;回风巷支护高度890/3 490 mm;剁式交错迈步自移;驱动方式为电液控制;控制方式:远程控制、遥控控制、就地控制

1.1.3 关键技术

黄陵矿业公司智能化无人综采工作面生产过程以无人跟机作业为目标,主要技术难点在于需要采用远程遥控生产过程,这是集自动化、检测、视频、通信、控制、计算机等多种技术的综合应用。解决的主要关键技术难题如下:

1) 液压支架全工作面跟机自动化与远程人工干预技术。在液压支架电液控制系统实现全工作面跟机自动化的基础上,依据电液控制系统的数据与液压支架视频相结合,通过监控中心远程操作台对液压支架进行人工干预,以满足复杂环境下液压支架的自动化控制。

2) 采煤机全工作面记忆截割与远程人工干预

技术。在采煤机实现全工作面记忆截割的基础上,依据采煤机实时数据与煤壁视频相结合,通过监控中心远程操作台对采煤机进行人工干预,以满足复杂环境下采煤机的自动化控制。

3) 工作面视频监控技术。根据工作面实际情况,设计安装视频监控系统,实现在井下监控中心和地面指挥控制中心对整个综采工作面的视频监控。煤壁监控摄像机采集的视频实时上传至监控中心,提高了煤岩界面可视化程度。每3台支架安装1台煤壁摄像机,每6台支架安装1台支架摄像机,重点部位安装云台摄像机,实现工作面全方位监控。由红外线传感器获得采煤机位置,通过软件处理实现摄像机跟随采煤机无缝切换。机头安装云台摄像机,实现对重点部位的全方位监控。

4) 综采自动化集中控制技术。构建一套高效、便捷的集成控制系统,实现对综采工作面主要设备单机控制系统的有机整合(包括采煤机、液压支架、运输设备、供电设备、供液设备等),并通过合理的工艺编排,实现在井下巷道监控中心和地面指挥控制中心的集中控制和一键启停。

5) 智能化集成供液控制技术。对远程配液站、乳化液泵站、喷雾泵站等设备控制系统进行集成,形成统一调配运行的智能化集成供液控制系统,提高供液系统自动化水平及运行效率,降低系统损耗及能源消耗。

6) 超前支护自动控制技术。研发具有多个伸缩单元的交错迈步式电液控超前支架,在电液控制系统数据和视频监测的基础上,以“传感+视频+虚拟现实”为技术支撑的远程控制系统,实现对超前支架的远程监控和自动化控制。

1.2 厚煤层智能化综采技术探索与实践

1.2.1 开采条件概况

黄陵矿业公司二号煤矿416综采工作面开采煤层为2号煤层,属于侏罗系中统延安组,煤层厚度变化较稳定,煤层厚度5.1~7.0 m,平均煤厚6 m,煤层倾角 $0^{\circ}\sim 2^{\circ}$,煤层下部含1~2层夹矸,煤层普氏系数 $f=2\sim 3$ 。直接顶为深灰色~灰黑色细粒砂岩,岩石成分以石英、长石为主,岩层厚度1.12~6.19 m,厚度不稳定,与2号煤层呈冲刷接触,开采时随煤层一起脱层垮落。直接底在416工作面3号联络巷至停采线段为灰黑色泥岩,岩石团块状,易风化破碎,厚度0~2.96 m;在3号联络巷至4联络巷段,5联络巷至开切眼段为灰黑色炭质泥岩,薄层状,易风化破碎,厚度0~4.69 m;在4联络巷至5联络巷段为粉砂质泥岩,灰黑色,易碎,厚度0~3.9 m,岩石普氏系数 $f=4\sim 6$ 。416工作面位于井田四盘区东南部,工

作面为两进一回布置方式,巷道沿煤层顶板布置。该工作面走向长度2 632 m,开切眼长度300.5 m,预留保护煤柱300 m,可采长度2 332 m。工作面煤层近水平发育,平均厚度6 m,地质储量606.8万t,可采储量510.7万t。

黄陵矿业公司二号煤矿属于煤、油、气共生矿区,主采的2号煤层瓦斯含量较高,416工作面绝对瓦斯涌出量为 $10\sim 20\text{ m}^3/\text{min}$,相对瓦斯涌出量为 $1\sim 3\text{ m}^3/\text{t}$ 。同时,工作面煤层赋含油型气,该气体不同于煤层气,它是由腐泥型有机质在不同热演化阶段中形成的天然气;油型气也与煤层瓦斯不同,其储集层是煤层顶底板的砂岩层,赋存状态以游离态为主,揭露后快速逸散,油型气气体成分以甲烷为主,且含有重烃气,其中:甲烷平均79.81%,氮气平均16.31%,二氧化碳平均1.34%,乙烷平均0.95%,丙烷平均0.34%,丁烷平均0.14%,戊烷平均0.03%。根据416运输巷、辅助运输巷掘进过程中对底板油型气的探测情况,对416工作面底板油型气区域进行划分,按照一定区域内钻孔瓦斯浓度的大小及所占的比例,结合地质资料,划分为油型气富集高浓度区和低浓度区,低浓度富集区为416回风巷1 204 m至1 396 m,高浓度富集区为416回风巷1 396 m至开切眼。油型气异常涌出危险性较大,且具有突发性、隐蔽性(异常涌出前无明显征兆)和涌出量大等特点。工作面生产期间,顶、底板卸压导致围岩裂隙发育,在采动应力作用下油型气会随围岩裂隙进入工作面,造成工作面 and 回风流中瓦斯超限,严重影响到矿井安全生产,成为影响矿井智能化安全高效开采的主要致灾因素。根据地面补充勘查、井下取心勘查、测井资料再解译等勘查资料的整理分析统计,416综采工作面建立了矿区瓦斯油型气赋存地质靶模型,如图1所示。

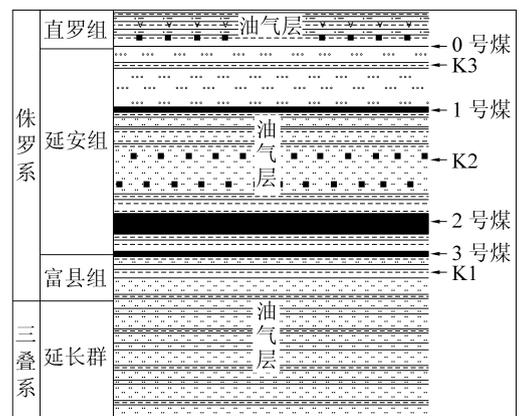


图1 416综采工作面煤层瓦斯油型气防治地质模型
Fig.1 Geological model of coal seam gas oil type gas control in No.416 fully-mechanized mining face

1.2.2 装备配套情况

针对黄陵矿业公司二号煤矿煤层的地质条件,在充分吸收一号煤矿成熟经验的基础上,针对二号煤矿大采高智能开采技术难点,设计厚煤层智能化设备配套明细见表2。控制系统选用SAM综合自动化控制系统、SAC电液控制系统、SAP集成供液控制系统、KTC101语音通信系统。

表2 厚煤层智能化装备配套明细

Table 2 Detailed list of intelligent equipment for thick coal seam

设备名称	设备型号	主要技术参数
液压支架	ZY10800/28/63D	工作阻力 10 800 kN; 中心距 1.75 m; 高度 2.8~6.3 m
采煤机	MG900/2210-GWD	截割功率 2×900 kW; 采高 3.8~6.0 m; 电压 3 300 V
刮板输送机	SGZ1200/2565	功率 3×855 kW; 电压 3 300 V; 运输能力 3 600 t/h;
转载机	SZZ1300/525	输送能力 4 000 t/h; 功率 525 kW; 电压 3 300 V
破碎机	PLM4500	破碎能力 4 500 t/h; 功率 375 kW; 排出粒度 < 300 mm; 电压 3 300 V
乳化液泵	BRW500/31.5 三泵两箱	工作压力 31.5 MPa, 额定流量 500 L/min; 电动机功率 315 kW, 电压 1 140 V, 液箱 2 个, 容积 7 000 L
喷雾泵	BPW500/10 四泵三箱	工作压力 10 MPa, 额定流量 500 L/min, 电动机功率 132 kW, 电压 1 140 V, 水箱 3 个, 容积 7 000 L
可伸缩带式输送机	DSJ160/350/ 2×560+1×560	运量 3 500 t/h; 带宽 1 600 mm; 功率 3×560 kW; 电压 10 kV
超前支架	ZQL2× 5000/21/40	支护高度 2 100/40 000 mm; 进风巷为门式交错迈步自移, 回风巷为垛式交错迈步自移; 驱动方式为电液控制; 控制方式为远程控制、遥控控制、就地控制

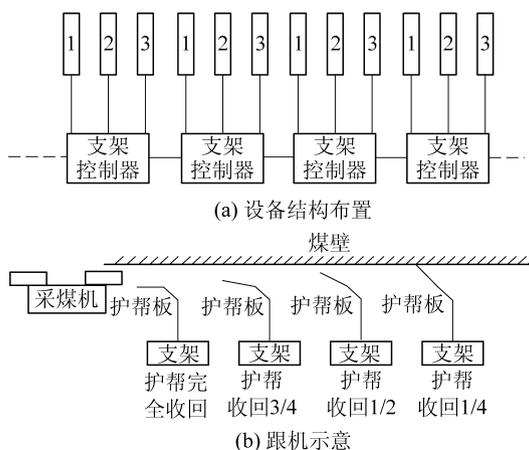
1.2.3 关键技术

黄陵矿业公司厚煤层智能化综采技术是在中厚煤层可视化远程干预型智能开采的模式基础上,重点研究厚煤层智能化综采普遍面临的煤壁片帮控制难、底软拉架难和视频效果差等问题,实施过程中通过装备、技术和工艺创新,有效解决了以上难题,其关键技术如下:

1) 大采高工作面防片帮智能控制技术。随着采煤机连续开采,基于煤壁的应力路径效应,将煤壁片帮细分为拉裂破坏与滑移失稳 2 个阶段,建立了“拉裂-滑移”力学模型,得到了采煤机附近煤壁的拉裂深度、宽度与煤体强度、开采高度的关系。针对煤壁片帮的机理,在煤壁发生片帮的 3 个不同阶段,

采用不同的控制手段进行控制。即当前方煤壁拉裂破坏时,采用液压支架初撑力监测,自动补压,减少顶板下沉量;当煤壁滑移失稳时,护帮板压力监测,保证护帮力和护帮面积,较少空帮时间;当煤壁片帮时,护帮板精准控制,采用全过程防护工艺^[8]。

针对工作面煤壁片帮区域进行提前预知(压力感知、视频监控等手段),利用液压支架压力传感器和行程传感器监测数据,结合采煤机精准位置分阶段调整采煤机滚筒附近液压支架护帮板收伸状态,并形成自动跟机的煤壁片帮条件下液压支架特殊工艺,跟机工艺如图 2 所示。



1—3 分别为护帮板接近传感器、压力传感器、行程传感器
图 2 基于煤壁片帮的液压支架自动跟机工艺示意

Fig.2 Schematic of hydraulic support automatic follow up process based on coal wall spalling

为了实现大采高工作面煤帮与液压支架护帮板的自适应控制,一般选择控制一级护帮板,二级护帮板通过双向联动液压锁实现自适应联动控制,从而保证割煤过程中煤壁能够得到及时支撑,实现防片帮控制。因此,如何实现液压支架护帮板精准控制就是如何实现一级护帮板的精准控制。

2) 大采高工作面底软智能控制技术。底板软弱条件下液压支架特殊工艺。针对工作面底板软弱区域进行提前预知(感知、视频等手段)^[9],通过液压支架多次降架模拟人工操作的方式,完成对工作面底板软弱条件下的智能化处理,并形成自动跟机的底板软弱条件下液压支架特殊工艺,工艺流程如图 3 所示。

形成大采高工作面底软智能控制技术。研究人工底软拉架流程,进行学习记忆,并在智能自适应系统中增加了支架跟机自动移架过程模拟人工操作动作序列,将支架整个自动降移升动作增加抬底、降架时间次数,在移架过程中设置多次停顿,同时抬底、降柱,解决架前堆煤的弊端,把人工手动移架序列程

序参数化,改进支架自动移架流程。该流程优化了支架抬底与移架动作配合时序,采用拟人手段有效地解决了大采高工作面自动移架后架前堆煤问题,达到了自适应控制效果。

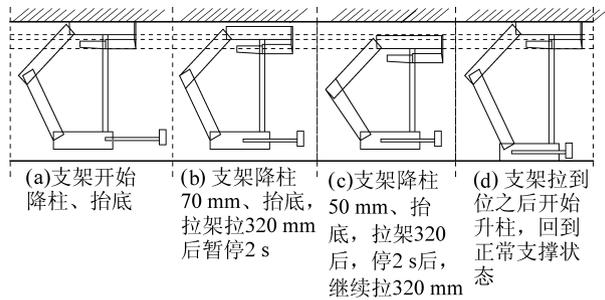


图3 底板软弱条件下液压支架特殊工艺

Fig.3 Special technology of hydraulic support under weak floor condition

3)大采高工作面高清晰视频监控技术。设计高性能视频监控系统。针对大采高智能化综采工作面采高大、断面宽、煤尘大等特点,在视频系统设计时,放弃以往使用的普通摄像仪,选用最新广角、自动旋转的高性能云台摄像仪,提高视频监视范围20%;优化视频监控主机软硬件配置,确保了视频监控的实时性。

研究应用高效降尘技术。研发了高压降尘装置,将常压水转换为0~17 MPa(可调)的高压水,高压水由安装在电缆夹内的高压胶管输送给采煤机摇臂上的高压喷雾模块,经特殊的旋流雾化喷嘴处理,形成添加了抑尘剂、雾粒直径为30~150 μm 、强抗风能力、射程远的水雾,有效覆盖在滚筒产尘区域;同时,传输管路采用 $\phi 25\text{ mm} \rightarrow \phi 19\text{ mm} \rightarrow \phi 16\text{ mm}$ 的不断变径处理,确保喷雾末端的压力始终达到12 MPa以上。生产过程中,采煤机内喷雾由安装在截割滚筒上的喷嘴直接向截齿的切割点喷射,形成湿式截割;摇臂上强力外喷雾形成水雾覆盖尘源,实现粉尘湿润沉降。通过应用一系列降尘技术,416工作面生产期间总尘和呼吸性粉尘降尘效率分别达到93%和96%,大幅提高了可视化监控效果,工作面降尘系统配置如图4所示。

4)大采高工作面环境安全保障技术。研发了基于瓦斯超前预测的采煤机多级联动控制技术,建立瓦斯浓度与采煤机牵引速度之间的非线性耦合关系,当瓦斯浓度波动异常时可提前对未来危险进行预测,调整采煤机牵引速度;将瓦斯报警设定为多个预警级别,根据瓦斯浓度进行不同级别的预警,监测区域瓦斯浓度得到超前联动控制,避免瓦斯浓度进

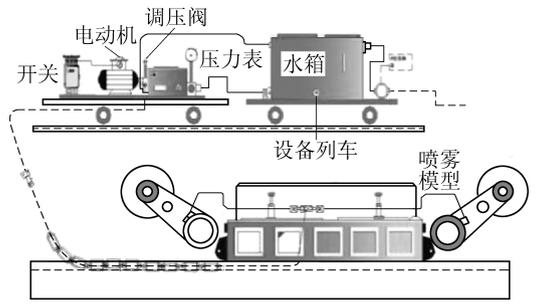


图4 416工作面降尘系统配置

Fig.4 Dust distribution system for No.416 working face

一步升高。开发了惰化阻化泡沫防灭火技术与装备,通过惰气发泡装置对渗油区域及工作面上下隅角喷洒泡沫,全方位覆盖隐患点,彻底杜绝了油气火灾事故的发生^[10]。

1.3 薄煤层智能化无人综采与切顶卸压自动成巷无煤柱开采耦合技术探索

1.3.1 切顶卸压自动成巷无煤柱开采技术应用情况

黄陵矿业公司瑞能煤业井田面积15.48 km^2 ,设计生产能力60万 t/a 。井田开拓方式为斜井开拓,盘区式开采。矿井地质构造简单,井田内可采煤层为2号煤层,煤层赋存较薄,平均厚度1.64 m。为了减少资源浪费,延长矿井寿命,黄陵矿业公司联合多家科研单位在瑞能煤业公司开展切顶卸压自动成巷无煤柱开采新技术研究^[11]。试验117工作面位于121盘区西北部,可采长度1 005 m,工作面长151 m,煤层厚度0.8~2.2 m,煤层倾角 $2^\circ \sim 5^\circ$ 。该项目自2017年6月22日正式实施,2018年1月31日顺利通过专家验收,一致认为117工作面留巷切缝侧顶板垮落充分,采空区充填密实,对巷道扰动较小,施工质量合格,符合设计要求,达到了预期目标;2018年2月28日留巷结束,成功留巷1 005 m。实施切顶卸压自动成巷无煤柱开采技术(切顶卸压自动成巷无煤柱开采),能够有效削弱回采巷道围岩应力集中,消除回采巷道冲击地压、瓦斯超限等安全隐患问题;大幅降低了工作面回采巷道的掘进率,节约了巷道掘进成本;解放了工作面间的护巷煤柱,大幅提高了采煤工作面资源采出率;同时减轻了地表不均匀沉降引起的地表环境资源损害等灾害问题。通过应用切顶卸压自动成巷无煤柱开采切顶卸压自动成巷无煤柱开采技术以后,工作面资源回收率由原来的84%提高到现在的95%,减少巷道掘进率50%,对延长矿井服务年限、降低煤炭开采成本等具有重大意义。117工作面采用切顶卸压自动成巷无煤柱开采技术后节约掘巷成本674.5万元,回采煤

柱产生效益 545.74 万元,累计产生经济效益约 1 220.24 万元。切顶卸压自动成巷效果如图 5 所示。



(a) 承载区单体支柱支护



(b) 稳定区单体支柱开始回撤

图 5 切顶卸压自动成巷效果

Fig.5 Effect diagram of automatic roadway formation by roof cutting and pressure relief

1.3.2 薄煤层智能化无人综采与切顶卸压自动成巷无煤柱开采耦合技术探索

目前现有智能化无人综采技术都是在传统长壁开采工艺行尝试,采用切顶卸压自动成巷无煤柱开采后,其工作面布置、支护方式等方面将会有较大变化,必须有针对性地解决该条件下影响智能化无人综采技术实施的关键难题,才能实现薄煤层智能化无人综采技术与切顶卸压自动成巷无煤柱开采的耦合应用,最终达到安全、高效生产。2017 年,黄陵矿业公司联合多家单位在瑞能煤业公司开展了薄煤层智能化无人综采与切顶卸压自动成巷无煤柱开采耦合技术研究,目前已完成技术实施方案设计工作,正在进行设备采购与改造。

1) 技术难点分析。薄煤层综采工作面因过煤空间局限、煤机机面高度低、通风端面积小等原因,生产过程中易出现大块煤堆积卡堵、煤尘大、人员跟机速度慢、工作面直线度调整难及劳动强度大等问题,影响工作面连续推进。

采用切顶卸压自动成巷无煤柱开采后,留巷段将会增加大量的临时支护装置及设施,进一步加大智能化无人综采技术实施难度。受薄煤层切顶卸压自动成巷无煤柱开采支护方式及端面空间的影响,为了确保工作面刮板输送机、转载机和带式输送机能够灵活安设,一般刮板输送机与转载机搭接采用端卸的方式,但该种联接方式在工作面设备上窜下滑时,无法控制刮板输送机与转载机之间的相对位

置,只能进行人工调整,影响了工作面连续推进。

2) 解决方法。针对薄煤层工作面生产时易出现大块煤堆积卡堵、煤尘大、人员跟机速度慢及劳动强度大等问题,首先以工作面常态化无人作业为目标来制定薄煤层智能化无人综采技术路线,通过采用新技术,来不断解决系统自主控制能力差的问题;其次,制定科学的采煤工艺,尽可能降低大块煤现场处理难度,减少煤尘对视频系统的影响,提高远程干预控制的精准性、实时性。

薄煤层智能化无人综采技术路线。充分汲取一号煤矿中厚煤层智能化综采技术应用的经验,通过引进、消化、吸收薄煤层工作面惯导自动找直、透明地质等先进技术^[12],制定以 LASC 惯性导航技术和透明地质技术为关键技术的智能化无人综采技术方案,有针对性地解决薄煤层粉尘影响连续作业和装备自适应的难题,形成“以工作面智能运行为主,地质信息干预为辅”的智能控制模式;探索薄煤层工作面智能常态化无人生产模式,实现工作面无人操作和巡视,监控中心 2 人远程干预,最终达到安全、智能、高效和连续开采。薄煤层智能开采技术原理如图 6 所示。

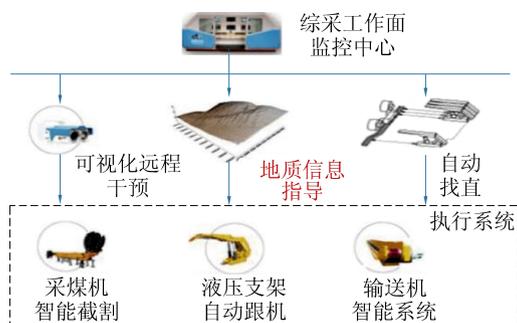


图 6 薄煤层智能开采技术原理示意

Fig.6 Schematic of intelligent mining technology for thin coal seam

薄煤层智能化无人综采工作面采煤工艺。针对薄煤层工作面生产时易出现大块煤堆积卡堵、煤尘大的问题,首先决定采用单向割煤的采煤工艺。该工艺尽管无法解决割煤过程中煤块大小的问题,但由于顺着煤流方向前进,可以有效解决大块煤卡堵影响的现象;同时,由于单向割煤前滚筒始终逆风而行,即负责割煤的前滚筒始终处于煤尘相对较少的位置,保障了视频监视画面质量,现场应用效果如图 7 所示。但单向采煤工艺与双向采煤工艺相比,单向割煤工艺增加了一刀返空刀的作业流程,少了一道斜切进刀割三角煤的流程。通过对瑞能煤业生产用时计算和对比,得出单向割煤工艺比双向割煤工艺每刀煤慢 5.89 min,不会影响整个工作面生产

效率。



(a) 前滚筒下行顺风 (b) 前滚筒下行逆风

图7 前滚筒顺风和逆风现场监视界面对比

Fig.7 Scene comparison of front cylinder downwind and adverse wind scene

针对切顶卸压自动成巷无煤柱开采综采工作面留巷段超前支护自动控制难题,研究开发切顶卸压自动成巷无煤柱开采工作面挡矸支护工艺及智能化挡矸支护装备,建立挡矸支护装备三维受力智能感知系统,应用电液控制技术和智能控制技术,实现智能挡矸支架在有效支撑留巷段顶板的同时,能够随同工作面装备协同推进。

针对切顶卸压自动成巷无煤柱开采工作面生产时端头控制难的问题,可以尝试在刮板输送机机头机尾驱动部装设红外线测距仪和调整油缸,通过红外线测距仪实时监测刮板输送机与副帮煤壁间的距离,然后通过伸出调整油缸,来调整工作面上窜下滑量,为智能化综采工作面连续推进提供保障^[13]。

2 煤矿智能化无人开采支撑体系建设

2.1 科技创新体系建设

黄陵矿业公司建立了以企业为主体、以市场为导向、产学研相结合的自主创新体系,成立了黄陵矿业公司技术中心,组建了绿色安全高效开采中心、煤矿智能化开采技术创新中心和陕西省博士后创新基地,配备了9个研究所和6个实验室,选拔了9个专业的首席专家,成立了首席技师工作室,畅通了人才成长成才通道,积极组织开展科技项目攻关,为矿区科学发展提供了强大的动力。

2.2 信息化标准体系建设

黄陵矿业公司在信息化建设方面,按照“统筹规划、资源共享、协同创新、全员参与、绿色发展”的方针,以实现“智慧黄矿”为目标愿景,坚持“统一规划、统一标准、统一设备、统一开发与应用”的原则,按照“总体规划、分步实施、突出重点、持续发展”的实施计划,有序推进数字化矿山建设。2004年以来,先后建设应用了多项管理信息化应用系统,建立了黄陵矿业集团管理信息系统集成应用平台,完成了工业自动化系统建设与整合改造,建成了具有高

度信息化、数字化特征的综合自动化系统,全面实现了多个生产过程综合自动化系统的整合联网运行,保证了安全生产,提高了生产效率。

2.3 安全保障技术体系建设

安全生产是智能化综采技术应用的前提。黄陵矿业公司针对矿井水、火、瓦斯、煤尘、顶板等诸多灾害研发以下关键技术:①研发应用矿井通风三维实时跟踪分析与动态诊断预警系统,实现了对通风系统潜在薄弱环节的跟进式诊断,保障矿井通风安全;②研发应用瓦斯监测数据实时在线分析与预警系统,集成区域预抽、本煤层预抽、高位裂隙抽采和上隅角埋管抽采的立体综合治理技术,实现瓦斯“零超限”;③通过采用高效抑尘剂风水联动喷雾、应用“长压短抽”通风方式除尘通风机、安装防尘网等措施,实现了高效除尘的目的;④建设了煤矿自燃发火光纤综合在线监测系统,实施了“提高回采率控制遗煤量、阻化剂防灭火、以注凝胶为主的应急灭火”等措施,形成了矿井防灭火技术体系;⑤通过应用超前支架、顶板离层监测系统、优化巷道支护参数、调整巷道支护顺序,提高巷道支护强度,实现顶板灾害防治;⑥实施地质补充勘探及二、三维地震勘探、开展矿井隐蔽致灾因素探查,实现了水害超前治理。

2.4 企业精细化管理体系建设

黄陵矿业公司以精细化管理六要素和岗位管理七体系为抓手,认真落实精细化管理;通过推行生产组织标准化、机电设备与生产技术质量标准化,扎实开展标准化管理;通过“机环双检”和“双险双控”排查工作面隐患,夯实安全管理基础;强化员工理论和现场培训,创新员工培养方式,提升员工综合素质;在实践中总结提炼出智能化无人综采工作面精优作业法、卓越管理法、职工创新成果,实现了“人、机、管、环”的有机统一,有力地促进了智能化无人综采技术在现场的工程实践。

2.5 员工素质提升工程体系建设

在员工素质提升方面,一是创新人才培养机制,加大培训投资力度,鼓励员工自主学习,本着专业对口、学以致用原则,鼓励员工自觉参加各类专业和继续教育;二是大胆探索人事制度改革,坚持专业技术人员评聘分开、一年一考核、一年一聘任制度,实施首席员工聘任和五星员工评选的动态机制,开展技师、首席技师聘任制度,为各类人才脱颖而出铺设道路;三是以“3个平台”即绿色安全高效开采工程中心黄陵中心、煤矿智能化开采技术创新中心、博士后创新基地为依托,适时开展技术攻关和对外技术服务工作,重点攻克制约企业安全生产和发展的技

术难题,全面落实项目带动战略,鼓励各类科技人才积极参加黄陵矿业公司的科研项目,通过参与项目的研究,学习各方面专业知识,促进各类科技人才的快速成长,为黄陵矿业公司培养高素质复合型科技人才;四是创新技能培训,培养智能化人才,通过强化安装前的基础培训、选派优秀职工赴厂家学习、安装调试过程中的现场实操培训和组织技术比赛等方式,全面提升操作职工的技术水平。

3 智能化无人综采技术发展趋势分析

目前全国已经建成70多个智能化采煤工作面,但实现智能化无人综采技术常态化应用的矿井并不多。其根本原因是目前智能化开采技术尚处于起步阶段,在技术、工艺、管理上还存在许多未解的难题,制约了智能化无人开采技术的发展和运用。因此,未来必须加强技术的创新性和适应性、装备的可靠性和适应性等方面攻关研究,不断推动煤炭智能化无人开采技术向智能开采高级阶段迈进。

3.1 提高整体技术创新性和适应性

2016年袁亮^[14]提出智能精准开采,主要通过掘进时提前勘探综采工作面煤层及地质变化信息,开采前将详细的工作面地理信息录入智能控制系统内,开采时智能控制系统根据工作面地理信息自动控制采煤机、液压支架及刮板输送机运行,最终实现综采工作面智能精准开采。但目前采煤机精准控制、液压支架精准控制、刮板输送机智能控制、系统自诊断等关键技术亟需持续创新,透明地质勘探、高精度三维地理模型构建、智能导航等新技术亟待科研突破。

黄陵矿业公司在较薄煤层及中厚煤层智能化无人综采技术研究过程中,针对该煤层条件普遍面临的三角煤智能割煤难度大、采煤工序不能满足智能化开采需要、两端头清煤不彻底、煤机电缆折返过程中易出现脱槽等关键难题进行技术攻关,取得突破性进展,实现了地面远程操控采煤常态化;在大采高煤层智能开采技术实践中,针对大采高工作面普遍面临的片帮严重、底板软弱、护帮板精准控制难及开采区域煤尘大等关键难题进行技术攻关,突破了各项技术制约,实现了智能开采;兖矿集团转龙湾煤矿针对生产过程中工作面直线度控制难的问题进行LASC技术攻关,阳煤集团新元公司则针对井下瓦斯浓度高的问题进行煤机速度与瓦斯联动控制技术攻关^[16]。通过制定有针对性的技术解决方案,逐步化解制约智能化综采技术实践的难题,实现了智能化综采技术的实践应用。

综上,虽然智能化无人综采技术尚处于初级阶段,但普遍适应性是显而易见的。各煤炭企业需要在智能化无人综采技术理论的基础上结合自身特点进行针对性的技术攻关和创新,以期达到常态化稳定运行的目标。

3.2 提高装备的可靠性和适应性

智能化综采控制系统和高精度传感器的稳定可靠运行是智能化无人综采技术能否常态化应用的关键。智能化综采控制系统是多个系统的耦合,各系统内大量运行数据交互使用率高,一个潜在的不确定因素即可导致智能控制系统决策进程执行不到位,因此必须不断采用新技术、新算法,以逐步提高系统的动态响应能力和可靠性。在高精度传感器应用方面,目前在用的传感器虽然能够实现对生产过程中相关数据的监测和采集,但在使用精度、传输速度、数据采集量、抗干扰能力、抗震、防水、透尘及稳定性方面仍存在较多问题,很难达到长时间、全过程、高效率地精准监测和控制,不同程度地影响了智能化开采技术实际应用效果。譬如,目前开发应用的智能化综采控制系统偶尔会出现通信状态不稳、控制命令发送丢失、视频卡顿及瞬间黑屏等现象,配套使用的高精度传感器时常会出现采煤机高采数据监测不稳、液压支架立柱压力及推移行程不准等现象,这些问题直接影响智能化综采设备智能运行和远程干预控制的精准性。因此,必须加大系统可靠性研发力度,提高智能化系统可靠性,不断推动智能化开采技术进步。

目前我国煤机装备在材质、制造工艺等方面相对进口设备还存在较大差距,机械可靠性相对较差,且智能感知、自主决策等智能化水平相对较低,无法在采煤过程中根据智能化综采工作面地质变化情况完成装备自适应调整。尤其是采煤机还无法像人类一样进行煤岩界面精准辨认,自动调整滚筒高度;液压支架也不能在生产过程中实时自主调整刮板输送机、液压支架的直线度。因此,未来亟需开展综采装备的智能探测、智能分析和智能控制技术研究^[15-16],不断提升设备的智能感知、自主适应和智能控制的能力,从而实现综采工作面生产这一随机动态过程的智能自适应控制。

4 结 论

1)总结了黄陵矿业公司智能化无人综采技术探索与实践过程,剖析了智能化无人开采技术在薄煤层、中厚煤层和厚煤层等不同煤层地质条件下的研究重点和关键技术,并结合当前国内外智能化无人开采

技术应用现状进行技术发展趋势分析和展望。

2) 提出中厚及较薄煤层智能化无人综采的关键技术是液压支架全工作面跟机自动化与远程人工干预技术、采煤机全工作面记忆截割与远程人工干预技术、综采自动化集中控制技术、工作面视频监控技术、智能化集成供液控制技术和超前支护自动控制技术等。

3) 提出厚煤层智能化无人综采的关键技术是大采高工作面防片帮智能控制技术、大采高工作面底软智能控制技术、大采高工作面高清晰视频监控技术和大采高工作面环境安全保障技术等。

4) 提出煤矿智能化无人开采支撑体系建设分为科技创新、信息化标准、安全保障技术、企业精细化管理和员工素质提升工程五大体系。

5) 提出提高整体技术创新性与适应性和提高装备的可靠性与适应性方面的攻关研究,是不断推动煤炭智能化无人开采技术向智能开采高级阶段迈进的途径。

参考文献 (References) :

- [1] 范京道.智能化无人综采技术[M].北京:煤炭工业出版社,2017:1-18.
- [2] 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 Lengting, 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.
- [3] 王金华,黄曾华.我国煤矿智能化采煤技术的最新发展[J].矿业工程,2017,3(4):24-35.
WANG Jinhua, HUANG Zenghua. The latest development of intelligent coal mining technology in China's coal mines [J]. Mining Engineering, 2017, 3(4):24-35.
- [4] 佚名.《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》发布[J].中国煤炭,2016,42(5):141.
ANON. "Revolution Energy Technology Innovation Action PLAN (2016-2030)" released [J]. China coal, 2016, 42(5):141.
- [5] 佚名.国家重点研发计划“公共安全风险防控与应急技术装备”重点专项2017年度项目申报指南发布[J].中国安全生产科学技术,2016,12(11):81.
ANON. Guidelines for the application of the national key R&D program "public safety risk prevention and control and emergency technical equipment" in 2017 were issued [J]. China Safety Production Science and Technology, 2016, 12(11):81.
- [6] 范京道.煤矿智能化开采技术创新与发展[J].煤炭科学技术,2017,45(9):65-71.
FAN Jingdao. Coal mine intelligent mining technology innovation and development [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9):65-71.
- [7] 徐建军.薄-中厚煤层综采面自动化开采技术研究与实践[J].煤炭科学技术,2014,42(9):35-39.
- [8] 王国法,李占平,张金虎.互联网+大采高工作面智能化升级关键技术[J].煤炭科学技术,2016,44(7):15-21.
WANG Guofa, LI Zhanping, ZHANG Jinhua. Key technologies for intelligent upgrading of Internet+ large mining height working face [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7):15-21.
- [9] 伍永平,郭峰.大倾角大采高工作面底板破坏滑移特征分析[J].煤炭技术,2014,33(9):160-162.
WU Yongping, GUO Feng. Analysis of failure and slip characteristics of floor in large dip angle and high mining height face [J]. Coal Technology, 2014, 33(9):160-162.
- [10] 李贵红.鄂尔多斯盆地黄陵地区侏罗系煤层气来源判识[J].煤炭学报,2018,43(4):1052-1057.
LI Guihong. Jurassic CBM source identification in Huangling Area of Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4):1052-1057.
- [11] 何满潮,宋振骥,王安,等.长壁开采切顶短壁梁理论及其切顶卸压自动成巷无煤柱开采:第三次矿业科学技术变革[J].煤炭科技,2017(1):1-9,13.
HE Manchao, SONG Zhenqiu, WANG An, et al. Theory of cutting roof short wall beam in long wall mining and its 110 construction methods: the third reform of mining science and technology [J]. Coal Science and Technology, 2017(1):1-9,13.
- [12] 毛善君.“高科技煤矿”信息化建设的战略思考及关键技术[J].煤炭学报,2014,39(8):1572-1583.
MAO Shanjun. Strategic thinking and key technologies for informatization construction of "high-tech coal mine" [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8):1572-1583.
- [13] 张科学,李首滨,何满潮,等.智能化无人开采系列关键技术之一:综采智能化工作面调斜控制技术研究[J].煤炭科学技术,2018,46(1):139-149.
ZHANG Kexue, LI Shoubin, HE Manchao, et al. Study on key technologies of intelligent unmanned coalmining series I: study on diagonal adjustment control technology of intelligent fully-mechanized coal mining face [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1):139-149.
- [14] 袁亮.面向煤炭精准开采的物联网架构及关键技术[J].工矿自动化,2017,43(10):1-7.
YUAN Liang. The framework and key technologies of the Internet of things for precise coal mining [J]. Industrial Automation, 2017, 43(10):1-7.
- [15] ANON.国务院发布《新一代人工智能发展规划》[J].中国标准化,2017(15):28.
ANON. The State Council issued the "new generation of artificial intelligence development plan" [J]. China standardization, 2017(15):28.
- [16] 王国法.煤矿综采自动化成套技术与装备创新和发展[J].煤炭科学技术,2013,41(11):1-5,9.
WANG Guofa. Innovation and development of complete automation technology and equipment for fully mechanized mining in coal mines [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(11):1-5,9.