

## 机电与自动化

# 综掘装备技术研究现状及发展趋势

王焱金<sup>1</sup> 张建广<sup>2</sup> 马昭<sup>1</sup>

(1. 山西天地煤机装备有限公司,山西 太原 030006; 2. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司,山西 太原 030006)

**摘要:** 针对综掘工作面掘进装备的技术、应用现状和存在的问题,介绍了导致采掘失衡的关键问题,以及国内掘进机在技术性能方面与国外存在的差距;指出了硬岩截割过程中影响截齿寿命的主要影响因素及原因,分析了国内外掘进机在自适应截割、工况检测及故障诊断、截割路径规划、煤岩识别、机身定位定向、状态监测及远程通信等智能化技术方面取得的进展,阐述了综掘配套装备及关键技术的现状,最后提出了我国综掘装备的发展方向与建议。

**关键词:** 掘进机; 综掘装备智能化; 硬岩截割; 除尘系统

中图分类号: TD26 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2015)11-0087-04

## Research status and development tendency of mine fully-mechanized heading equipment technology

Wang Yanjin<sup>1</sup> Zhang Jianguang<sup>2</sup> Ma Zhao<sup>1</sup>

(1. Shanxi Tiandi Coal Mining Machinery Company Limited, Taiyuan 030006, China;

2. Taiyuan Research Institute Company Limited, China Coal Technology and Engineering Group, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** According to the technology application status and existed problems of the heading equipment applied to a fully-mechanized roadway heading face, the paper introduced key technical bottleneck of the mining and excavation unbalance and the gap between the technical performances of the domestic roadheader and the overseas. This paper pointed out the main factors affected to the service life of the picks during the hard rock cutting process and the causes. This paper analyzed the achieved progresses in the adaptive cutting performance detection and fault diagnosis, planning of the cutting route, coal and rock recognition, positioning and orientation of the machine body, status monitoring and measuring, remote communication and other intelligent technology aspects and stated the present status of the matched equipment and key technology of the fully-mechanized heading. Finally, the paper provided the development direction and proposals on China fully-mechanized heading equipment.

**Key words:** roadheader; fully-mechanized heading equipment intelligent; hard rock cutting; dust control system

## 0 引言

随着我国煤矿综采技术装备与矿井配套设施的快速发展,开采强度成倍增加,使煤矿井下巷道掘进工程量剧增,“采掘失衡、采掘接续”的矛盾日益突出<sup>[1]</sup>。近些年,煤矿全岩巷道不断增加,掘进装备向超重型大功率方向发展的同时,对掘进机的截割能力和可靠性提出了新的要求。综掘装备水平直接

关系到煤矿生产能力和安全,高效的综掘工作面机械化、自动化以及截割能力强的掘进装备是保证矿井实现安全高效的必要条件,也是巷道掘进技术的发展方向。因此提高掘进成套技术装备综合性能以及综掘工艺水平已成为煤矿可持续健康发展、安全高效集约化生产的重要保障。此外综掘配套装备的性能和安全清洁的作业环境等方面需要投入更多的技术支持<sup>[2-3]</sup>。基于此,笔者介绍了综掘装备及掘

收稿日期: 2015-03-17; 责任编辑: 赵瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2015.11.018

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA06A405)

作者简介: 王焱金(1964—),男,湖北鄂州人,研究员。Tel: 0351-7685015

引用格式: 王焱金,张建广,马昭. 综掘装备技术研究现状及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(11): 87-90, 21.

Wang Yanjin, Zhang Jianguang, Ma Zhao. Present research status and development tendency of mine fully-mechanized heading equipment technology [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(11): 87-90, 21.

进配套装备关键技术的研究和发展现状，并对其发展趋势提出了建议。

## 1 掘进机应用及发展现状

目前国外重型掘进机主要以质量 100 t 以上的 MT620、MT720、MK5、WAV300 等为主，国内外重型掘进机性能参数对比见表 1。国内现有掘进机产品截割功率主要为 30~500 kW、整机质量 18~150 t，从轻型到超重型的掘进机包括 20 多种系列，在煤矿井下煤及半煤岩，甚至全岩巷道的综合机械化掘进中广泛应用。我国重点煤矿煤及半煤岩巷掘进现阶段主要采用中型和重型掘进机，其截割功率在 120 kW 以上，整机质量在 35 t 以上，适应经济截割普氏系数为 4~6 的煤及半煤岩巷，型号主要有 EBZ120、EBZ160、EBZ220、S200A、EBZ260、EBZ300、EBH315 等，掘进机使用量的 80% 以上。随着煤矿开采程度的加深，全岩巷道掘进的任务逐渐增加，未来具有自动化功能的重型和超重型硬岩悬臂式掘进机是掘进机的主要发展方向。

表 1 国内外重型掘进机性能参数对比

Table 1 Comparison of performance parameters of heavy driving machine at home and abroad

型号	最大掘进	最大掘进	煤岩单向抗	整机	总功率/	截割功
	高度/m	宽度/m	压强度/MPa	质量/t	kW	率/kW
EBZ260	5.00	6.00	100	80	426	260/200
EBZ300	5.00	6.00	100	85	447	300
EBH315	5.83	7.01	120	135	533	315
MT720	6.60	9.10	120	135	555	300
MK5	5.35	7.75	120	120	590	>350

注：EBZ260、MT720 可实现遥控及断面显示功能；EBZ300 可实现遥控、故障诊断功能；EBH315 可实现遥控、断面显示、故障诊断功能；MK5 可实现故障诊断、集中自动润滑功能。

目前我国超重型岩巷掘进机的研制处在起步阶段，但发展迅速。国产大功率重型掘进机基本达到了国外同类型机型的技术性能，但也存在一定的差距。如截割性能参数偏低，截割刀具方面表现薄弱，元部件可靠性、自动控制技术、除尘技术等与国外差距较大。

## 2 国内外掘进装备关键技术及发展方向

### 2.1 硬岩截割技术

目前我国岩巷掘进大部分以钻爆法为主<sup>[3]</sup>，掘进机硬岩截割能力不足是限制综掘法全面推广的主要

因素。对此，国内外研究机构一直致力于综掘装备破岩机理的研究，并取得一定成果。另一方面，岩石的磨砺性也是重要影响因素，综掘装备的耐磨性也是硬岩截割能力的主要指标。

近年来对锥形截齿顶部钎焊的合金头结构和形式进行不断深入的研究，研制了基于铜基钎焊的多体组合硬质合金、高强度硬质合金以及基于镍基钎焊金刚石类合金头<sup>[4]</sup>。为促使截齿在齿座中旋转，使合金头均匀磨损，国内还研究了锥柄部分带有螺旋槽的截齿。在截割硬度较高的岩石时，常规锥形截齿受经济性和生产效率的综合限制，因此研制了基于滚压破岩原理的新型掘进机 Mobile Miner，其破岩方法、掘进机结构形式、控制方式等较传统掘进机实现了一定的突破，对岩石单向抗压强度可达 200 MPa，常规条件下的设计生产效率 32 m<sup>3</sup>/h，但最终因刀具消耗量等经济因素，未获得更广泛的应用。国际上研究了基于滚切破岩的技术，开发了集掘进、支护、装载、运输、除尘于一体的六臂移动式巷道掘进机，可开挖圆形、矩形等多种几何形式的巷道。使用盘型滚刀的滚切破岩技术形式的掘进机是未来采掘装备的发展方向<sup>[5~6]</sup>。

为验证不同破岩方式的有效性，众多研究机构先后研制了多种试验设备。按截齿运动轨迹类型可分为圆形截割轨迹试验台<sup>[7~8]</sup>和直线型截割轨迹试验台<sup>[9~11]</sup>。掘进机在与岩石的相互作用过程中，磨损集中体现在截割头体、截齿和齿座、星轮和扒爪及输送机等部件，截齿磨损如图 1 所示。



图 1 截齿磨损

Fig. 1 Pick wearing

当被截割对象的硬度和磨蚀性较高时，截齿无法有效切入岩体，对人工岩壁短时截割试验过程中，测定工作截齿的平均温度为 180 °C，最高瞬时温度接近 600 °C，以上主要因素导致截齿顶部硬质合金在高接触应力条件下发生明显磨损。当齿座设计或制造角度不佳或安装在齿座中的截齿缺失时，齿座顶部或侧面将会迅速出现磨损。截割头大端的磨损在纵轴式掘进机上尤为突出，这主要是由于扫底过程中截割头大端的薄壁结构以较高的线速度运行，以及长时间处于未及时运出的岩屑中造成的，对于

横轴式截割头,由于受减速器壳体结构的保护作用,磨损现象并不显著。在对被截落物料的装载和运输过程中,由于装运机构长期与岩屑接触且相对运动速度较高,在金属表面极易形成磨损。为解决磨损对掘进机各部件的影响,各种耐磨技术已获得了成功应用。例如在截齿锥柄部分采用激光熔敷技术,将0.2~0.5 mm的高性能耐磨材料熔敷到金属表面;适用于硬岩截割的部分型号截齿采用了性能更高的硬质合金;由于相对运动速度较高造成磨损的截割头大端薄壁结构、星轮末端以及装载机表面,均使用焊接复合耐磨板材或直接使用耐磨板材,有效降低磨损程度,提高零部件使用寿命。

## 2.2 掘进机智能化技术

智能化采掘技术是煤机装备技术由粗放型向精细化方向发展的必由之路,是提升综掘工作效率、降低工人劳动强度、实现煤矿安全高效生产的主要途径,世界各国在智能化关键技术方面进行了大量的研究工作。欧盟委员会煤炭与钢铁研究基金支持的NEMAEQ(2006—2009年)和ADRIS(2007—2010年)项目中<sup>[13~14]</sup>,与掘进机智能化相关部分主要包括煤岩识别技术、状态监测、故障诊断、通信技术、截割轨迹规划控制及仿真技术,使掘进机在截割过程中,自动调整整机状态及截割参数,实现掘进机自适应截割,该项目在井下试验中使用了多种传感器可供参考。波兰KOMAG采矿技术学会与西里西亚工业大学通过神经网络,将监测到的掘进机运行参数进行训练,得到煤岩的单向抗压强度,建立了地质条件识别系统。在自适应控制策略中使用该识别系统并结合机器实时状态和地质条件,自动调整操作参数和截割轨迹,该方法在实验室和煤矿现场都获得了成功应用<sup>[15~17]</sup>。澳大利亚相关学者一直致力于采掘机械基础理论和应用研究,有关截割参数对采掘设备状态影响的研究为掘进机控制技术提供了依据,开发的各类传感器为实现采掘机械自动化提供了有力支持<sup>[18~19]</sup>。

“十二五”期间掘进机的研究重点专注于智能化,掘进机智能化关键技术主要包括掘进机定位导向及姿态调整、截割轨迹规划<sup>[12]</sup>、地质条件识别及自适应截割、状态监测与故障诊断、远程通信及配套设备等技术。国内学者在智能化方面进行了许多探索工作,主要集中在自适应截割、截割轨迹规划等方面,通过利用模糊理论、遗传算法、神经网络等智能算法、专家系统等人工智能决策手段,控制截割转

速,达到截割参数最优匹配,使掘进机可以根据实际地质条件自适应调整截割速度,达到硬岩低速大扭矩、软岩快速高效截割的目的。并在各子系统及元部件上安装了大量的传感器,实时监测机器状态,进行故障诊断,在掘进辅助设备如运输、除尘等方面同样应用了自动控制技术。

## 2.3 掘进配套装备技术

巷道综合机械化快速掘进是一项系统工程,它是以掘进机为关键,形成集掘进、锚护、运输、除尘等为一体的相互配合、连续均衡及高效生产的作业线。综掘设备的生产效率制约因素很多,其中配套设备的性能起着重要作用。

1)掘锚支护技术。掘锚联合作业是适应煤矿巷道高效掘进的发展方向,将掘进和支护结合或组合于一起以完成掘锚工艺。目前掘锚一体机和掘锚成套机组主要有2种类型:<sup>①</sup>悬臂式掘进机集成液压锚杆钻机于一体,适应矩形、拱形和异形的煤岩巷道的掘进;<sup>②</sup>掘锚机组。目前国外掘进机机载锚杆钻机主要有AHM105等配套钻臂系统,国投新集矿业集团使用了机身一侧布置机载液压锚杆钻臂系统的EBZ300M型岩巷掘进机,其具有简单实用、安全高效的特点。掘锚机组采用掘锚一体化技术,可实现掘锚同步作业,主要适用于较软的煤和半煤岩巷,改善了在较差顶板条件下的支护效果,提高了掘进工效。目前国内已进口掘锚机组在神东、晋城煤业、宁夏煤业、兖矿集团等大型矿区使用。



图2 干式除尘系统

Fig. 2 Dry dust elimination system

2)转载运输技术。根据运输设备的不同,掘进作业线基本分为5种类型:<sup>①</sup>掘进机、桥式转载带式输送机和可伸缩带式输送机作业线;<sup>②</sup>掘进机、桥式带式转载机和刮板输送机作业线;<sup>③</sup>掘进机、运锚机、桥式转载带式输送机和可伸缩带式输送机,运锚机在截割过程中可实现物料的转运和锚杆的打设;<sup>④</sup>掘进机和梭车作业线;<sup>⑤</sup>掘进机、吊挂式带式输送机和矿车作业线。

3)综合除尘技术。目前,国内外主要有干式和湿式除尘系统,我国掘进工作面主要采用喷雾除尘

方式,这种方式可靠性差,效果不理想<sup>[1]</sup>;国际上使用的掘进工作面高效除尘系统,利用气流的附壁效应和气幕控尘原理实现了技术突破。

湿式除尘系统已实现了与掘进机的有效集成,干式除尘系统(图2)在我国煤矿也有应用,且除尘效果显著,整个巷道视线清晰,空气质量明显改善。经现场测试结果认定,干式除尘系统可大幅降低工作面粉尘浓度,效果优于湿式除尘系统。

### 3 掘进装备技术发展方向与建议

1) 建立截割刀具实验室等基础研究设施,进行新型破岩理论、新型截割刀具、降低截割功耗技术的研究和试验。

2) 积极开展掘进机的试验和研究,建立掘进机综合试验室,对掘进机整机进行负载项目测试和检验;建立适合我国煤矿地质条件的截割、装运及行走部载荷谱,进行综合分析仿真,形成完整的设计依据。

3) 以掘进机重要元件为重点,实现关键零部件、轴承、密封、电器元件、液压元部件等基础件的长寿命。

4) 运行工况监测和智能控制技术研究。

5) 发展综掘系统配套技术,通过系统集成,创新施工工艺,研究掘进工作面设备及技术成套解决方案。

### 4 结语

掘进装备整机向着重型化、大功率、高可靠性和自动化的方向发展,在掘进机定位导向及姿态调整、截割轨迹规划地质条件识别及自适应截割、状态监测与故障诊断等智能化控制方面取得了一定的进步。在硬岩截割方面对截齿结构、新型截割刀具、截割滚筒耐磨性进行了研究,提出了相应的处理措施。掘进装备的后配套装备的衔接也是影响技术发展的主要因素,只有通过技术创新加快高端掘进成套装备的研制,在掘支锚运一体化技术、硬岩截割技术、智能化技术和快速掘进技术方面取得突破,才能解决煤矿当下采掘失衡的主要矛盾。

#### 参考文献:

- [1] 王虹. 我国综合机械化掘进技术发展 40a [J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1815–1820.  
Wang Hong. The 40 years development alreview of the fully mechanized mine roadway heading technology in China [J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(11): 1815–1820.
- [2] 郝建生. 悬臂式重型掘进机关键技术探讨 [J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(4): 4–6.  
Hao Jiansheng. Discussion on key technology of mine boom type heavy roadheader [J]. Coal Science and Technology 2008, 36(4): 4–6.
- [3] 杨仁树. 我国煤矿岩巷安全高效掘进技术现状与展望 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 18–23.  
Yang Renshu. Present status and outlook on safety and high efficient heading technology of mine rock roadway in China [J]. Coal Science and Technology 2013, 41(9): 18–23.
- [4] Li X, Tiryaki B, Cleary P. Hard rock cutting with smart cut technology [C] // Proceedings of the 22nd World Mining Congress and Expo, Istanbul 2011.
- [5] Tiryaki B, Gipps I D, Li X S. Laboratory comparison of mini-discs with point-attack picks [J]. Advanced Materials Research 2010, 126: 189–194.
- [6] Brown E T. Fifty years of the ISRM and associated progress in rock mechanics [C]. Proc 12th ISRM Cong on 'Rock mechanics', [sl] 2011.
- [7] 赵伏军, 李夕兵. 新型多功能岩石破碎试验装置 [J]. 中南大学学报: 自然科学版 2004, 35(4): 651–656.  
Zhao Fujun, Li Xibing. A new multifunctional testing device for rock fragmentation [J]. J Cent South Univ: Science and Technology 2004, 35(4): 651–656.
- [8] Khair J, Wahab A. Research and innovations for continuous miner's cutting head for efficient cutting process of rock/coal [C] // Int Min Congress & Exhibition of Turkey – IMCET2001, Turkey 2001.
- [9] 张梦奇, 郝建生, 马健康, 等. 截齿对岩石截割机理试验平台: 中国 ZL201220560659.9 [P]. 2012-10-30.
- [10] Balci C, Bilgin N. Correlative study of linear small and full-scale rock cutting tests to select mechanized excavation machines [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, 44(2): 468–476.
- [11] Bilgin N, Demircin M A, Copur H, et al. Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2006, 43(1): 139–156.
- [12] 王苏彧, 高峰, 李睿, 等. 基于 PCC 的任意巷道断面自动截割成形控制系统 [J]. 煤炭学报 2013, 38(S0): 261–266.  
Wang Suyu, Gao Feng, Li Rui, et al. Control system of automatic arbitrary roadway section cutting and forming based on PCC [J]. Journal of China Coal Society 2013, 38(S0): 261–266.
- [13] Czwalina J, Kubic J, Bigby D N, et al. New mechanization and automation of longwall and drivage equipment [R]. Luxembourg: Research Fund for Coal and Steel 2011.
- [14] Nabusli S, Rodriguez A, PlumD, et al. Advanced drivage and road-heading intelligent systems [R]. Luxembourg: Research Fund for Coal and Steel 2012.

(下转第 21 页)

- [5] 娄金福. 动压巷道离层变形特征及支护技术研究 [J]. 煤炭科学技术 2015 A3(4): 6–10.  
Lou Jinfu. Research on separation and deformation feature and supporting technology of dynamic – pressure entry [J]. Coal Science and Technology 2015 A3(4): 6–10.
- [6] 余伟健,袁越,王卫军. 困难条件下大变形巷道围岩变形机理与控制技术 [J]. 煤炭科学技术 2015 A3(1): 15–20.  
Yu Weijian ,Yuan Yue ,Wang Weijun. Deformation mechanism of roadways surrounding rock with large deformation and control technology under difficult conditions [J]. Coal Science and Technology 2015 A3(1): 15–20.
- [7] 程建业,赵新法. 高应力松软煤层巷道支护技术研究及应用 [J]. 煤炭科学技术 2015 A3(5): 9–12.  
Cheng Jianye ,Zhao Xinha. Application and study on support technology of gateway in high stress and soft seam [J]. Coal Science and Technology 2015 A3(5): 9–12.
- [8] 王炯,郭志彪,马成荣等. 深部回采巷道锚网索耦合支护技术研究 [J]. 煤炭科学技术 2015 A3(5): 17–21.  
Wang Jiong ,Guo Zhibiao ,Ma Chengrong ,et al. Study on bolt steel mesh anchor coupling support technology of deep mining gateway [J]. Coal Science and Technology ,2015 ,A3 ( 5 ) : 17 – 21.
- [9] 张向阳,常聚才,王磊. 深井动压巷道群围岩应力分析及煤柱留设研究 [J]. 采矿与安全工程学报 2010 27(1): 72–76.  
Zhang Xiangyang ,Chang Jucai Wang Lei. Study on surrounding rock stress and reasonable pillar of mining induced roadway groups in deep well [J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2010 , 27 ( 1 ) : 72 – 76.
- [10] 方新秋,何杰,何加省. 深部高应力软岩动压巷道加固技术研究 [J]. 岩土力学 2009 30(6): 1693–1698.  
Fang Xinqiu ,He Jie ,He Jiasheng. Research on reinforced technology for deep soft rock and dynamic pressurized roadway under high stress [J]. Rock and soil mechanics 2009 30(6): 1693 – 1698.
- [11] 张志康,王连国,单仁亮等. 深部动压巷道高阻让压支护技术研究 [J]. 采矿与安全工程学报 2012 29(1): 33–37.  
Zhang Zhikang ,Wang Lianguo ,Shan Renliang ,et al. Support technology of high resistant and yielding property for deep roadway under dynamic pressure [J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2012 29(1): 33 – 37.
- [12] 曾凡宇. 软岩及动压巷道失稳机理与支护方法 [J]. 煤炭学报 2007 32(6): 573–576.  
Zeng Fanyu ,The loss of stability and supporting method for the soft and dynamic tunnels [J]. Journal of China Coal Society , 2007 ,32( 6 ) : 573 – 576.
- [13] 高福全,薛吉胜,尹希文. 强烈动压影响下锚网支护巷道矿压显现规律研究 [J]. 煤炭科学技术 2015 A3(1): 28–32.  
Gao Fuquan ,Xue Jisheng ,Yin Xiwen. Research on strata behaviors law of bolting with wire mesh roadway affected by strong dynamic pressure [J]. Coal Science and Technology 2015 A3(1): 28 – 32.
- [14] 何杰. 强烈动压巷道受力不对称性及帮强控制研究 [J]. 煤矿开采 2014 ,19(6): 60–63.  
He Jie ,Stress dissymmetry characteristic of roadway influenced by strong dynamical pressure and coal – wall control [J]. Coal Mining Technology 2014 ,19 ( 6 ) : 60 – 63.
- [15] 王连国,缪协兴,董建涛. 动压巷道锚注支护数值模拟研究 [J]. 采矿与安全工程学报 2006 23(1): 39–42.  
Wang Lianguo ,Miao Xiebing Dong Jiantao. Numerical simulation of bolt – grouting support in soft roadway affected by mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering ,2006 ,23 ( 1 ) : 39 – 42.
- [16] 汪良海,钱德雨,臧英新. 动压巷道棚索协调支护技术应用实践 [J]. 煤炭科学技术 2012 A0(1): 26–29.  
Wang Lianghai ,Qian Deyu Zang Yingxin. Applied practices on frame timber and anchor coordinated support technology to mine dynamic pressurized gateway [J]. Coal Science and Technology , 2012 A0(1): 26 – 29.
- [17] 季琦. 深部动压巷道围岩应力分布规律及不对称变形机理研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学 2013.
- [18] 康红普,林健,吴拥政. 全断面高预应力强力锚索支护技术及其在动压巷道中的应用 [J]. 煤炭学报 2009 ,34(9): 1153 – 1159.  
Kang Hongpu ,Lin Jian ,Wu Yongzheng. High pretensioned stress and intensive cable bolting technology set in full section and application in entry affected by dynamic pressure [J] . Journal of China Coal Society ,2009 ,34 ( 9 ) : 1153 – 1159.
- [19] 康红普,杨景贺,姜鹏飞. 锚索力学性能测试与分析 [J]. 煤炭科学技术 2015 A3(6): 29–33.  
Kang Hongpu ,Yang Jinghe ,Jiang Pengfei. Tests and analysis on mechanical properties for cable bolts [J] Coal Science and Technology 2015 A3(6): 29 – 33.
- [20] Kang Hongpu. Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review [J]. International Journal of Coal Science & Technology ,2014 ,1 ( 3 ) : 261 – 277.

(上接第 90 页)

- [15] Świdler J ,Jasiulek D. Use of a virtual prototyping in construction of a mining machine's control system [J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 2009 ,36 ( 2 ) : 160 – 167.
- [16] Jasiulek D ,Stankiewicz K ,Świdler J. An adaptive control system of roadheader with intelligent modelling of mechanical features of mined rock [J]. Journal of Kones 2011 ,18: 197 – 203.
- [17] Jasiulek D ,Świdler J. Mechatronic systems in mining roadheaders – examples of solutions [J]. Pomiary Automatyka Robotyka , 2013 ,17: 121 – 127.
- [18] Sun Y ,Li X S ,Shao W. Influence of cutting parameters and interactions on the depth of cut in continuous mining operation [J]. Advanced Materials Research 2012 ,538: 1422 – 1428.
- [19] Ralston J ,Reid D ,Hargrave C ,et al. Sensing for advancing mining automation capability: a review of underground automation technology development [J]. International Journal of Mining Science and Technology 2014 ,24( 3 ) : 305 – 310.