

煤矿信息化自动化新技术与发展

孙继平

(中国矿业大学(北京) 北京 100083)

摘要:介绍了矿井人员定位、矿用激光甲烷监测、矿用传感器与便携仪无线传输、矿用光纤分布测温、综采工作面远程监控、矿井供电系统防越级跳闸、WIFI、3G、4G 矿井移动通信、多媒体矿井救灾通信等新技术。提出了智能采煤、智能运输、煤矿大数据、煤矿物联网、矿用机器视觉、5G 矿井移动通信、矿井无线电安全、矿用机器人与救灾机器人自动导航、防煤炭盗采监测、矿用可见光通信、激光一氧化碳传感器、采空区火灾监测光纤敷设间隔等急需解决的关键科学技术问题。

关键词: 煤矿; 信息化; 智能化; 物联网; 大数据; 自动化

中图分类号: TD41; P643 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)01-0019-05

New technology and development of mine informatization and automation

Sun Jiping

(China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The paper introduced the mine personnel positioning, mine laser methane monitoring and control, wireless transmission of the mine sensor and portable instrument, mine optical fiber distribution and temperature measuring, remote monitoring and control of the fully mechanized coal mining face, override trip prevention of the mine electric power supply system, WIFI, 3G and 4G mine mobile communication, multimedia mine rescue communication and other new technology. The paper provided the intelligent coal mining, intelligent transportation, coal mine big data, mine internet of things, vision of the mine machinery, 5G mine mobile communication, mine radio safety, automatic guidance of mine robot and mine rescue robot, monitoring and measuring of the illegal coal mining prevention, mine visible light communication, laser visible light communication, carbon monoxide laser sensor, interval of the optical fiber laying for the mine fire disaster monitoring and measuring in the goaf and other key scientific technical problems to be solved in urgent.

Key words: coal mine; informatization; intelligent; internet of things; big data; automation

0 引言

煤矿信息化和自动化程度的提高,减少了煤矿井下作业人员,提高了生产率和事故防范能力,事故起数、死亡人数、百万吨事故率^[1]、百万吨死亡率、重特大事故起数、重特大事故死亡人数、亿吨重特大事故率和亿吨重特大事故死亡率均大幅下降,分别由2004年的3 641起、6 027人、1.858、3.08、42起、1 008人、2.14和51.43,下降为2014年的509起、931人、0.132、0.241、14起、229人、0.36和5.92。为充分发挥煤矿信息化与自动化技术在煤矿安全、绿色、高效、智能生产中的作用,有必要回顾总结先

进适用的煤矿信息化与自动化新技术,展望煤矿信息化、自动化与智能化未来发展趋势。

1 煤矿信息化与自动化新技术

1.1 矿井人员定位技术

作为安全避险六大系统之一的矿井人员定位系统,在遏制煤矿井下超定员生产、煤矿井下作业人员和事故应急救援等工作中发挥着重要作用。煤矿井下瓦斯等易燃易爆气体和煤尘、无线传输衰减严重、电磁环境复杂等,制约着GPS等定位技术在煤矿井下的应用^[2]。目前煤矿井下人员位置监测系统主要采用RFID区域位置监测技术,不能进行

收稿日期: 2015-10-28; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.01.004

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51134024)

作者简介: 孙继平(1958—),男,山西翼城人,教授,博士,博士生导师,现任中国矿业大学(北京)副校长。E-mail: sjp@cumtb.edu.cn

引用格式: 孙继平. 煤矿信息化自动化新技术与发展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 19-23, 83.

Sun Jiping. New technology and development of mine informatization and automation[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 19-23, 83.

煤矿井下人员定位。为解决煤矿井下人员定位技术难题,研究了基于场强和基于时间的矿井人员定位方法。

1) 基于场强的定位方法,就是检测接收信号和发送信号强度,计算信号的传输衰减,进而推算出信号传输距离(即被测目标距监测分站距离);再根据被测目标距监测分站距离和监测分站坐标,确定被测目标位置。煤矿井下无线信号衰减受巷道断面尺寸和形状、弯曲、倾斜、分支、表面粗糙度、围岩介质、支护、纵向导体(电缆、水管、铁轨等)、机电设备、通风设施等影响。因此,基于场强的煤矿井下人员定位方法,测量误差大,难以满足煤矿安全生产需求。为解决基于场强的煤矿井下人员定位方法测量误差大等问题,进行了相对场强、参考节点和实测标定等基于场强的矿井人员定位方法研究,虽然定位精度有所提高,但增加了系统维护工作量和成本。

2) 基于时间的定位方法,就是检测测距信号的传输时间,再乘以测距信号传输速度,进而推算出测距信号传输距离(即被测目标距监测分站距离);再根据被测目标距监测分站距离和监测分站坐标,确定被测目标位置。煤矿井下电磁波传输速度几乎不受煤矿井下环境影响,因此,基于时间的煤矿井下人员定位方法,定位精度高,可以满足煤矿安全生产需要。基于时间的定位方法主要有:基于到达时间、基于到达时间差和基于飞行时间的定位方法等。

基于到达时间的定位方法,通过检测被测目标(或监测分站)发送测距信号时刻 T_1 和监测分站(或被测目标)收到测距信号时刻 T_2 ,计算出测距信号的传输时间 $T = T_2 - T_1$ 。该方法需要被测目标与监测分站时钟同步,系统复杂、成本高。

基于到达时间差的定位方法,通过检测不同监测分站(二维定位至少需3个监测分站)接收到测距信号(由被测目标发送)的时间差,计算出被测目标距监测分站的距离。该方法不需要被测目标与监测分站时钟同步,但需要不同监测分站时钟同步,系统较复杂、成本较高。

基于飞行时间的定位方法,节点A(监测分站或被测目标)发送测距信号并记录发送时刻 T_1 ,节点B(被测目标或监测分站)接收测距信号并记录接收时刻 T_2 ,节点B处理完接收信号后发送应答信号并记录发送时刻 T_3 ,节点A接收应答信号并记录接收时刻 T_4 。测距信号(应答信号)在节点A和节点B之间飞行时间 $T = [(T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)]/2$ 。不

难看出,基于飞行时间的定位方法既不需要被测目标与监测分站之间时钟同步,也不需要不同监测分站之间时钟同步,系统简单、成本低,是目前煤矿井下人员、胶轮车、电机车等动目标定位优选方法。

1.2 矿用激光甲烷监测技术

甲烷监测与断电控制是瓦斯防治主要措施。矿用甲烷传感器工作原理主要有热催化、热导、红外和激光等^[3]。

1) 矿用热催化甲烷传感器主要用于空气中甲烷体积分数不超过4%的低浓度甲烷监测;具有成本低等优点,但存在不能用于高浓度甲烷监测、调校周期短、响应速度慢、传感元件寿命短、催化剂中毒等缺点。热催化甲烷传感器可以满足低瓦斯矿井和高瓦斯矿井甲烷监测需求。热催化与热导组合,可制成高低浓甲烷传感器,用于煤与瓦斯突出矿井的甲烷监测。

2) 矿用热导甲烷传感器主要用于高浓度甲烷监测,通常与热催化组合,制成高低浓甲烷传感器。热导甲烷传感器具有成本低等优点,但测量精度低,不能用于低浓度甲烷监测。

3) 矿用红外甲烷传感器可用于全量程甲烷浓度监测,具有全量程监测、调校周期长、响应速度快、传感元件寿命长等优点,但存在测量精度受环境湿度、温度、压强等影响,成本较高等问题。红外甲烷传感器价格一般是热催化甲烷传感器的3倍。

4) 矿用激光甲烷传感器可用于全量程甲烷浓度监测,具有全量程监测、调校周期长、响应速度快、传感元件寿命长等优点,但存在测量精度受环境湿度、压强等影响,成本高等问题。激光甲烷传感器价格一般是热催化甲烷传感器的10余倍。激光甲烷传感器的激光器输出波长和光功率受温度影响,甲烷吸收光谱特性受温度和压强影响。

矿用激光甲烷传感器可采用可调谐半导体激光吸收光谱技术进行自动调零,设置甲烷标准气样自动调灵敏度,实现甲烷传感器自动调校,减少井下维护工作量。为降低矿用激光甲烷传感器成本,可以将激光器和光电探测器等设置在分站,多个检测气室通过光缆与分站相连,实现激光器和光电探测器等复用。

5) 开放气室可调谐半导体激光吸收光谱气体传感器,可探测传感器难以到达的空间气体浓度,用于救护队超前有害气体探测、采空区气体探测、高冒顶板甲烷浓度监测等。

1.3 矿用传感器与便携仪无线传输技术

目前矿用传感器主要是有线传感器,有线传感器具有可靠性高、传输距离远、远程供电等优点,但存在着传感器电缆敷设和维护工作量大、难以满足胶轮车、电机车、采煤机、掘进机等移动监控需求等。为满足回采工作面回风隅角、掘进工作面、采煤机、掘进机、胶轮车、电机车等甲烷监控的需求,研制了矿用无线甲烷传感器^[3]。用于回采工作面回风隅角、掘进工作面的矿用无线甲烷传感器,不需要敷设和维护电缆,便于安装和维护,但由于传感器采用蓄电池供电,因此,需要定期更换传感器。具有定位功能的矿用无线甲烷传感器,可以自动调零;当传感器通过定位卡检测到其位于地面时,进行自动调零,减少了传感器调校工作量。

为避免或减少瓦斯事故发生,全面监控煤矿井下瓦斯,煤矿井下瓦斯监测采用定点监测与移动监测相结合的方法。回采工作面(含进回风巷)、掘进工作面、采区回风、一翼回风和总回风等必须设置甲烷传感器,实现定点监测。矿长、矿总工程师、采掘区队长、通风区队长、工程技术人员、班长、爆破工、流动电钳工、安全监测工、瓦斯检查工等下井时,必须携带便携式甲烷检测报警仪,实现移动监测。为及时全面掌握煤矿井下甲烷浓度,研制了具有定位和无线传输功能的便携式甲烷检测报警仪,及时将监测地点和甲烷浓度上传至地面调度室。

1.4 矿用光纤分布测温技术

1) 采空区火灾监测。温度是判断物质氧化和燃烧的最关键参数。监测采空区火灾可采用温度传感器监测采空区不同位置温度,但存在着传感器无法回收、用量大、成本高、易损坏等问题。因此,通常采用束管监测系统,监测采空区CO、CO₂、O₂等气体浓度,推测遗煤氧化温度,进行采空区火灾监测和报警。束管监测系统存在着漏气、堵塞、取样时间长、维护困难等缺点。

光纤分布式测温技术,采用拉曼散射原理和光时域反射技术实现了沿线温度和距离测定,具有敷设方便、成本低等优点,可用于采空区火灾监测^[3]。在回采过程中,将矿用光纤分布式测温系统的监测光纤敷设在采空区,实时监测敷设有监测光纤的采空区不同位置的温度,当温度及温度变化率大于设定门限时,及时报警。矿用光纤分布式测温采空区火灾监测系统具有敷设方便、成本低、不需回收等优点。但由于煤的导热系数较低,如果光纤敷设间隔

较大,不能及时监测到温度变化;如果光纤敷设间隔较小,虽然能及时监测到温度变化,但光纤敷设量较大。因此,研究合理的光纤敷设间隔,是矿用光纤分布式测温采空区火灾监测系统急需解决的问题。

2) 输送带火灾监测。为避免或减少煤矿井下输送带火灾发生,通常在带式输送机机头和机尾等地点设置温度和烟雾传感器,当温度和烟雾异常时,停机、报警、洒水。在带式输送机机头和机尾设置温度和烟雾传感器,可以发现传感器设置地点温度和烟雾异常,但不能监测输送带沿线没有设置传感器地点的温度,不能及时发现托辊与输送带摩擦等引发的输送带燃烧火灾。若在输送带所有托辊设置温度传感器,不但会增加传感器数量和系统成本,也不便于安装和维护。

矿用光纤分布式测温系统具有沿线连续监测、成本低、便于维护等优点^[3]。将矿用光纤分布式测温系统的监测光纤沿输送带敷设,可实时监测托辊、滚筒等输送带沿线温度,发现温度异常及时报警。

3) 电缆火灾监测。为避免或减少煤矿井下电气火灾,通常在变压器、开关、电动机等电气设备设置温度传感器,实时监测传感器设置地点的温度,但不能监测没有设置传感器的接线盒和电缆温度变化。若在所有接线盒和电缆设置温度传感器,不但会增加传感器数量和系统成本,也不便于安装和维护。

矿用光纤分布式测温系统可用于接线盒和电缆温度监测,将监测光纤沿电缆敷设,实时监测电缆和接线盒温度,发现温度异常及时报警,具有沿线连续监测、成本低、便于维护等优点^[3]。

1.5 综采工作面远程监控技术

统计分析表明,瓦斯、水害和顶板事故主要发生在采掘工作面;发生在采掘工作面的事故起数和死亡人数分别为78.54%和78.80%^[2]。因此,减少采掘工作面作业人数,是减少煤矿伤亡事故的有效措施。

为减少综采工作面作业人员,研制了记忆割煤、远程控制采煤技术^[3]。监控人员根据煤层顶底板情况,控制采煤机滚筒高度等,采煤机自动记忆割截状态。当完成1个割截周期后,采煤机根据记忆的记忆割截状态,自动割截;液压支架和刮板输送机等根据采煤机位置等自动跟进。远程控制中心设置在巷道,监控人员可通过视频图像、监控系统等实时监控采煤机、液压支架、刮板输送机等状态,并进行远程

控制。

1.6 矿井供电系统防越级跳闸技术

短路、过载和漏电保护是保障矿井供电系统正常运行的主要措施。但由于短路、过载和漏电保护整定和设备故障等问题,经常造成短路、过载和漏电保护误动、拒动和越级跳闸。进而造成大面积停电、局部通风机停风、水泵停止工作,不但影响正常生产,还会引发瓦斯爆炸和淹井等事故。

为避免或减少矿井供电系统越级跳闸事故发生,研制了光纤纵差保护、光纤闭锁综合防越级跳闸系统^[3]。当电缆和开关输入电流与输出电流异常时,跳闸动作。当下级开关跳闸时,闭锁上级开关。该系统还具有地面远程整定功能,解决了井下整定困难等问题。

1.7 矿井多媒体移动与救灾通信技术

1) WIFI、3G、4G 矿井移动通信技术。为保障煤矿安全生产,提高生产率和设备利用率,采掘工作面作业人员、胶轮车司机、电机车司机、矿长、矿总工程师、工程技术人员、区队长、班长、安全检查员、瓦斯检查工、流动电钳工、安全监测工等需携带移动通信终端。早期的矿井漏泄、感应、透地等移动通信系统,存在着体积大、传输带宽窄等问题,难以满足全矿移动通信需求。小灵通矿井移动通信系统存在着基站控制器和基站非本质安全防爆、抗灾变能力差、传输距离短、配件困难等问题,已很少采用。为满足煤矿安全高效生产对矿井移动通信系统的需求,研制了WIFI、3G 矿井移动通信系统^[2]。3G 移动通信技术主要有WCDMA、CDMA2000 和TD-SCDMA,在视频传输方面,WCDMA 优于CDMA2000 和TD-SCDMA。在视频和数据无线传输方面,WIFI 优于3G。在移动通信方面,3G 优于WIFI。目前,4G 矿井移动通信系统已在煤矿井下试验。

2) 多媒体矿井救灾通信技术。矿井瓦斯、水、火和顶板等事故,通常会造成矿井有线调度通信和移动通信等系统损坏。因此,进入煤矿井下救援的矿山救护队指战员必须佩戴救灾通信装备。早期矿井救灾通信系统主要是中频感应通信系统,可进行语音通信,但存在着设备体积大、不能传输事故现场视频、传输距离短等问题。为满足煤矿井下救灾通信的需求,采用WIFI 和MESH 等技术,研制了多媒体矿井救灾通信系统^[2]。多媒体矿井救灾通信系统具有语音和视频通信,CH₄、CO、O₂、温度等环境监测,救护队员心跳、体温、姿态监测等功能,还可通

过中继延长通信距离。

2 煤矿信息化与自动化发展趋势

煤矿信息化与自动化技术发展,促进了煤矿安全生产、提高了生产率和设备利用率。建设安全、绿色、高效、智能煤矿,需进一步研究煤矿信息化、自动化与智能化技术,研究智能采煤、智能运输、煤矿大数据、煤矿物联网、矿用机器视觉、5G 矿井移动通信、矿井无线电安全、激光一氧化碳传感器、采空区火灾监测光纤敷设、矿用机器人与救灾机器人自动导航、防煤炭盗采监测、矿用可见光通信等技术^[4]。

2.1 智能采煤与运输

综采工作面远程监控减少了综采工作面作业人员,但无人采煤的关键技术并未解决。需进一步研究煤岩界面智能识别技术、采煤机惯性导航技术、采煤机地面远程控制技术等^[4]。需研究融合机器视觉、激光和雷达测距、人工智能等的采掘工作面智能控制系统。

为减少胶轮车和电机车运输系统作业人员,需研究融合机器视觉、激光测距、雷达测距和测速、人工智能等的智能驾驶系统,实现胶轮车和电机车无人驾驶和地面远程控制^[4]。

为实现带式输送系统无人值守、地面远程控制,需研究性能可靠的输送带纵撕监控技术。为提高设备运行效率,减少设备磨损,节约能源,需研究可靠的煤量监控技术,根据运煤量自动调节输送带速度,即有煤开、无煤停;煤多快运(不大于最大允许速度)、煤少慢运^[4]。

2.2 煤矿大数据

大数据具有数据体量巨大、数据类型繁多、关注事件间的相关关系等特点,可用于预测和预警。迄今为止,还没有完全掌握煤与瓦斯突出、冲击地压等事故发生规律,还不能准确预警煤与瓦斯突出和冲击地压等。因此,研究基于大数据的煤与瓦斯突出、冲击地压、水害、火灾等重大灾害预警方法和系统,具有重要的理论意义和实用价值。煤矿大数据就是基于大数据方法,解决煤矿安全生产等问题,这包括煤矿瓦斯、冲击地压、水害、火灾等重大灾害预警、重大关键设备故障诊断、煤炭产量和价格预测等^[5-6]。

2.3 煤矿物联网

煤矿井下具有瓦斯等爆炸性气体,电磁波传输衰减大,无线传输受巷道、支护、机电运输设备等影

响。GPS难以用于煤矿井下定位,大功率无线发射设备不能用于煤矿井下等。因此,需针对煤矿井下环境特点和矿用电气产品特殊要求,进行煤矿物联网研究。

煤矿物联网就是针对煤矿井下环境特点和矿用电气产品特殊要求,通过RFID、ZIGBEE、WIFI、3G、4G等技术,实时监控设备、人员、环境等位置、身份、状态等信息,实现人、机、环协同管控,具有位置、身份、状态信息综合监控,无线与有线混合传输等特点。

目前,采用物联网技术,已研制成功并推广应用了煤矿井下人员位置监测系统、煤矿井下人员定位系统(静态定位精度小于5 m)、胶轮车运输监控系统、轨道运输监控系统、爆破监控系统、煤炭公路运输监控系统等。这些煤矿物联网系统在煤矿安全生产中发挥着重要作用。

为满足安全、绿色、高效、智能现代化煤矿建设需求,还需研制基于物联网的矿用安全标志准用产品管控、矿用重大关键设备管控与远程维护、持证上岗与专人操作管控、防碰撞等系统。进一步提高煤矿井下人员定位系统定位精度^[5-7]。

2.4 矿用机器视觉

矿用机器视觉就是针对煤矿井下照度低、矿尘大、喷雾影响大、机械振动大、电磁干扰严重、电气防爆、电源电压波动适应能力强等特点,通过视频监控与智能处理,用机器代替人眼和大脑进行测量和判断。矿用机器视觉将用于矿用机器人、救灾机器人、胶轮车、电机车、采煤机、掘进机等自动驾驶控制,煤岩界面识别,煤仓煤位和水仓水位监视,煤炭产量监测与防作弊,带式输送机监视,无人值守岗位监视,大型机电设备监视,煤与瓦斯突出和冲击地压报警,下井人员唯一性检测等方面。

2.5 5G 矿井无线通信与无线电安全

矿用WIFI、3G移动通信系统已在煤矿井下应用,4G移动通信系统已开始煤矿井下试验。矿用机器视觉、智能采煤、智能运输、煤矿大数据、煤矿物联网等对无线通信提出了更高的要求。5G移动通信系统工作频率更高、传输速度更快,是4G的百倍以上。随着5G等无线通信技术的研究和发展,还需研究5G矿井移动通信系统。

大功率无线通信设备和高增益天线在煤矿井下应用,不但会引爆瓦斯和电雷管,还会造成人身伤害。因此,需要研究煤矿井下无线电防爆与安全问

题。研究发射功率、天线增益、天线设置、工作频率、巷道、支护、机电设备等对无线电防爆和无线电人身安全的影响。

2.6 矿用激光一氧化碳传感器

矿井火灾防治和环境监测需要矿用一氧化碳传感器。目前,矿用一氧化碳传感器主要采用电化学工作原理,存在着寿命短、调校周期短、成本高等问题。激光传感器具有调校周期长、响应速度快、传感元件寿命长等优点。可调谐半导体激光吸收光谱技术,可通过调谐激光波长监测不同气体。但由于矿用一氧化碳传感器测量精度要求高等,因此,研制矿用激光一氧化碳传感器还有一定难度。急需研制ppm级矿用激光一氧化碳传感器。

3 结 语

矿井人员定位、矿用激光甲烷监测、矿用传感器与便携仪无线传输、矿用光纤分布测温、综采工作面远程监控、矿井供电系统防越级跳闸、WIFI、3G、4G矿井移动通信、多媒体矿井救灾通信等新技术的推广应用,促进了煤矿安全生产、提高了生产率和设备利用率。建设安全、绿色、高效、智能煤矿,还需进一步研究煤矿信息化、自动化与智能化技术,研究智能采煤、智能运输、煤矿大数据、煤矿物联网、矿用机器视觉、5G矿井移动通信、矿井无线电安全、激光一氧化碳传感器、采空区火灾监测光纤敷设、矿用机器人与救灾机器人自动导航、防煤炭盗采监测、矿用可见光通信等技术。

参考文献(References):

- [1] 国家煤矿安全监察局. 2004年—2014年全国煤矿事故分析报告[R]. 北京: 国家煤矿安全监察局, 2014.
- [2] 孙继平. 煤矿事故特点与煤矿通信、人员定位及监视新技术[J]. 工矿自动化, 2015, 41(2): 1-6.
Sun Jiping. Characteristics of coal mine accidents and new technologies of coal mine communication, personnel positioning and monitoring[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(2): 1-6.
- [3] 孙继平. 煤矿监控新技术与新装备[J]. 工矿自动化, 2015, 41(1): 1-5.
Sun Jiping. New technologies and new equipments of coal mine monitoring[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(1): 1-5.
- [4] 孙继平. 煤矿信息化与自动化发展趋势[J]. 工矿自动化, 2015, 41(4): 1-5.
Sun Jiping. Development trend of coal mine informatization and automation[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(4): 1-5.

(下转第83页)

- rock roadway[J]. Journal of China Coal Society 2011 ,36(2): 223 - 228.
- [11] 周 恒 漆泰岳 肖 锋 等. 软岩巷道高强锚杆辅助锚注支护机理及应用[J]. 采矿与安全工程学报 2006 23(3): 346 - 349.
- Zhou Heng ,Qi Taiyue ,Xiao Feng ,*et al.* Mechanism of high - strength bolt and bolting - grouting support in soft roadway and its application[J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2006 23(3): 346 - 349.
- [12] 张 璨 张 农 许兴亮 等. 高地应力破碎软岩巷道强化控制技术研究[J]. 采矿与安全工程学报 2010 27(1): 13 - 18.
- Zhang Can ,Zhang Nong ,Xu Xingliang ,*et al.* Support technique intensifying soft broken roadway with high ground stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2010 27(1): 13 - 18.
- [13] 何满潮 郭志飏 任爱武 等. 柳海矿运输大巷返修工程深部软岩支护设计研究[J]. 岩土工程学报 2005 27(9): 977 - 980.
- He Manchao ,Guo Zhibiao ,Ren Aiwu ,*et al.* Deep soft rock supporting technology of the repair project for transport tunnel in Liuhai coal mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering , 2005 27(9): 977 - 980.
- [14] 黄伟达 张 明 蓝永基 等. SMW 工法及扩孔锚杆在深大基坑中的工程实践[J]. 岩土工程学报 2010 32(S1): 261 - 264.
- Huang Weida ,Zhang Ming ,Lan Yongji ,*et al.* Practice of SMW method and reaming anchors in deep and large foundation pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,2010 ,32(S1): 261 - 264.
- [15] 宁甲旭 马洪超 刘兴龙. 在石质性文物保护工程中如何提高锚杆抗拔力[J]. 岩土工程界 2008 11(8): 75 - 76.
- Ning Jiaxu ,Ma Hongchao ,Liu Xinglong. How to improve the bolt pulling force in protection project of stone cultural relics [J]. Geotechnical Engineering World 2008 11(8): 75 - 76.
- [16] 胡建林 张培文. 扩体型锚杆的研制及其抗拔试验研究[J]. 岩土力学 2009 30(6): 1615 - 1619.
- Hu Jianlin ,Zhang Peiwen. Development of under reamed anchor and experimental study of uplift resistance [J]. Rock and Soil Mechanics 2009 30(6): 1615 - 1619.
- [17] 郝凤山 齐有军. 锚杆扩孔技术及锚固力试验研究[J]. 煤炭学报 2008 33(12): 1358 - 1361.
- Hao Fengshan ,Qi Youjun. Research of embrasure reaming and anchoring force experimentation [J]. Journal of China Coal Society 2008 33(12): 1358 - 1361.
- Sun Jiping. Internet + coal and coal mine information [J]. Coal Economic Research 2015 35(10): 16 - 19.
- [7] 孙继平. 煤矿物联网特点与关键技术研究 [J]. 煤炭学报 , 2011 36(1): 167 - 171.
- Sun Jiping. Research on characteristics and key technology in coal mine internet of things [J]. Journal of China Coal Society 2011 , 36(1): 167 - 171.

(上接第 23 页)

- [5] 孙继平. 煤矿事故分析与煤矿大数据和物联网 [J]. 工矿自动化 2015 41(3): 1 - 5.
- Sun Jiping. Accident analysis and big data and Internet of Things in coal mine [J]. Industry and Mine Automation 2015 , 41(3): 1 - 5.
- [6] 孙继平. “互联网 + 煤炭”与煤矿信息化 [J]. 煤炭经济研究 , 2015 35(10): 16 - 19.