



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Clean Energy—Review

我国煤矿智能化采煤技术的最新发展

王金华, 黄曾华*

China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100013, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 May 2017

Revised 9 July 2017

Accepted 10 July 2017

Available online 7 August 2017

关键词

智能开采
综采工作面
无人操作
LASC
智能开采服务中心

摘要

跟踪近五年国内煤矿智能开采新技术、国外 LASC (Longwall Automation Steering Committee, 澳大利亚综采长壁工作面自动控制委员会) 技术和 IMSC (Intelligent Mining Service Center, 智能开采服务中心) 技术的发展, 本文分析了“十二五”期间攻克的综合成套装备感知、信息传输、动态决策、协调执行和高可靠性等智能开采关键技术以及研制的具有自主知识产权的综合成套装备智能系统, 形成了现阶段可行的“无人操作、有人巡视”的智能化开采模式。通过总结针对中厚和厚煤层进行的智能化开采实践, 表明智能化开采技术可将工人从危险的工作面采场解放到相对安全的巷道监控中心甚至地面调度中心, 大幅减少了工作面的操作人员。最后, 探讨了在智能化开采技术研究过程中存在的难题, 并展望了未来十年机器人等新技术在智能化开采中的应用前景。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

智能化开采是在机械化开采、自动化开采基础上, 信息化与工业化深度融合的煤炭开采技术的深刻变革 [1], 是指在不需要人工直接干预的情况下, 采掘装备通过智能感知、智能调控、自主导航独立完成采掘作业的过程。智能化开采具有三方面技术内涵: ①采掘设备具有智能化的自主作业能力; ②实时获取和更新采掘工艺数据, 包括地质条件、煤岩变化、设备方位、开采工序等; ③能根据开采条件变化, 自动调控采掘过程。当智能化采掘设备与自动调度决策集为一体时, 工作面即为智能化开采工作面 [2]。

针对我国煤矿综采工作面生产过程复杂、开采装备系统庞大、作业环境恶劣等特点, 煤炭行业产学研部门

通力合作, 经过“十二五”期间的不懈探索和努力, 先后攻克了综采成套装备感知、信息传输、动态决策、协调执行、高可靠性等关键技术, 研制出具有自主知识产权的综合成套装备智能系统, 成功在煤矿工作面实现了“无人操作、有人巡视”的智能化开采模式, 工作面所有设备均由设在巷道和地面的调度中心进行远程操控, 该技术和实际应用效果达到了国际领先水平, 引领了我国煤炭科学开采的发展方向。图1列出了我国煤炭开采从手工到智能的发展过程。

2. 国外智能开采技术

澳大利亚、德国和美国等发达国家在煤炭开采技术上领先于中国。近几年, 我们主要跟踪了澳大利

* Corresponding author.

E-mail address: huayi@tdmarco.com

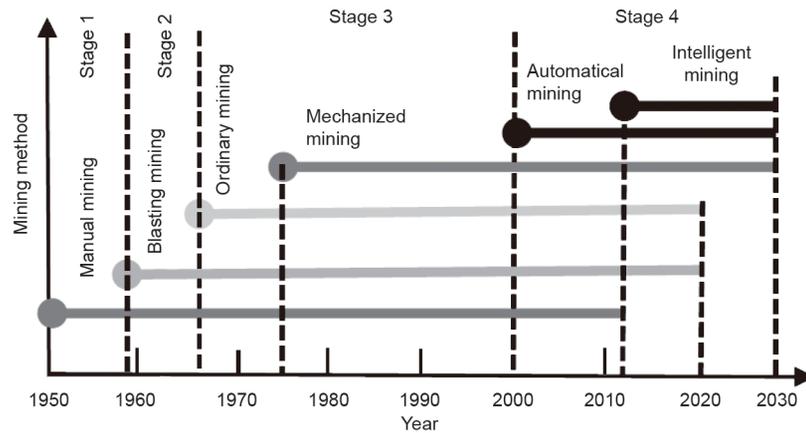


图1. 智能化开采技术阶段。

亚联邦科学院的LASC (Longwall Automation Steering Committee, 澳大利亚综采长壁工作面自动控制委员会) 技术和美国JOY公司的IMSC (Intelligent Mining Service Center, 智能开采服务中心) 技术, 以下简要介绍智能化新技术的应用情况。

2.1. LASC 技术

澳大利亚综采长壁工作面自动控制委员会开展了煤矿综采自动化和智能化技术的研究[3], 通过采用高精度光纤陀螺仪和定制的定位导航算法取得了三项主要成果: 采煤机三维精确定位(误差 $\pm 10\text{ cm}$)、工作面矫直(误差 $\pm 50\text{ cm}$)和工作面水平控制, 完成了工作面自动化系统原型, 同时增加了采煤机自动控制、煤流负荷平衡、巷道集中监控功能, 在澳大利亚得到了快速应用。通过结合钻孔地质勘探资料与掘进数据, 描述了工作面煤层的赋存状态, 采用陀螺仪获知采煤机的三维坐标, 两者结合实现工作面的全自动化割煤, 该创新成果突破了煤岩识别难题。LASC核心技术包括: 采煤机的三维空间定位、自动工作面拉直、保持工作面平直、自动调高控制、3D可视化远程监控[4]。图2列出了LASC技术在澳大利亚等国家煤矿的应用情况。目前, 天地科技股份有限公司正在和澳大利亚联邦科学研究院开展合作, 在引进、消化、吸收的基础上实现新的创新, 将LASC技术应用于我国高产、高效大采高综采工作面, 全面提高我国智能开采技术水平。

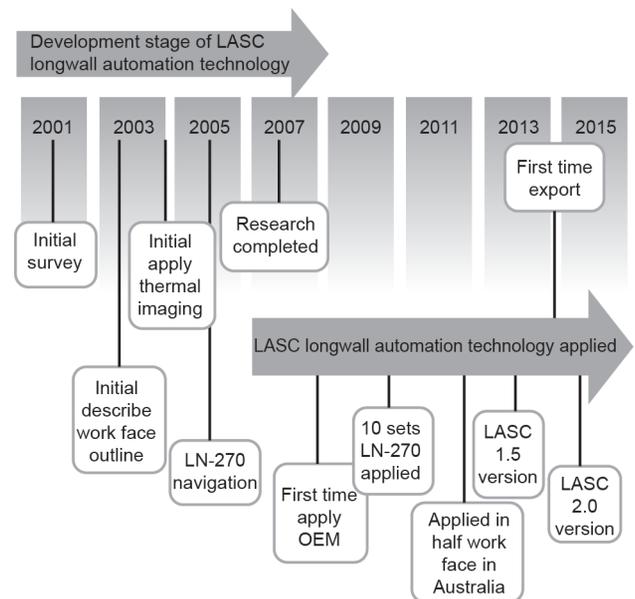


图2. LASC智能开采技术发展过程。

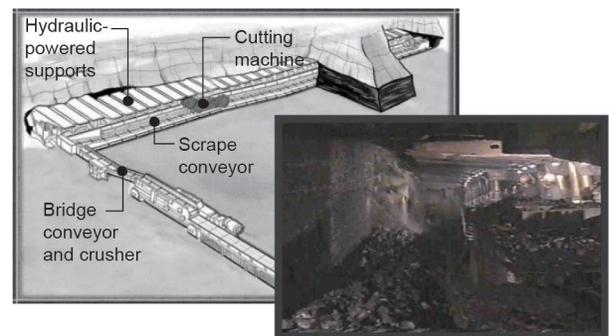


图3. JOY智能开采服务中心对综采设备监控。

2.2. IMSC 技术

智能开采服务中心是美国JOY公司推出的一种适用于长壁工作面的远程智能控制系统, 可对煤矿设备运行数据实时监控, 根据工作面出现的报警、故障信息, 能及时发邮件或电话通知工程师进行调整(图3)。

智能开采服务中心每日、周、月和季度向煤矿提交运行分析报告, 指导煤矿提高运行管理水平, 合理安排设备检修。例如, 澳大利亚布里斯班的Anglo矿业公司在总部设置总调度室, 对所管辖矿井进行实时监控, 利用数据监测和分析系统, 分析生产过程设备运行参数,

对矿井生产给予指导，取得了提高15%产能的经济效益[5]。

3. 国内智能化开采技术新进展

我国煤矿的智能化开采在最近十年尤其是“十二五”期间取得了长足进步，开启了智能化开采的新时代。以采煤机记忆截割、液压支架跟机自动化和可视化远程监控为基础及以智能控制软件为核心，实现了在地面（或巷道）综合监控中心对综采设备的智能监测与集中控制，确保工作面割煤、推溜、移架、运输、除尘等智能化运行，达到了工作面连续、安全、高效开采。新成果另辟蹊径地诠释了国内智能化开采技术的新概念。

3.1. 智能化开采新模式的探索

当前国内的智能化开采技术水平，在控制系统架构、控制方式、响应时间、智能功能、工作面人数、产能等主要技术指标方面都处于国际领先，开发了“巷道监控中心可视化远程割煤、采场无人操作”的新技术，创新“无人跟机作业，有人安全值守”的开采理念，在采煤过程中做到工作面内无人操作，构建了“以工作面自动控制为主，监控中心远程干预为辅”的工作面智能化生产模式，设计了人工干预下模糊控制多工序的采煤工艺，实现了采煤技术的深刻变革。

智能开采控制技术打破了传统的以单机装备为主、总体协调的研制思路，建立了以成套装备总控制网络信息综合决策为主、单机装备为执行机构的体系结构。将采煤机、液压支架、刮板输送机、转载机、破碎机、巷道胶带机、供液系统、供电系统等装备有机结合起来，构建成一个相互联系、相互依存、相互制约的采煤系统，依据系统控制决策模型分析结果，实现对综采成套装备的协调管理与集中控制。

3.2. 智能化开采技术

在综采工作面自动化监控中心，工人可通过显示器

观察到工作面的情况，通过语音进行调度、联络、调控，通过操作台远程操控工作面上的相关设备，实现在监控中心对所有综采设备进行远程控制。同样，在地面调度指挥中心也可以实现对综采工作面的采煤机、液压支架、输送机、泵站及供电系统进行远程监测、操控。各种数据的实时显示，为地面管理人员提供实时的井下工作面生产和安全信息[6,7]。

3.2.1. 智能化开采工艺

实现智能化开采，需要对采煤工艺进行技术创新，主要包括以下内容。

(1) 采煤机自动化开采工艺：利用开发的记忆截割程序，实现采煤机在工作面的自动截割运行。在采煤机牵引部安装定位传感器，通过控制器的数据处理，利用位移信息，精确实现采煤机位置定位。

(2) 支架及刮板机自动跟随采煤机工艺：这个工艺的基础技术是液压支架的电液控制与采煤机的记忆截割模式的有机结合。在开采过程中，需要对工作面三机设备（采煤机、刮板输送机、液压支架）的实时工况、姿态进行检测和故障诊断，保证整个工作面设备在最佳状态下运行。工作面数据可远距离传输，让用户在巷道监控中心和地面监控室随时了解采煤机的整机实时运行状态。

(3) 煤流负荷反馈采煤控制工艺：实时检测刮板输送机上的煤流负荷分布，通过变频技术控制刮板输送机的传输速度，实现工作面采装运的自动协调运行。

3.2.2. 煤岩监测技术

现阶段综采工作面自动化还需要高清晰度的视频监控，每隔6台支架在顶梁上安装1台监控支架的矿用本质安全型高清晰摄像机，照射方向与工作面平行。每隔3台支架在顶梁上安装1台监控煤壁摄像机，照射方向与工作面垂直，其采集的视频数据通过工业以太网网络传输到矿用显示器，实时更新图像处理后的煤岩分界标线[8]，如图4所示。



图4. 摄像仪对煤壁侧的煤岩分界图像进行采集。

3.2.3. 远程控制技术

在巷道监控中心，计算机控制采煤机和液压支架等开采设备的各种动作。采煤机通过远程计算机进入记忆截割模式，实现自动运行、自动调高、卧底、加速、减速功能，同时，根据工作面运行情况，可以随时干预调整采煤机运行。矿用本质安全型采煤机远程操作台，主要用于远程集中控制三机设备的启停、断电和急停，从而提高工作效率，减轻工人的劳动强度，改善作业环境。

3.2.4. 连续推进技术

在综采工作面的三直两平（煤壁直、输送机直、支架直，顶机平、底板平）中，输送机保直是基础。由于煤层的起伏和地质环境的变化，工作面设备的非可视测量是一个技术难题，还要考虑采煤机截割时产生的煤尘对测量结果的影响，不能简单地采用地面常规的激光定位技术和经纬测量技术。因此，采用激光矩阵测量技术，可以实现工作面相邻支架位置偏差不得超过10 cm，满足了支架对齐的要求，从而保证了输机的平直度，如图5所示。

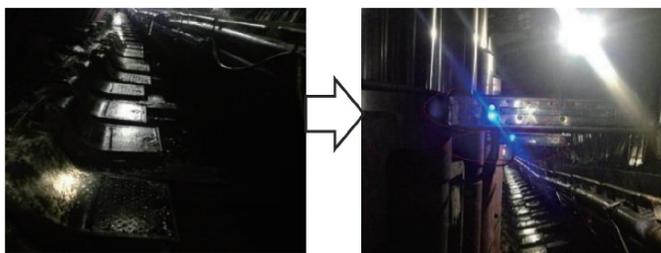


图5. 支架对齐技术保证支架的平直度。

3.3. “十二五”期间智能化开采的技术水平

“十二五”期间，我国在煤矿智能化开采技术方面投入了大量的研发力量，取得了突破性进展，达到了开采行业内的国际领先水平。

(1) 直接减少采煤工作面操作人员，由原来的每班30~50人减少到每班5~7人，人员的减少为煤矿开采的安全高效生产提供了有力的保障。

(2) 将工人从危险、恶劣的工作面内解放到相对安全的巷道监控中心，显著地降低了工人的劳动强度，改善了工人的劳动环境。

(3) 在同等的地质、生产技术条件下提高产量，显著提高了煤矿的经济效益。

(4) 智能化开采是一次采煤工艺的飞跃，提升了我国煤矿的综采技术水平，对煤矿安全高效生产、行业技

术进步、产业升级具有重要意义。

实现采煤生产的技术革命，需要开发技术的飞跃性突破，综采工作面从自动化到智能化技术系统，集成了越来越多的现代科学技术。从采煤机械化到自动化和智能化的技术发展框架如图6所示。

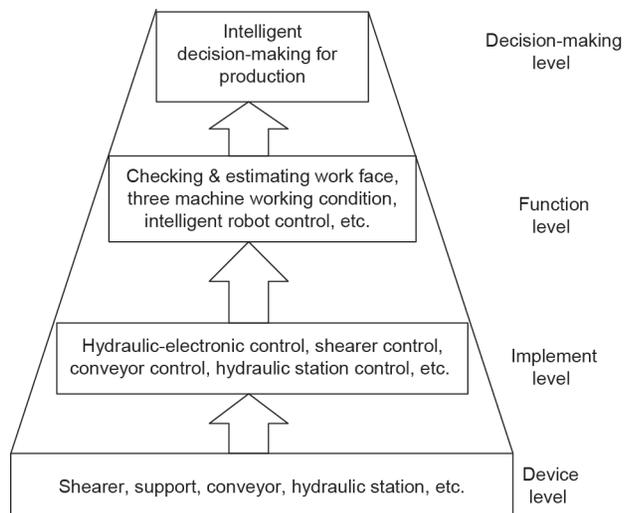


图6. 中国煤矿智能化开采技术框架。

3.4. 智能化工作面工程实践

自从2000年以来，智能化开采先后在神东煤炭集团、宁夏煤业集团、中煤集团、陕西煤业化工集团、大同煤矿集团、阳泉煤业集团、平顶山煤业集团、晋城煤业集团、峰峰集团、新集口孜东等40多个矿区进行试验和生产。例如，根据神华宁夏煤业集团综采工作面中厚煤层的赋存特点、地质条件，应用智能化技术突破传统模式的采煤工艺方法，实现了中厚复杂地质条件综采工作面的安全、经济、高效开采，其某一智能化工作面的开采情况见表1。

表1 神华宁夏煤业集团中厚煤层智能化工作面生产统计

Period	Miners	Producing days	Working hours (8 h per shift)	Numbers of cutting	Yield (t)
August 2013	3	31	62	16	400 500
March 2014	2	30	60	16	425 800
April 2014	1	31	62	18	465 000

中澳合作的项目——LASC技术2016年8月初在兖矿集团的转龙湾煤矿下井试验。试验开始以来，LASC共检测到工作面曲线440多条，以厘米级精度描绘了每刀过后输送机的形态。

2016年8月24日，转龙湾23303工作面实现RSS全工

作面跟机自动化、LASC自动找直，精度准确，符合要求，达到了预期效果。

4. 存在的问题和发展方向

4.1. 智能化开采的技术难点

综采工作面是在地球内部几百米深度的一个随时变化的立体矩形采场，由于在采煤过程中打破了煤层中的应力平衡，矿山压力的加大导致煤壁大面积片帮、瓦斯和水突然涌出，严重威胁安全生产，这些给智能化开采技术的发展和推广带来新的难题。

4.1.1. 地质围岩智能化探测难题

工作面三维地质模型的建立，能准确反映出煤层起伏、倾角、断层、陷落柱等地质构造，用于指导采煤机俯仰采控制和摇臂调高、煤岩自动识别、围岩控制。模型的建立不仅需要巷道掘进数据和钻孔资料，还需要工作面前方未采动区的数据，然而，如何直接探测煤壁前方地质构造，尚无有效手段。

4.1.2. 开采智能化决策难题

目前的智能化开采系统是以过程化控制为核心，没有与生产管理有效地衔接，信息集成和互通尚不健全，不能有效地对综采关键设备进行智能管理以及为生产管理者提供决策建议[9]。由于开采地质条件的不断变化、煤层赋存状态的不确定性，智能开采还不能完全离开人的智慧，需要发挥机器人和各自的特长，规避人机各自的短处，因此现阶段还不能完全离开人的干预和控制。

(1) 设备可靠性问题：智能化离不开高可靠性的综采设备，在此基础上增加感知、决策、控制和智能化功能，由单机向成套装备智能化转变。

(2) 开采恶劣环境下可视化难题：由于开采时产生的煤岩粉尘会严重影响视频图像的采集，因此需要研究高清晰度和低延时的开采场景再现技术，实时捕捉现场运行变化，为远程控制提供更好的基础。

(3) 复杂条件下的自感知技术难题：由于地下采煤工作面条件复杂、时刻移动、千变万化，对采煤工作面的条件变化数据进行实时跟踪、准确记录、分析判断、科学利用是采煤智能化遇到的最大的技术难题[10]。

因此，需要建立工作面自动化专家决策系统，融合“人、机、环、管”过程的数据和信息，进行深度数据挖掘，从而实现对工作面的“预测、预判、预控”[11]。

4.2. 智能化开采方向

信息技术尤其是光电技术的发展对煤炭智能化开采的作用越来越大，适时地引入新技术对综采智能化技术升级是必要的。

4.2.1. 基于实时三维GIS的智能化开采导航技术

智能导航是指利用先进的计算机、光电和导航技术对开采设备（如工作面三机设备）和人员进行自动定位，以实现安全监控和精确开采，如图7所示。

实时三维地理信息系统(Geographic Information System, GIS)开发将地理信息、三维可视化及工作面相关探测技术相结合，建立工作面地质数据模型，分析模型的拓扑关系，开发形成工作面三维可视化GIS，为综采工作面的智能化管理与决策提供依据。核心研究内容包括工作面三维空间定位、工作面扫描、工作面智能化控制和工作面三维可视化。

4.2.2. 巡检机器人在智能化开采中的应用

通过在采掘设备上加装具有合适光源和视觉、听觉、振动等传感器的遥控机器人，经过人工智能化处理，可以维护和管理智能开采工作面的自主开采作业。开采机器人是智能化开采系统强有力的补充，将逐步取代人类在危险的综采工作面从事的一些非日常的工作。需要跟踪研究开采机器人的关键技术，以使其在智能化工作面发挥更大的作用。

图8是一种安装在工作面上监控开采生产的巡检机器人系统，可以大大减少目前布置在整个工作面的监控

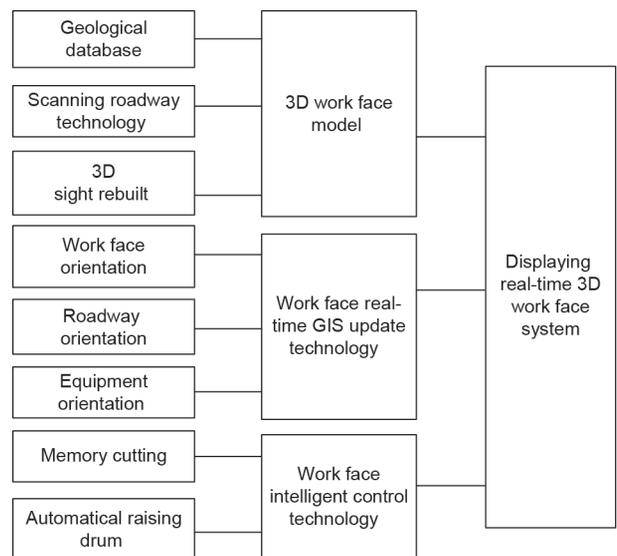


图7. 基于实时三维GIS的智能化开采导航技术体系。

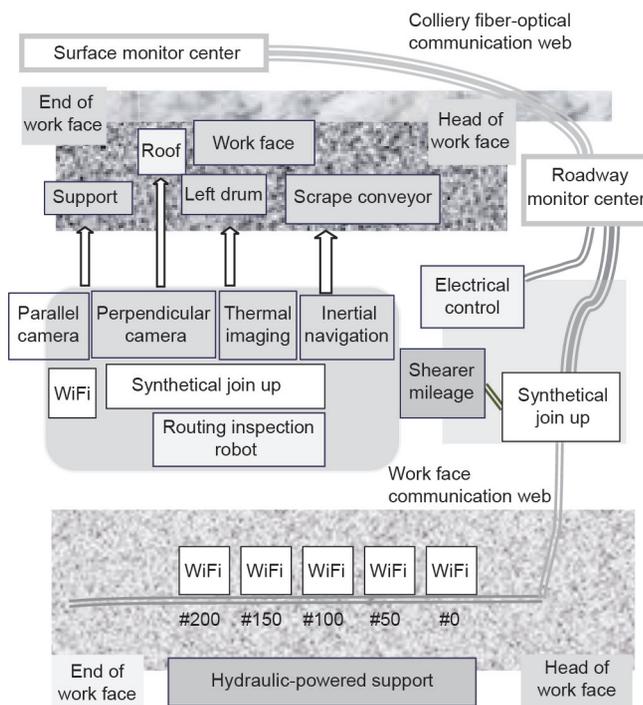


图8. 工作面上的巡检机器人的组成结构。

设备数量。机器人技术将是未来采煤智能化技术的发展方向。

5. 结论

对智能化开采的研究和实践，推动了采煤产业的技术升级，取得了一系列的技术突破，但也还有许多需要迫切解决的技术问题，总结如下。

(1) 智能开采将工人从危险的采场解放到相对安全的巷道中甚至地面，是迈向煤矿本质安全最重要的一次进步。

(2) 智能开采提高了投入与产出比，节能安全，减人提效，是采煤产业的一次技术革命。

(3) 通过研制智能开采装备，提升了我国机电制造业和智能化控制的整体水平。

(4) 我国智能化开采尚处于起步阶段，技术、工艺和管理上还有许多未解决的问题，需要在传感、控制、物联网和开采智能机器人等方面加大研发投入。

(5) 由于工作面煤层赋存状态，顶、底板条件的变化，矿压和瓦斯涌出等都会影响综采工作面连续安全生产，适应复杂地质条件下的智能化开采技术是未来研究的重点。

Compliance with ethics guidelines

Jinhua Wang and Zenghua Huang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Wang JH, Wang YG, Fu JH. Crucial technology research and demonstration of digital mines. *J China Coal Soc* 2016;41(6):1323–31. Chinese.
- [2] Wang JH, Huang ZH. Innovation and development of intelligent coal mining science and technology in China. *Coal Sci Tech* 2014;42(9):1–6.21. Chinese.
- [3] Wang JH, Huang LT, Li SB, Huang ZH. Development of intelligent technology and equipment in fully-mechanized coal mining face. *J China Coal Soc* 2014;39(8):1418–23. Chinese.
- [4] Ge SR, Wang ZB, Wang SB. Study on key technology of internet plus intelligent coal shearer. *Coal Sci Tech* 2016;44(7):1–9. Chinese.
- [5] Wang GF, Li ZP, Zhang JH. Key technology of intelligent upgrading reconstruction of internet plus high cutting coal mining face. *Coal Sci Tech* 2016;44(7):15–21. Chinese.
- [6] Ralston J, Reid D, Hargrave C, Hainsworth D. Sensing for advancing mining automation capability: A review of underground automation technology development. *Int J Mining Sci Tech* 2014;24(3):305–10.
- [7] Wang H. Development orientation and research state on intelligent key technology in fully-mechanized coal mining face. *Coal Sci Tech* 2014;42(1):60–4. Chinese.
- [8] Huang SJ. Digital video technology applied to automatic coal mining face. *Coal Eng* 2014;46(2):136–8. Chinese.
- [9] Ge SR. Key technology of intelligent coal mining equipment. *Coal Sci Tech* 2014;42(9):7–11. Chinese.
- [10] Tian CJ, Wei WY, Zhu XL. Automatic following coal-cutter technology of based on SAC electrohydraulic control system in powered support. *Coal Mining Tech* 2012;17(2):46–50. Chinese.
- [11] Zhang L, Li SB, Huang ZH, Wang XM. Definition and realization of unmanned mining in fully-mechanized coal mining face. *Coal Sci Tech* 2014;42(9):26–9. Chinese.