

煤矿井下数字化钻进技术发展现状与趋势

张建明¹, 曹 明², 陈晓明³

(1. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077;
3. 杭州祥龙钻探设备科技股份有限公司, 浙江 杭州 311504)

摘 要:在分析现有煤矿井下钻进工艺装备的基础上,从随钻测量、状态监测和钻机控制 3 个方面综述了井下数字化钻进关键技术的国内研究现状。探讨了煤矿井下数字化钻进技术的发展方向,提出了精确导向钻进、钻机自动控制、远程故障诊断、钻场智能管理等未来研究的重点,以及相应的实现方法与关键技术。最后指出,我国煤矿井下钻进技术与装备发展方向。

关键词:数字化钻进;随钻测量;状态监测;钻机控制;智能钻探

中图分类号:TD67 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2017)05-0047-05

Development status and tendency on digitalized drilling technology in underground coal mine

Zhang Jianming¹, Cao Ming², Chen Xiaoming³

(1. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710077, China; 3. Hangzhou Xianglong Drilling Equipment Company Limited, Hangzhou 311504, China)

Abstract: Based on the analysis on the drilling technique and equipment in the available underground mines, from the measurement while drilling, status monitoring and measuring and the drilling rig control, the paper stated the domestic study status on the key technology of the digitalized drilling in the underground mine. The paper discussed the development tendency of the digitalized drilling technology in the underground coal mine and provided the accurate guide drilling, the automatic control of the drilling rig, remote fault diagnosis, intelligent management of the drilling site and other future study key point as well as the relevant realized method and key technology. Meanwhile, the paper pointed out that development direction of drilling technology and equipment in China underground coal mine.

Key words: digitalized drilling; measuring while drilling; status monitoring; drilling rig control; intelligent drilling exploration

0 引 言

煤炭是我国的主体能源和重要工业原料,我国 85% 以上的煤炭资源来自于井工开采。煤炭资源的大规模开采和不合理利用造成了严重的生态破坏、环境污染和资源浪费,因此煤炭安全绿色开采和清洁高效利用成为煤炭技术发展的主要方向。伴随着开采深度的不断加大和松软突出煤层等难采资源的逐步开采,煤矿井下的开采条件更加复杂,作业环境更加恶劣,安全威胁更加严重,无人或少人化作业成

为未来解决煤矿安全问题的关键。

瓦斯灾害和水害是威胁煤矿安全的 2 大主要动力灾害。近年来,我国在瓦斯灾害和水害防治方面均取得了重大进展^[1-2]。煤层钻孔是煤矿井下抽采瓦斯和探放水的主要技术途径,高效可靠的钻进技术与装备是其重要保障。为了提高钻进成孔率,我国专家学者对煤层钻进成孔理论与技术进行了深入研究^[3-7]。当前,煤矿井下定向钻进技术日趋成熟,随钻测量技术正从定向钻进向常规回转钻进拓展应用,远程控制钻机成功试验,钻进技术与装备整体向

收稿日期:2017-02-01;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.05.008

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275061)

作者简介:张建明(1973—),男,山西文水人,教授级高级工程师,博士。E-mail:515478289@qq.com

引用格式:张建明,曹 明,陈晓明. 煤矿井下数字化钻进技术发展现状与趋势[J]. 煤炭科学技术,2017,45(5):47-51,70.

Zhang Jianming, Cao Ming, Chen Xiaoming. Development status and tendency on digitalized drilling technology in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 47-51, 70.

数字化和自动化的方向发展。

1 现有井下钻进工艺装备

煤矿井下已经发展出常规回转钻进、稳定组合钻具定向钻进、随钻测量定向钻进等多种钻探成孔工艺。定向钻进是一种采用专用工具使水平钻孔轨迹按设计要求延伸至预定目标的钻探工艺方法。与常规回转钻进工艺相比,定向钻进靶向性好、瓦斯抽采效率高,能够施工水平分支孔和梳状孔,但更适合中硬煤层,成本和对工人的技术要求也较高。目前,煤矿井下常用的钻进工艺是常规回转钻进和随钻测量定向钻进2种。

1)常规回转钻进。常规回转钻进主要依靠钻机动力头驱动钻杆柱回转,进而带动前段钻头切削煤层来实现钻进成孔。常规回转钻进以正循环为主,通常以清水或空气为循环介质。清水介质可携带煤粉和冷却钻头,确保钻进过程中排渣通畅。空气循环介质经压缩后通过钻杆到达孔底,在孔内形成高速风流,将岩屑悬浮在风流中吹向孔口,达到排渣和冷却钻头的目的。

在松软煤层中施工钻孔时,通常采用螺旋钻进。螺旋钻进采用常规钻机和螺旋钻杆组合施工,钻头切削下来的煤粉通过螺旋的传动排到孔外,既可避免水力循环钻进中水力冲刷对孔壁稳定性的破坏,又可避免空气循环钻进中的粉尘污染。

目前,常规回转钻进装备已形成以全液压动力头式钻机为主、立轴式钻机为辅的格局。为满足不同施工条件的需求,全液压动力头式钻机已发展出传统分体式、履带整体式、履带分体式、轮式等型式的系列化产品,立轴式钻机也逐步采用履带型式,如图1所示。

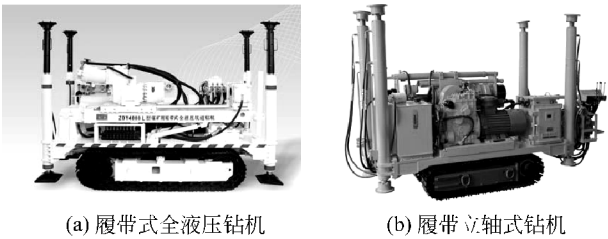


图1 常规回转钻进钻机
Fig.1 Conventional rotary drilling rig

2)随钻测量定向钻进。目前,煤矿井下定向钻进主要采用孔底马达钻进方式。孔底马达是一种能够将液体压力能转换为机械能的动力装置,主要由转子和定子组成。定向钻进施工时,钻杆柱并不回

转,而是由安装在钻杆柱前端的孔底马达来驱动钻头回转。工作过程中,水泵输出的高压冲洗液驱动转子绕定子轴线做行星运动,转子和定子形成的密封腔在马达的进出口处形成一定压差,从而将转速和转矩传递给钻头,实现煤层切削钻进。

随钻测量定向钻进成套装备由定向钻机、孔底马达、随钻测量装置、孔口计算机、钻杆等组成,如图2所示。定向钻进工艺能够在中硬煤层中施工长距离钻孔,长寿命的孔底马达和可靠的随钻测量技术是定向钻进成功应用的前提。

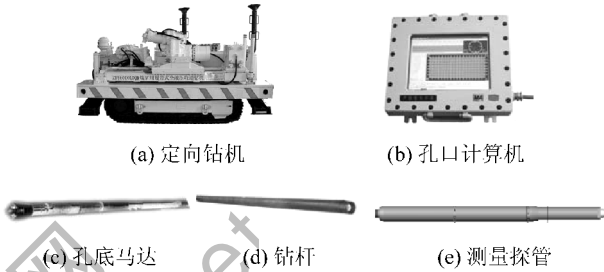


图2 随钻测量定向钻进成套装备示意
Fig.2 Directional drilling equipment with MWD

2 数字化钻进关键技术研究现状

数字化钻进是以钻机状态的检测和控制信息的数字化为核心,通过中控计算机将钻进设备、测量工具、数据采集设备、现场监控设备等不同模块联结成一个标准化的系统,通过软件工具实现钻进作业的数据采集、数据传输及工况监测等工作,进而在钻进过程中所建立的数字空间中完成钻孔作业。数字化是实现自动化和智能化钻进的基础,其目标是能够通过网络实现信息共享,并在地面中央控制室完全控制钻机工作。数字化钻进的核心是实现钻孔轨迹数字化、钻机状态数字化和钻机工作的自动化,其关键技术是随钻测量、状态监测和钻机控制技术。

2.1 随钻测量技术

随钻测量技术是指在钻进的同时实现各种参数连续实时测量的技术,这些参数主要包括轨迹描述(倾斜、方位)、工具方向(工具面)、地层特性(电阻率、自然伽马、孔隙度等)以及其他状态(压力、转矩、温度等)^[8]。煤矿井下随钻测量主要应用于煤系地层中,钻孔口径小,煤层电阻率低、易破碎,且含有甲烷等爆炸危险性气体。因此,随钻测量仪器不仅要求孔内尺寸小,测量时间长,而且必须满足井下防爆要求^[9]。

当前,随钻测量技术已在煤矿井下定向钻进施工中成功应用,常规回转钻进随钻测量技术也完成了工业性试验。国产随钻测斜系统的钻孔倾角测量范围为 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$,精度 $\pm 0.2^{\circ}$;方位角测量范围为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$,精度 $\pm 1.5^{\circ}$,工具面向角测量范围为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$,精度 $\pm 1.5^{\circ}$ 。井下随钻测量系统包括测量单元、数据传输单元和孔口显示单元。测量单元包括测量探管和防爆电池筒。通常采用重力加速度传感器和磁通门传感器来测量钻孔倾角和方位角,结合孔深计算钻孔轨迹。防爆电池筒采用镍氢电池,用于给测量探管供电。

按照数据传输方式的区别,井下随钻测量已发展出有线随钻测量、泥浆脉冲无线随钻测量和电磁波无线随钻测量3种技术。相比有线随钻测量,无线随钻测量技术无需借助专用的中心通缆钻杆和送水器,可直接使用常规钻杆,不仅传输距离远,而且钻杆成本低,避免了通缆联接的可靠性差问题。目前,有线随钻测量技术和泥浆脉冲无线随钻测量技术已成熟应用,电磁波无线随钻测量技术其可靠性尚需进一步完善。

1) 有线随钻测量。有线随钻测量中,专用的中心通缆式钻杆和通缆式送水器组成数据输送通道,

将测量探管测得的数据发送至孔口设备,由设备内的测量软件进行数据处理,显示测量轨迹,完成一个随钻测量过程。有线随钻测量可采用孔内仪器供电和孔口计算机供电2种方式。前者测量探管连接防爆电池筒,利用通缆式钻杆的内芯作为信号正极、外壳作为信号负极,采用电流环或载频方式传输数据;后者无需防爆电池筒,利用通缆式钻杆的内芯作为信号正极和供电正极,外壳作为信号负极和供电负极,采用载伏方式传输数据。孔口计算机供电与孔内仪器供电方式相比,可以减小孔底测量单元长度,具有长时连续供电不间断工作、抗干扰性强等优点。

有线随钻测量技术已在国内煤矿井下定向钻进施工中推广应用,成功用于本煤层瓦斯抽采钻孔、煤层顶板定向长钻孔、煤层底板加固注浆钻孔及探放水钻孔中。2014年,中煤科工集团西安研究院在山西晋煤集团寺河矿成功施工主孔孔深1 881 m的水平定向孔,创造了孔深世界纪录。目前,中煤科工集团西安研究院已经研制成功YHD1-1000、YHD1-1000(A)、YHD2-1000和YHD2-1000(A)四个系列型号的有线随钻测量系统,4种随钻测量系统的测量范围和精度相同,系统比较见表1。

表1 4种有线随钻测量系统比较

Table 1 Comparison of four wired MWD system						
型号	测量探管	信号中继	供电方式	孔口设备类型	交互模式	矿用U盘
YHD1-1000	尺寸大	无	电池筒	便携式监视器	触摸式	无
YHD1-1000(A)	尺寸大	无	电池筒	矿用计算机	键盘	无
YHD2-1000	尺寸小	有	电池筒	矿用计算机	键盘	有
YHD2-1000(A)	尺寸小	无	孔口计算机	矿用计算机	键盘	有

2) 泥浆脉冲无线随钻测量。泥浆脉冲无线随钻测量技术以钻杆内的水力通道为数据传送通道,循环水为通信介质。泥浆脉冲数据传输包括正脉冲、负脉冲和连续脉冲3种传输形式,考虑到煤矿井下工况条件、配套钻具和工艺方法等方面的区别,矿用产品中仅采用正脉冲传输数据的泥浆脉冲随钻测量系统^[10]。泥浆脉冲数据传输的基本原理如下:在开泵状态下,孔内仪器按照预先设置的编码方式有序地改变钻杆内的流道面积,流道面积的改变引起流阻的变化,从而改变孔口泥浆泵出口泵压的变化,采集泥浆泵出口泵压,将压力变化曲线进行解调,从而还原成钻孔轨迹测量数据。

中国煤炭科工集团西安研究院已经研制成功YHD3-1500型矿用泥浆脉冲随钻测量系统,该系统

由脉冲发生器、驱动短节、充电电池筒、测量短节及防爆计算机等组成,目前已在晋煤集团寺河矿完成了1 566 m的定向钻孔,创造了无线随钻测量系统的最深钻孔纪录。

3) 电磁波无线随钻测量。电磁波无线随钻测量技术以地层为传输介质,利用电磁波传输测量数据。由于电磁波信号传输时是将测量数据以低频电磁波信号传送到孔口,对钻井液的质量和钻探泵的不均匀性要求更低,数据传输速度较快,数据接收装置稳定性好^[11]。电磁波无线随钻测量的基本原理如下:孔底仪器连接钻杆中绝缘节两端形成发射天线,再将测量数据转换为电磁脉冲由此处发出,孔口仪器分别连接钻杆后端及地层形成接收天线,接收钻杆和地层中的电磁脉冲信号,并进行解码、滤波等

处理,最后得到孔底测量数据。

中国煤炭科工集团西安研究院已经研制成功YSDC矿用电磁波随钻测量仪,该仪器由随钻测量仪探管、本安型控制器及电源组成,目前已在晋煤集团寺河矿完成了525 m的定向钻孔,创造了电磁波无线随钻测量系统的最深钻孔纪录。

2.2 状态监测

传统的钻机状态显示主要采用仪表的形式,包括压力表、温度表和液位表等,数字化钻进中钻机状态监测采用数字形式。钻机的主要状态参数包括给进压力、起拔压力、主泵压力、副泵压力、回油压力、回转转速、油箱油温、油箱液位等,因此,需要布置压力传感器、转速传感器、温度传感器、液位传感器等,将待测的模拟信号变成微处理器可以采样的直流电流或电压信号。

中国煤炭科工集团西安研究院开发了钻机参数监测仪,其组成如图3所示^[12-13]。其中,编码器用来监测动力头转速、动力头给进起拔速度及位移、绞车的速度及位移;流量传感器用来监测液压系统流量和泥浆流量;旋涡旋进流量计用来监测风量。钻机参数监测可以与轨迹测量参数一起接入至防爆计算机中。

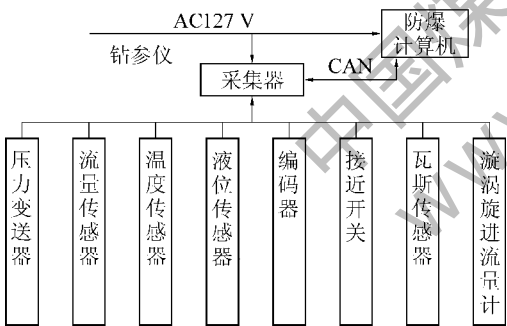


图3 钻机参数监测仪组成示意

Fig. 3 Component schematic of drilling parameter instrument

2.3 钻机控制

钻机控制是实现钻进自动化的关键,就是在钻进过程中依靠传感器测量各种参数,使用中控计算机获取数据并进行解释,最后由自动设备实现自动化钻进工作。钻机工作过程中的2个主要动作是给进和起拔,钻机控制的重点包括自动拆装钻杆、钻井液压力及流量控制、孔口夹持动作的逻辑控制等。

国内中煤科工集团重庆研究院和中煤科工集团西安研究院均已开发了远程控制钻机,实现了钻机控制的半自动化,并通过远控台操作钻机,保障操作人员的安全。中煤科工集团重庆研究院开发的远控

钻机可自动装卸钻杆,操作人员远程视频监控并控制钻机,钻机钻孔深度大于100 m,终孔直径75 mm^[14]。此远程控制钻机的远程操作台和自动装卸钻杆装置如图4所示。

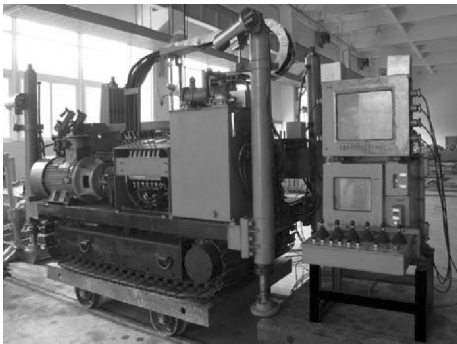


图4 远程控制钻机

Fig. 4 Remote-controlled drilling rig

自动装卸钻杆是钻机控制的关键,需实现钻杆拧卸、装载。钳式双夹持器和自动装载装置如图5所示,远程控制钻机采用钳式双夹持器,通过夹持器与动力头的有机配合、精确定位,实现了钻杆的自动拆卸;通过钻杆箱、送杆机构和顶杆机构的有机配合,实现钻杆的自动装载。



(a) 钳式双夹持器



(b) 自动装载装置

图5 钳式双夹持器和自动装载装置

Fig. 5 Double clamper and autoload device

3 未来研究重点与方向

尽管煤矿井下数字化钻进技术研究已经取得较大的进展,但在精确导向钻进、钻机自动控制、远程故障诊断、钻场智能管理等方面仍需加强研究。

1)精确导向钻进。旋转导向钻进技术是在钻柱旋转钻进时,随钻实时完成定向功能的一种导向式钻进技术,是石油钻井最先进的钻井控制技术。旋转导向钻进系统包括由孔底导向工具、随钻测量仪器及孔底自动控制系统形成的旋转自动导向系统、地面监控系统以及全闭环控制的双向通信系统。旋转导向钻进完全抛开了滑动导向方式,而以旋转导向钻进方式自动、灵活地调整孔斜和方位,具有转速快、钻孔轨迹平滑、卡钻风险低、轨迹控制精度高

等优点,对于煤矿井下钻孔而言,特别适用于硬岩、超深孔的定向钻进。

2) 钻机自动控制。煤矿井下钻机操控的全自动化要求能够集自动加杆、施工动作全部自动化,且具备参数化自适应钻进功能。目前开发的井下远控钻机采用有线控制方式,控制距离有限且灵活度不够。未来矿用钻机无线遥控器的开发将有助于充分发挥钻机的自动化功能,其难点在于无线通信抗干扰、矿用防爆、人机交互设计等。参数化自适应钻进是钻机自动控制的另一研究重点,要求能够根据煤层条件自动调整钻机的给进速度和动力头转速,研究建立不同煤层地质条件的钻进样本模型库。

3) 远程故障诊断。故障诊断通过分布于钻探设备动力系统、液压系统、电控系统、水力循环系统等关键部位的各种传感元件来获取设备运行数据,并将数据传送至核心控制器对状态数据进行处理,并与其正常工作数据进行对比分析,从而完成对钻探设备运行情况的实时监测及预警。远程故障诊断可通过无线通信手段将数据发送至故障诊断中心,通过专家系统实现钻探设备的电、液、机等系统的智能诊断。当发现故障时,判断是否需要紧急停机,同时报警并推送设备故障代码,从而避免发生更大的设备及经济损失。

4) 钻场智能管理。目前,我国数字矿山已在地理信息系统的基础上,实现了对井下开采、掘进、运输、通风、供电、排水等的集成管理,但尚未对井下钻孔施工有效管理。钻场智能管理就是要在小型钻场物联网的基础上形成整个煤矿钻场物联网,并接入数字矿山,有效管理井下钻探施工的作业人员、作业设备和作业情况等。随钻测量技术、钻机状态监测技术、电子钻杆或智能钻杆等是实现钻场智能管理的基础。

4 结 语

煤矿井下钻进技术的数字化、自动化和智能化是未来煤矿井下钻进系统的发展方向。目前,我国煤矿井数字化钻进技术已在随钻测量、状态监测、钻机控制方面取得长足进步。随着精确导向钻进、钻机自动控制、远程故障诊断、钻场智能管理的研究深入,智能钻探将对煤矿井下无人或少人化作业提供有效支持,对于保障我国煤炭资源的安全高效开采具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] 武 强.我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J].煤炭学报,2014,39(5):795-805.
Wu Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805.
- [2] 孙庆刚.中国煤矿瓦斯灾害现状与防治对策研究[J].中国煤炭,2014,40(3):116-119.
Sun Qinggang. Research on status quo and prevention countermeasures of coal mine gas disaster in China[J]. China Coal, 2014, 40(3): 116-119.
- [3] 林柏泉,邹全乐,沈春明,等.双动力协同钻进高效卸压特性研究及应用[J].煤炭学报,2013,38(6):911-917.
Lin Baiquan, Zou Quanle, Shen Chunming, et al. Investigation on highly effective depressurization property of dual-power drilling and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 911-917.
- [4] 王永龙,孙玉宁,王振锋,等.松软突出煤层钻进钻孔堵塞力学特征[J].煤炭学报,2015,40(S1):119-125.
Wang Yonglong, Sun Yuning, Wang Zhenfeng, et al. Mechanical characteristic of borehole clogging drilling in soft and outburst coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 119-125.
- [5] 石智军,李泉新,姚 克.煤矿井下1800m水平定向钻进技术与装备[J].煤炭科学技术,2015,43(2):109-113.
Shi Zhijun, Li Quanxin, Yao Ke. Underground mine 1800m horizontal directional drilling technology and equipment[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 109-113.
- [6] 石智军,李泉新,姚 克.煤矿井下水平定向钻进技术与装备的新进展[J].探矿工程,2015,42(1):12-16.
Shi Zhijun, Li Quanxin, Yao Ke. Latest developments of horizontal directional drilling technology and the equipments for underground coal mine[J]. Exploration Engineering, 2015, 42(1): 12-16.
- [7] 雷晓荣,程建远,陈 龙,等.螺旋钻进随钻轨迹测量技术与装备研究[J].煤炭科学技术,2016,44(9):140-144,154.
Lei Xiaorong, Cheng Jianyuan, Chen Long, et al. Study on measuring technology with drilling track and equipment of spiral drilling[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9): 140-144, 154.
- [8] 刘清友.未来智能钻井系统[J].智能系统学报,2009,4(1):16-20.
Liu Qingyou. Future intelligent drilling technology[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2009, 4(1): 16-20.
- [9] 石智军,温 榕,方 俊,等.煤层井下定向钻进用随钻测量系统的研制[J].煤炭科学技术,2013,41(3):16-20,69.
Shi Zhijun, Wen Rong, Fang Jun, et al. Research and development on drilling measuring system of directional drilling in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(3): 16-20, 69.
- [10] 高 珺.矿用随钻测量系统中数据传输技术研究[J].中州煤

(下转第70页)

- 技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 105-108, 121.
- Mao Debing, Yin Xiwen, Zhang Huijun. Technology of prevention roof disasters and monitoring and controlling in China coal mines [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 105-108, 121.
- [4] 付东波, 徐刚, 毛德兵, 等. 采煤工作面顶板灾害监测系统的 应用[J]. 煤矿开采, 2012, 17(6): 82-85.
- Fu Dongbo, Xu Gang, Mao Debing. Application of roof disaster monitoring system in mining face[J]. Coal Mining Technology, 2012, 17(6): 82-85.
- [5] 邓志刚, 任勇, 毛德兵, 等. 波兰 EMAG 矿压监测系统功能及 应用[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(10): 1-4.
- Deng Zhigang, Ren Yong, Mao Debing, et al. Function and applica- tion of Polish EMAG mine strata pressure monitoring and measure- ment system[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(10): 1-4.
- [6] 辽宁工程技术大学. 8.8m 综采工作面围岩控制理论及关键设 备技术研究[R]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.
- [7] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展 60 年及展望[J]. 中 国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1071-1081.
- Kang Hongpu. Sixty years development and prospects of rock bol- ting technology for underground coal mine roadways in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1071-1081.
- [8] 刘军. 塔山煤矿大断面切巷施工与支护技术[J]. 山东煤炭 科技, 2016(3): 36-37, 39.
- Liu Jun. Construction and support technology of large section open-off cut in Tashan Coal Mine[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2016(3): 36-37, 39.
- [9] 张辉. 超千米深井高应力巷底部鼓机理及锚固技术研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- [10] 国家煤矿安全监察局. 2000—2015 年全国煤矿事故分析报告 [R]. 北京: 国家煤矿安全监察局, 2016.
- [11] 天地科技股份有限公司. 煤矿顶板管理现状、问题及对策研究 [R]. 北京: 天地科技股份有限公司, 国家煤矿安全监察局行 管司, 2016.
- [12] 宋文财. 煤矿常见顶板事故的发生原因及防治对策[J]. 山东 煤炭科技, 2010(3): 196-198.
- Song Wencai. Occurrence reason and countermeasure of common roof accident in coal mine[J]. Shandong Coal Science and Tech- nology, 2010(3): 196-198.
- [13] 程磊, 杨朝伟, 景国勋. 2014 年我国煤矿事故统计与规律分 析[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(4): 384-389.
- Cheng Lei, Yang Chaowei, Jing Guoxun. Statistics analysis for regularity of coal mine accidents in China for the year of 2014 [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(4): 384-389.
- [14] 郭卫彬, 刘长友, 吴锋锋, 等. 坚硬顶板大采高工作面压架事故 及支架阻力分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1212-1219.
- Guo Weibin, Liu Changyou, Wu Fengfeng, et al. Analysis of sup- port crushing accidents and support working resistance in large mining height workface with hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1212-1219.
- [15] 杨永杰, 姜福兴, 石永奎. 控制设计在顶板管理中的地位[J]. 矿山压力与顶板管理, 1995(2): 23-26.
- Yang Yongjie, Jiang Fuxing, Shi Yongkui. The role of control de- sign in roof management[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1995(2): 23-26.
- [16] 曹佐勇. 加强顶板管理有效遏制顶板事故[J]. 煤矿安全, 2009, 40(8): 122-124.
- Cao Zuoyong. Strengthen roof management, effectively curb roof accidents[J]. Safety in Coal Mines, 2009, 40(8): 122-124.
- Coal Mines, 2016, 47(11): 117-119, 123.
- [13] 赵良, 殷新胜, 翁寅生. 基于 CoDeSys 的坑道钻机参数监控 系统设计[J]. 煤炭工程, 2016, 48(2): 56-58.
- Zhao Liang, Yin Xinsheng, Weng Yinsheng. Design on parameter monitoring system of tunnel drilling rig based on CoDeSys[J]. Coal Engineering, 2016, 48(2): 56-58.
- [14] 陈松林, 辛德忠, 陈 骞, 等. 防突远距离控制钻机推进机构分 析与设计[J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(S1): 4-5, 8.
- Chen Songlin, Xin Dezhong, Chen Qian, et al. Analysis and design of advancing mechanism for outburst-prevention remote-control drilling machine[J]. Mining Safety & Environment Protection, 2008, 35(S1): 4-5, 8.
- (上接第 51 页)
- 炭, 2016(4): 115-117, 121.
- Gao Jun. Research on data transmission technology in mine-used MWD systems[J]. Zhongzhou Coal, 2016(4): 115-117, 121.
- [11] 王家豪, 董浩斌, 石智军, 等. 煤矿井下随钻测量电磁传输信道 建模[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1705-1710.
- Wang Jiahao, Dong Haobin, Shi Zhijun, et al. Modeling an EM channel for MWD in underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1705-1710.
- [12] 翁寅生, 姚克, 殷新胜. 坑道钻机参数测量系统及其在煤矿 中的应用[J]. 煤矿安全, 2016, 47(11): 117-119, 123.
- Weng Yinsheng, Yao Ke, Yin Xinsheng. Application of parameter measuring system of tunnel drilling rig in coal mine[J]. Safety in