

# 面向煤炭精准开采的物联网架构及关键技术

袁亮<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 共伴生能源精准开采北京市重点实验室, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083;

3. 安徽理工大学 能源与安全学院, 安徽 淮南 232000)

**摘要:**在剖析煤矿生产物流系统存在问题的基础上,围绕煤炭精准开采科学构想和矿山物联网发展现状,提出了面向煤炭精准开采的物联网概念及内涵,凝练出其5种关键技术,即多源信息智能感知、多网融合传输、多参量信息分析处理、基于云技术的灾害监控预警、矿井灾害应急救援;指出基于透明地球的煤炭精准开采和基于物联网的智能感知是实现未来无人矿山的两大技术体系,其中精准开采是技术核心,物联网是技术保障;以煤矿动力灾害精准预警物联网为例,阐述了其包含感知层、网络层、应用层和公共技术的体系架构,并介绍了其工程应用,为实现煤炭精准开采科学构想提出了技术路径。

**关键词:**煤炭精准开采; 矿山物联网; 煤矿生产物流系统; 煤矿动力灾害; 智能感知; 多网融合; 精准预警; 应急救援

中图分类号:TD76/82

文献标志码:A

网络出版时间:2017-09-27 13:38

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20170927.1338.001.html>

## Framework and key technologies of Internet of things for precision coal mining

YUAN Liang<sup>1,2,3</sup>

(1. Beijing Key Laboratory for Precise Mining of Intergrown Energy and Resources, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. School of Mining and Safety Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, China)

**Abstract:**On the basis of analyzing existing problems of coal mine production logistics system, concept and connotation of Internet of things (IoT) for precision coal mining were proposed and five key technologies were condensed by summarizing scientific conception of precision coal mining and development of mine IoT, which were intelligent perception of multi-source information, multi-network fusion transmission, multi-parameter information analysis and processing, disaster monitoring and early warning based on cloud technology and mine disaster emergency rescue. It was pointed out that precision coal mining based on transparent earth and intelligent perception based on IoT were two major technical

收稿日期:2017-09-01;修回日期:2017-09-14;责任编辑:李明。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801400);中国工程院重点咨询资助项目(2015-XZ-15);国家自然科学基金资助项目(51427804)。

作者简介:袁亮(1960—),男,安徽金寨人,中国工程院院士,E-mail:yuanl\_1960@sina.com。

引用格式: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):1-6.

YUAN Liang. Framework and key technologies of Internet of things for precision coal mining[J]. Industry and Mine Automation, 2017,43(10):1-6.

systems to realize future unmanned mining, precision coal mining was technology core, and IoT was technical guarantee. Taking IoT for dynamic disaster precision early warning of coal mine as an example, its system framework was expounded including perception layer, network layer, application layer and public technology, and its engineering application was introduced, which directed technology route for precision coal mining.

**Key words:** precision coal mining; mine Internet of things; coal mine production logistics system; coal mine dynamic disaster; intelligent perception; multi-network fusion; precision early warning; emergency rescue

## 0 引言

近年来,随着德国“工业 4.0”、美国“AMP2.0(先进制造伙伴计划)”和“中国制造 2025”战略<sup>[1]</sup>的提出,一种新型的工业发展模式初露端倪,并将引导全球工业与信息技术的深度融合,给工业发展带来新一轮的产业革命。作为“工业粮食”的煤炭行业,信息化的发展极为重要。自 20 世纪 80 年代以来,中国煤矿在机械化、自动化、信息化和数字化等方面取得了举世瞩目的成就,特别是在矿井灾害预警与防控、煤与瓦斯共采、煤与共伴生资源精准协调开发等领域取得了重大突破<sup>[2-6]</sup>,为煤炭安全高效开采做出了巨大贡献。

随着信息技术在中国矿山领域应用范围的不断扩大<sup>[7]</sup>,1999 年吴立新等<sup>[8-9]</sup>提出了“数字矿山”的概念,2010 年张申、丁恩杰等<sup>[10]</sup>提出了“感知矿山”的概念,指出感知矿山是数字矿山、矿山综合自动化等概念的升华,感知矿山的核心问题是通过对矿山灾害征兆、矿工周围环境和矿山设备状况的“3 个感知”,实现减灾保安全。随后又有人提出“智能矿山”、“智慧矿山”等概念<sup>[11-12]</sup>。许多学者对矿山物联网的应用开展了深入研究,中国矿业大学物联网(感知矿山)研究中心在该领域取得了诸多研究进展<sup>[13-14]</sup>,为实现矿山信息化、保障矿山安全高效开采奠定了一定基础。笔者结合煤炭开采面临的挑战和现代信息技术发展方向<sup>[15-17]</sup>,于 2017 年 1 月提出了煤炭精准开采科学构想<sup>[18]</sup>,2017 年 8 月国内矿业类相关高校、著名企业及研究机构,共同发起成立了“煤炭安全智能精准开采协同创新组织”,为实现煤炭精准开采从科学构想变为理论和技术迈出了坚实的步伐。

然而,随着煤炭资源开采深度和开采强度的增加,冲击地压、煤与瓦斯突出等动力灾害已成为国内外煤矿开采领域面临的主要灾害之一<sup>[19-20]</sup>。灾害前兆信息采集传感、传输、挖掘辨识技术的落后,直

接导致了动力灾害预警的盲目性和不确定性<sup>[21-22]</sup>,但不容回避的是目前矿山物联网仍普遍存在信息孤岛、系统封闭、异构融合、标准滞后等问题<sup>[23]</sup>,亟待协同攻关,开展煤矿动力灾害监控预警方面的研究。

本文在剖析煤矿生产物流系统存在问题的基础上,结合煤炭精准开采科学构想和矿山物联网发展方向,论述了面向煤炭精准开采的物联网概念及内涵,并以煤矿动力灾害精准预警物联网为例,阐述了其架构及关键技术,并介绍了其工程应用,为实现智能无人矿山开采提出了技术路径。

## 1 煤矿生产物流系统存在问题

煤炭生产主要包括采掘、运输、通风、排水、洗选及其他辅助工作。从本质上讲,煤炭生产全过程就是一个完整的物流系统,物流系统的效率直接影响煤矿企业的整体效益。虽然中国煤矿综合机械化水平得到了大幅度提高,但生产物流系统仍存在以下问题。

(1) 系统效率低,安全可靠差。中国煤矿平均生产效率远低于发达产煤国家。据统计,美国 2014 年煤矿生产效率为 5.96 t/(人·h),澳大利亚 2013—2014 年为 4.5 t/(人·h),而中国国有重点煤矿不到 1 t/(人·h),且中国煤矿生产物流系统事故占煤矿事故总数的 40%,远高于瓦斯事故。在煤炭生产中,物流成本约占总成本的 30%~80%,辅助运输工人人数约占井下总人数的 30%~50%。可见,煤矿生产物流系统的低效率严重制约着煤矿企业的经济效益。

(2) 传统辅助运输方式仍占主体地位。煤矿辅助运输方式主要有轨道运输和无轨运输两大类,运输设备主要有电机车、单轨吊车、卡轨车、无极绳绞车、齿轨车、无轨胶轮车等。矿井的运输监控系统基本实现了车辆运行状态监测,但运输设备未实现辅助(无人)驾驶,对矿用物资流的管理信息化水平低。目前辅助运输仍以多段分散落后的运输方式为主,

存在设备落后、安全性差、效率低、工人劳动强度大等问题。因此,需要加强辅助运输系统管理,开发智能高效的运输设备和运输监控系统,提高煤矿生产效率和水平。

(3) 系统信息化水平低,智能感知缺乏。传统煤炭开采自动化、信息化、智能化水平低,存在单凭直觉和经验进行生产管理的情况,因此往往将采矿视为技术而非科学<sup>[9]</sup>。动态、连续、实时的生产自动化监测是矿山信息化发展的方向,但现有传感检测技术的可靠性、及时性不能满足需求,智能感知缺乏。煤矿地质条件复杂,生产系统繁多,采掘条件多变,需要利用物联网进行监测监控,逐步实现生产物流各子系统的自动化,并建立高效、规范的管理模式,以适应市场激烈竞争的需要。

(4) 系统封闭、数据孤岛现象依然严重。尽管中国煤矿数字矿山建设与信息化改造取得了明显成效,但传感信息获取方式复杂多样,目前尚未实现在统一平台下的全面采集、共网传输。有线传输方式存在布线困难、移动灵活性差、未全面覆盖等问题,无线传输方式存在时效性差、信号覆盖范围小等问题,系统间异构数据无法融合、无时间同步,数据通信可靠性及抗干扰性能差,多源传感信息挖掘分析与处理困难,不能进行耦合分析、综合预警。因此,亟待国内相关行业管理部门从政策层面推动系统间的数据融合。

## 2 面向煤炭精准开采的物联网相关概念及内涵

煤炭精准开采是基于当前煤炭开采过程中的现实性难题及未来深部煤炭开采将面临的技术瓶颈提出的未来采矿科学构想,最终目的是实现以智能、少人(无人)、安全为核心的煤炭精准开采。其基础理论探索是透明空间地球物理和多物理场耦合等,核心技术支撑是智能感知、智能控制、物联网、大数据和云技术等,功能平台构建是风险精准判识和监控预警系统等<sup>[18]</sup>。煤炭精准开采是煤矿开采技术的一项颠覆性技术创新,是将煤炭开采扰动影响、致灾因素等统筹考虑的煤炭无人(少人)智能开采与灾害防控一体化的未来采矿。煤炭精准开采最大化地利用现代科技成果,实现对煤炭开发全过程的信息化、数字化及智能化,其框架如图1所示,即通过对资源勘查与评估、矿区总体规划、矿井设计建设、生产与管理等与现代信息技术的深度跨界融合,实现煤炭开采由传统的高危劳动密集型向高精尖技术密集型转变,进而实现智能少人(无人)开采,因此煤炭精准

开采是中国未来采矿必由之路!

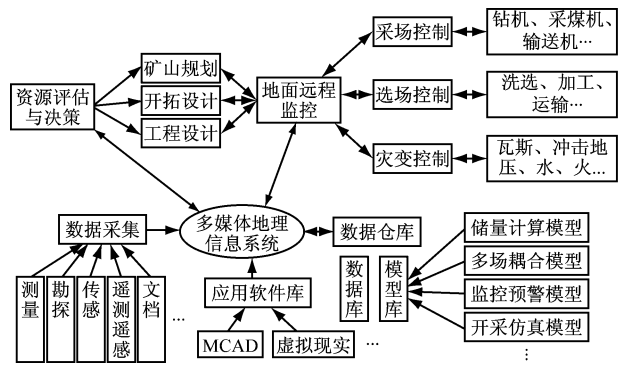


图1 煤炭精准开采框架

Fig. 1 Framework of precision coal mining

物联网起源于美国麻省理工学院在1999年提出的网络无线射频识别系统,随后其概念及内涵发生了较大变化<sup>[10]</sup>。通常物联网指通过信息传感设备,按照约定的协议,将任何物品与互联网连接起来,进行信息交换和通信,以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络,它是在互联网基础上延伸和扩展的网络<sup>[24]</sup>。矿山物联网是信息化在矿山领域的综合应用,它利用感知、传输、信息与控制等技术,通过信息空间与矿山物理世界的深度融合,实现对矿山整体事物的数字化和矿山物与物、人与人相联的网络化,达到对矿山物理世界实时控制、精确管理和科学决策的目的<sup>[14]</sup>,是通信网和互联网在矿山行业应用的更高境界。

近年来,新一轮产业革命方兴未艾,为人类未来采矿指明了方向,即通过传统采矿技术与信息技术的深度融合,最终实现无人(智能)矿山。其技术体系支撑为基于透明地球的煤炭精准开采和基于物联网技术的智能感知、共网传输及信息分析等。煤炭精准开采是人类社会未来无人矿山的核心技术,为矿山物联网的发展指引了前进方向;面向煤炭精准开采的物联网是煤炭精准开采的主要载体,为实现智能感知与精准开采提供了技术支撑。二者密切相连、不可分割,共同服务于煤炭的科学开采,助推智能采矿与无人矿山建设。

## 3 面向煤炭精准开采的物联网关键技术

面向煤炭精准开采的物联网依托互联网与通信网,通过多种泛在传感器将煤矿开采条件、设备健康状况及人员工作环境联接起来,对煤矿体征进行实时在线监测、分析处理及信息服务。面向煤炭精准开采的物联网主要由感知层、传输层、分析层和应用层组成,如图2所示。其关键技术主要包括多源信

息智能感知、多网融合传输、多参量信息分析处理、基于云技术的灾害监控预警、矿井灾害应急救援等。

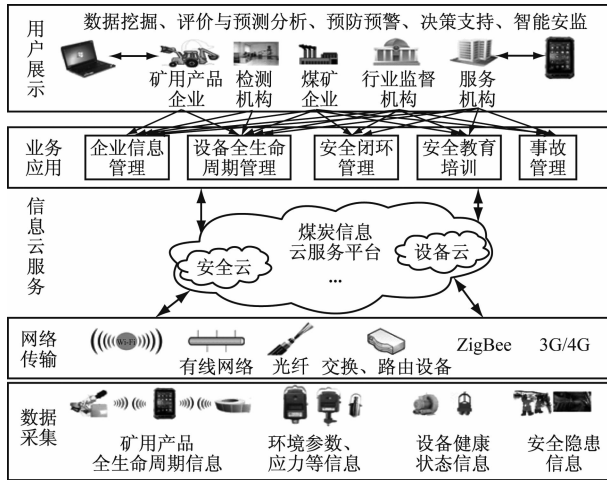


图2 面向煤炭精准开采的物联网架构

Fig.2 IoT framework for precision coal mining

(1) 多源信息智能感知。利用新型灵敏度高、可靠性好的采集传感器等对人机环参数信息全面采集。主要包括矿山地测空间数据深度智能感知、采场及开采扰动区多源信息采集传感及灾变前兆信息采集传感等。

(2) 多网融合传输。利用通信网络,安全高效、实时可靠地进行多源信息交互和共享。主要包括监测数据组网布控、非接触供电及多制式数据抗干扰高保真稳定传输及灾害前兆信息解析及协同控制等。

(3) 多参量信息分析处理。利用基于大数据的智能计算技术,对多源海量的动态感知数据和信息进行深度挖掘分析与融合处理,实现智能化的决策和控制。主要包括多源海量动态信息聚合、数据挖掘模型构建与更新、面向需求驱动的危害预警服务知识体系构建、基于漂移特征的潜在煤矿灾害预测方法与多粒度知识发现方法及危险区域快速辨识及智能评价等。

(4) 基于云技术的灾害监控预警。利用基于云技术的灾害监控预警系统平台,实现矿井灾害的实时超前精准预警。主要包括具有推理能力、语义一致性的灾害知识库构建,基于云技术和深度机器学习的灾害风险智能判识及灾害智能预警系统等。

(5) 矿井灾害应急救援。行之有效的矿井灾害应急救援是减少人员伤亡和财产损失的重要保障。主要包括井下人员精准定位、灾害源探测、救灾通信及应急智能决策等。

煤炭精准开采涉及领域广泛、内容纷繁复杂,冲

击地压、煤与瓦斯突出等动力灾害是中国深部开采煤矿面临的突出问题之一,普遍存在采集传感可靠性差、多网融合传输手段缺乏、多源信息挖掘困难及大尺度、区域性煤矿灾害监控预警缺乏等问题,导致动力灾害预警的盲目性和不确定性,对于实现灾害精准预警极为困难。本文以煤矿动力灾害精准预警物联网为例,探讨煤矿动力灾害精准预警物联网体系架构及其工程应用。

## 4 煤矿动力灾害精准预警物联网架构

### 4.1 体系架构

煤矿动力灾害精准预警物联网是在煤炭精准开采的理念指导下,利用灾害前兆信息采集传感与多网融合传输技术、多源海量前兆信息提取挖掘方法,实现煤矿动力灾害前兆信息智能感知、风险判识及精准预警的新模式、新方法。其体系架构主要包括感知层、网络层、应用层和公共技术,如图3所示。

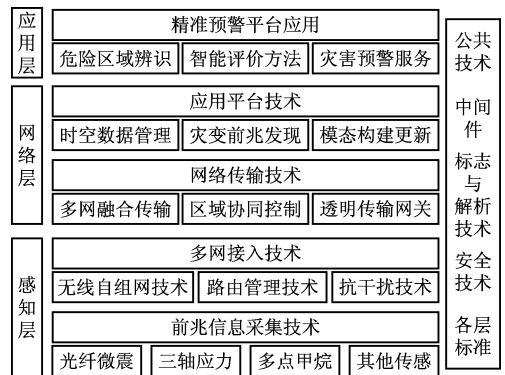


图3 煤矿动力灾害精准预警物联网架构

Fig.3 Framework of IoT for dynamic disaster precision early warning of coal mine

(1) 感知层。感知层是煤矿动力灾害精准预警物联网发展与应用的基础,主要包括前兆信息采集技术和多网接入技术。前兆信息采集技术主要是通过研制光纤微震传感、三轴高灵敏度应力传感、分布式多点激光甲烷监测、钻屑瓦斯解吸指标和钻孔瓦斯涌出初速度测量等泛在传感技术及装备,实现灾害前兆信息的深度感知、高精度监测。多网接入技术主要包括无线自组网技术、路由管理技术、抗干扰技术等。通过研制井下受限空间内 ZigBee, 6LoWPAN, WiFi 无线自组网及路由管理技术及装备,开发基于分布式总线的信号连续均匀覆盖的技术及装备,实现非在线监测数据的灵活接入;通过开发多系统近址共建电源防护及空间布设、多网融合各系统自身抗电磁干扰、干扰源分析及分布规律建模等技术,解决系统及装备的高可靠、抗干扰

问题。

(2) 网络层。网络层是煤矿动力灾害精准预警物联网数据处理的核心,主要包括网络传输技术和应用平台技术。网络传输技术主要包括多网融合传输、区域协同控制、透明传输网关等。通过开发电力载波技术和多制式数据透明传输技术,实现传感数据透明接入和共网可靠传输;通过研制相关传输标准及区域协同控制技术与装备,实现区域多源信息的采集、解析、融合及协同控制。应用平台技术主要包括时空数据管理、灾变前兆发现和模式自动构建与更新等。针对煤矿井下多源海量的传感器数据,创建面向煤矿动力灾害的动态信息快速分析模型与压缩算法,实现动力灾害精准预警的多源数据特征保留、简约传输和存储。通过构建动态潜在煤矿动力灾害前兆信息分析和反走样模型,实现灾变前兆信息模式的自动构建与更新,提出面向煤矿动力灾害预警的多粒度知识发现与预测方法,解决煤矿动力灾害前兆特征信息提取与模式构建等难题。

(3) 应用层。应用层是煤矿动力灾害精准预警物联网发展的目的,主要包括危险区域辨识、智能评价方法和灾害预警服务等。采用大数据深度学习理论,提出面向灾变区域预测模型的全息全局学习方法,进而发现煤矿动力灾害事故的内在规律。根据煤矿动力灾害致灾因素的时空耦合特性,利用煤矿动力灾害多元信息数据仓库和四维时空地理信息系统,对煤矿动力灾害可能涉及的危险区域进行快速辨识和动态圈定,提高煤矿动力灾害危险区域预测预报的准确率。利用多元数据融合理论,对圈定的危险区域的隐患、风险、危险程度进行智能评价和定级,并进行预警和解警信息的实时生成和发布。

(4) 公共技术。公共技术是煤矿动力灾害精准预警物联网的跨层技术,服务于以上3个层面,主要包括中间件、标志与解析技术、安全技术和各层标准等。比如多网融合接口标准、预警知识库、模型库、方法库及行业标准库等。通过构建冲击地压、煤与瓦斯突出等动力灾害知识库,形成区域内煤矿动力灾害数据的互联互通。研究基于并行计算模型的多元异构数据的抽取、关联、聚合方法,提取致灾因素。探索基于人工神经网络等技术,建立煤矿动力灾害致灾因素对应向量的相似性计算模型。研究基于分布式并行计算及深度机器学习算法,建立区域煤矿动力灾害风险智能判识模型。

#### 4.2 工程应用

煤矿动力灾害精准预警物联网利用面向冲击地

压、煤与瓦斯突出灾害多源信息融合的挖掘分析技术及软件,将分析结果实时反馈至监测预警系统平台。通过远程在线区域监控预警系统平台,可实现灾害远程在线智能预警,进而指导示范矿井动力灾害治理。

目前已初步建立矿山动力灾害远程在线监测预警实验研究系统,可实现“矿井-矿业集团-远程监测预警中心”三级监测,并在陕西煤业化工集团进行系统综合平台应用示范工程,运用初步建成的基于大数据与云技术的冲击-突出复合型动力灾害多参量精准预警平台(图4),成功预测预警到胡家河煤矿2016年10月27日冲击地压事件。在山东能源集团建立了冲击地压监控预警平台系统,成功对现场冲击地压灾害进行了预警和解危。

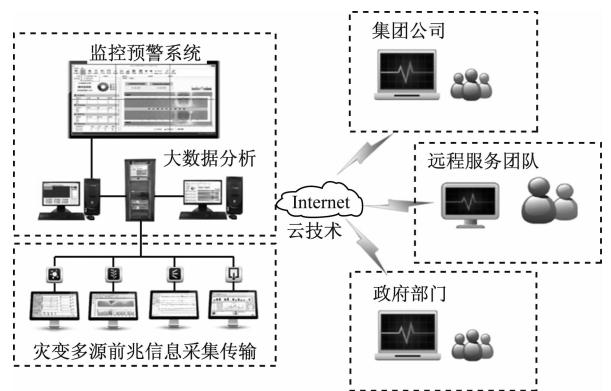


图4 冲击-突出复合型动力灾害多参量精准预警平台

Fig. 4 Precision early warning platform of multi parameters for rock burst-gas outburst combined dynamic disaster

## 5 展望

实现煤炭精准开采,任重而道远。结合当前煤炭工业发展现状和信息化技术水平,面向煤矿精准开采的物联网关键技术研究紧密围绕其体系架构,将分2步实施:第1步是逐步建设煤炭生产各子系统的物联网,主要包含采掘系统、运输系统、通风系统、排水系统、洗选系统及其他辅助系统等,实现子系统装备与子系统流程的智能化;第2步是实现全矿井的智能化,达到通信网与互联网在煤矿综合应用的最高境界,实现广泛意义上的煤矿设备自动化和生产管理智能化。建议政府主管部门和煤炭行业高度重视矿山物联网科技创新,借力新一轮的产业革命,力争在矿山物联网领域取得颠覆性技术突破,全面提升中国煤矿智能开采与管理水平,助推煤炭精准开采落地生花。

## 参考文献(References):

- [1] 王安,杨真,张农,等. 矿山工业 4.0 与“互联网+矿业”:内涵、架构与关键问题[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版),2017,19(2):54-60.  
WANG An, YANG Zhen, ZHANG Nong, et al. Connotation, framework and critical issues of mine industry 4.0 and Internet plus mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology (Social Sciences), 2017, 19(2): 54-60.
- [2] 袁亮,薛俊华,刘泉声,等. 煤矿深部岩巷围岩控制理论与支护技术[J]. 煤炭学报, 2011,36(4):535-543.  
YUAN Liang, XUE Junhua, LIU Quansheng, et al. Surrounding rock stability control theory and support technique in deep rock roadway for coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 535-543.
- [3] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(16):2803-2813.  
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [4] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016,41(1):1-6.  
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6.
- [5] 袁亮,秦勇,程远平,等. 我国煤层气矿井中-长期抽采规模情景预测[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 529-534.  
YUAN Liang, QIN Yong, CHENG Yuanping, et al. Scenario predication for medium-long term scale of coal mine methane drainage in China[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 529-534.
- [6] YUAN Liang. Theory and practice of integrated coal production and gas extraction [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(1): 3-11.
- [7] 李红臣. 互联网+安全生产[J]. 现代职业安全, 2015(6):40.
- [8] 吴立新,殷作如,邓智毅,等. 论 21 世纪的矿山——数字矿山[J]. 煤炭学报, 2000,25(4):337-342.  
WU Lixin, YIN Zuoru, DENG Zhiyi, et al. Research to the mine in the 21st century: digital mine[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(4): 337-342.
- [9] 吴立新,汪云甲,丁恩杰,等. 三论数字矿山——借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J]. 煤炭学报, 2012,37(3):357-365.  
WU Lixin, WANG Yunjia, DING Enjie, et al. Thirdly study on digital mine: serve for mine safety and intellimine with support from IoT[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 357-365.
- [10] 丁恩杰,赵志凯. 煤矿物联网研究现状及发展趋势[J]. 工矿自动化, 2015,41(5):1-5.  
DING Enjie, ZHAO Zhikai. Research advances and prospects of mine Internet of things[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(5): 1-5.
- [11] 徐静,谭章禄. 智慧矿山系统工程与关键技术探讨[J]. 煤炭科学技术, 2014,42(4):79-82.  
XU Jing, TAN Zhanglu. Smart mine system engineering and discussion of its key technology[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(4): 79-82.
- [12] 卢新明,尹红. 数字矿山的定义、内涵与进展[J]. 煤炭科学技术, 2010,38(1):48-52.  
LU Xinming, YIN Hong. Definition, connotations and progress of digital mine [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(1): 48-52.
- [13] 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.
- [14] 孟磊,丁恩杰,吴立新. 基于矿山物联网的矿井突水感知关键技术研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(8): 1397-1403.  
MENG Lei, DING Enjie, WU Lixin. Research on key technologies of water inrush perception based on mine IoT[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(8): 1397-1403.
- [15] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等. 论科学采矿[J]. 采矿与安全工程学报, 2008,25(1):1-10.  
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin, et al. On scientized mining [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2008, 25(1): 1-10.
- [16] 谢和平,王金华,申宝宏,等. 煤炭开采新理念——科学开采与科学产能[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1069-1079.  
XIE Heping, WANG Jinhua, SHEN Baohong, et al. New idea of coal mining: scientific mining and sustainable mining capacity[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(7): 1069-1079.
- [17] 王家臣,刘峰,王蕾. 煤炭科学开采与开采科学[J]. 煤炭学报, 2016,41(11):2651-2660.  
WANG Jiachen, LIU Feng, WANG Lei. Sustainable coal mining and mining sciences[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2651-2660.

- [18] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1):1-7.  
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1):1-7.
- [19] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205-213.  
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2):205-213.
- [20] 赵毅鑫, 姜耀东, 祝捷, 等. 煤岩组合体变形破坏前兆信息的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2):339-346.  
ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, ZHU Jie, et al. Experimental study on precursory information of deformations of coal-rock composite samples before failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2):339-346.
- [21] 刘泉声, 刘学伟. 多场耦合作用下岩体裂隙扩展演化关键问题研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2):305-320.  
LIU Quansheng, LIU Xuewei. Research on critical problem for fracture network propagation and evolution with multifield coupling of fractured rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 305-320.
- [22] 于庆, 赵新权, 黄强, 等. 新型智能多参数检测报警仪的研制[J]. 矿业安全与环保, 2001, 28(6):8-10.  
YU Qing, ZHAO Xinquan, HUANG Qiang, et al. Development of novel intelligent multi-parameter detection alarm[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2001, 28(6):8-10.
- [23] 张申, 丁恩杰, 徐钊, 等. 物联网与感知矿山专题讲座之二——感知矿山与数字矿山、矿山综合自动化[J]. 工矿自动化, 2010, 36(11):129-132.  
ZHANG Shen, DING Enjie, XU Zhao, et al. Part II of lecture of Internet of things and sensor mine-sensor mine, digital mine and integrated automation of mine [J]. Industry and Mine Automation, 2010, 36(11): 129-132.
- [24] 温家宝. 2010年政府工作报告[EB/OL]. (2010-03-15) [2017-05-12]. [http://www.gov.cn/2010lh/content\\_1555767.htm](http://www.gov.cn/2010lh/content_1555767.htm).