



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)

## 机电与智能化



移动扫码阅读

任志勇,石 琴.矿用电动无轨辅助运输装备发展现状及关键技术[J].煤炭科学技术,2021,49(7):118-123. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.07.016

REN Zhiyong,SHI Qing.Development status and key technologies on mine-used electric auxiliary trackless transport [J].Coal Science and Technology,2021,49(7):118-123. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.07.016

## 矿用电动无轨辅助运输装备发展现状及关键技术

任志勇<sup>1,2</sup>,石 琴<sup>1</sup>

(1.合肥工业大学 汽车与交通工程学院,安徽 合肥 230009;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:**基于“十一五、十二五”期间矿用无轨辅助运输装备发展现状及应用情况分析,提出了矿用电动无轨辅助运输装备是未来煤矿井下无轨辅助运输技术与装备领域的发展方向,是缓解当前以防爆柴油机为动力无轨辅助运输装备暴露出“四高一低”、职业健康等问题的有效措施。目前我国矿用纯电动无轨辅助运输装备正处于由科研向产业化转变阶段,产业化过程中还面临着诸多关键技术问题和挑战。从矿用电动无轨辅助运输装备应用现状、标准现状、整机技术现状、动力驱动系统技术现状、防爆驱动电机及控制系统技术现状和防爆动力电池技术现状等方面进行了详细阐述及分析,提出了基于矿用纯电动车辆搭建矿用智能互联纯电动无轨辅助运输系统平台,实现矿井装备与人、车、路等的智能信息交换,基于煤矿特定工况实现整车技术自主开发,基于煤矿安全标准重点攻关新型矿用防爆动力电池和防爆驱动电机控制技术等关键技术,并密切关注矿用混合无轨辅助运输装备关键技术发展趋势。分析结果表明:随着煤矿各类行业标准的出台和相关法规的完善,以及电动无轨辅助运输装备整机、防爆动力驱动电机、防爆动力电池以及 BMS 控制系统等关键技术的逐步突破,矿用电动无轨辅助运输装备将会有一个阶越式发展,有效改善井下工作环境,实现节能减排,后期具有良好的市场前景。

**关键词:**电动无轨辅助运输;防爆柴油机;防爆驱动电机;防爆动力电池

中图分类号:TD525 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2021)07-0118-06

### Development status and key technologies on mine-used electric auxiliary trackless transport

REN Zhiyong<sup>1,2</sup>,SHI Qin<sup>1</sup>

(1.School of Automotive and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2.Taiyuan Institute Co., Ltd. China Coal Technology and Engineering Group, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the development status and application of mine trackless auxiliary transportation equipment during the "11th Five Year Plan" and "12th Five Year Plan", the mine explosion-proof electric vehicles, which can effectively alleviate the "four high and one low" problems and occupational health exposed by the current trackless auxiliary transportation equipment powered by explosion-proof diesel engine, are considered as the development direction of the future mine trackless auxiliary transportation technology and equipment field. At present, China's mining electric trackless auxiliary transportation equipment is in the stage of transformation from scientific research to industrialization. In the process of industrialization, there are still many key technical problems and challenges. This paper elaborates and analyzes the current mining electric trackless auxiliary transportation equipment from the aspects of equipment application state, standard promulgation, and development prospect of key component such as the explosion-proof drive motor, the drive control system, the explosion-proof power battery and their overall design, and puts forward the construction of mine intelligent interconnected pure electric trackless auxiliary transportation equipment based on mine pure electric vehicle auxiliary transportation system platform, and

收稿日期:2020-12-25;责任编辑:赵 瑞

基金项目:中国煤炭科工集团重点资助项目(2018-TD-ZD011);中国煤炭科工集团面上资助项目(2018-TD-MS051);山西省重点研发计划资助项目(201803D121121)

作者简介:任志勇(1983—),男,山西浑源人,副研究员,硕士。Tel:0351-7852778, E-mail:tymkyrzy@163.com

realizes the intelligent information exchange between mine equipment and people, vehicles and roads. Based on the specific working conditions of coal mine, the independent development of vehicle technology is realized. According to the coal mine safety standards, the control technology of new mine explosion-proof power battery explosion-proof drive motor is researched. Meanwhile, the development trend and direction of key technology of mine hybrid power are also concerned. The analysis shows that with the introduction of various industry standards in coal mines, the perfection of related laws and regulations and the gradual breakthrough of key technologies of mine electric trackless auxiliary transportation equipment such as explosion-proof vehicle, explosion-proof power drive motor, explosion-proof power battery and its management system, mine-used electric auxiliary trackless transport will be a step-by-step development, and can be able to effectively improve the underground working environment and realize energy conservation and emission reduction, and has a good market prospect in the later stage.

**Key words:** electric auxiliary trackless transport; explosion-proof diesel engine; explosion-proof drive motor; explosion-proof power battery

## 0 引 言

国家对清洁能源、绿色发展的重视程度与日俱增,“十一五”期间,我国无轨辅助运输装备通过引进、消化、吸收、再创新等措施,研制出了一系列能够满足大中型矿井使用的无轨辅助运输装备,攻克了中小型防爆柴油机、安全湿式制动系统等相关技术。“十二五”期间,以防爆柴油机为动力的无轨辅助运输装备得到了长足的发展,应用的矿井数达到1 000余处,使用总量超过20 000台套,在煤矿生产减员增效、降低事故发生率等方面取得了良好的社会效益和经济效益<sup>[1-2]</sup>。“十三五”期间,随着无轨辅助运输装备的广泛使用,以柴油机为动力的辅助运输装备暴露出了诸多弊端。一方面,能源消耗量大、高噪声、高排放问题亟待解决;另一方面,煤矿井下巷道狭隘、通风有限,“二次污染”问题日益凸显,严重危害井下人员的职业健康,某些矿区辅助运输司机甚至出现了“油肺病”现象。

文献[2]基于防爆锂电池运人车的研究现状,在总结国内外矿用电动无轨运输车辆发展现状的基础上,介绍了轻型车和重型车2种发展方向,但未对其关键技术进行介绍。文献[3]对矿用纯电动防爆车辆现状进行了阐述,详细介绍了纯电动防爆车辆的现状,但未对其下一步关键技术进行阐述。文献[4-9]分别对矿用蓄电池车辆的安全性能技术、传动系统技术、整车控制技术、电池管理系统技术、车身轻量化技术和轻型系列人车设计等方面进行了详细阐述,为纯电动无轨辅助运输装备的研发提供了某一方面的理论支撑。任志勇<sup>[1]</sup>研究了整车参数、防爆动力电池、防爆驱动电动机控制系统以及传动型式等因素对续航里程的影响,提出能够使纯电动防爆车辆在当前防爆动力电池比能量较低的情况下,最大限度地提升续航里程的措施和方法。王国法院士<sup>[9]</sup>介绍下井应用5G技术的总体架构,简要展望了基于5G技术的物联网、大数据、云计算、人

工智能和虚拟现实等技术在煤矿智能化中的融合应用,为矿用电动无轨辅助运输装备搭建矿用智能互联电动无轨辅助运输系统平台提供了技术路线。

近年来,我国在矿用电动无轨辅助运输装备上取得了可观的成果,研制出一系列纯电动辅助运输装备,并在特定区域矿井上进行了一系列工业性试验。同时对矿用防爆驱动电机、矿用防爆动力电池及电控系统等技术进行了全面研究,取得了诸多关键技术的改进与突破。国家层面和行业专家一致认为矿用电动无轨辅助运输装备已经成为未来煤矿井下无轨辅助运输技术与装备领域的发展方向,矿用纯电动无轨辅助运输装备技术正处于由科研向产业化转变阶段,产业化过程中还面临着诸多关键技术的问题和挑战,有待进一步解决。

## 1 发展现状

### 1.1 应用现状

据统计,当前采用矿用电动无轨辅助运输装备的矿井数量约有20处,使用总数在300台左右,按照动力源可以划分为防爆锂离子蓄电池类装备、防爆铅酸电池类装备和防爆双动力架线类装备,如图1—图3所示。



图1 典型防爆锂离子蓄电池无轨辅助运输装备

Fig.1 Typical explosion proof lithium-ion battery auxiliary transportation equipment

防爆锂离子蓄电池装备受行业标准防爆单体电池容量不超过100 A·h以及禁止在高瓦斯和瓦斯突出矿井应用等约束,目前该类装备主要有2~19人的运人装备和5 t以下的运料装备,国内主要生

产厂家有:石家庄煤矿机械有限公司、航天重型装备有限公司、常州科试公司、深圳德塔公司和山西天地煤机装备有限公司,国外该类装备尚未见到,用户主要集中在国家能源集团神东煤炭有限公司,应用数量约200台<sup>[10]</sup>。

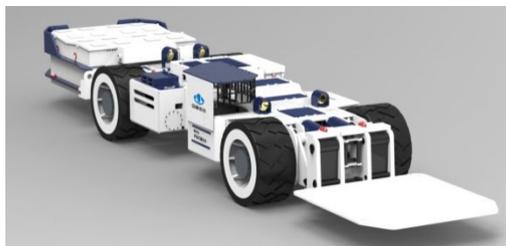


图2 典型防爆铅酸蓄电池类无轨辅助运输装备

Fig.2 Typical explosion lead acid battery auxiliary transportation equipment



图3 典型防爆双动力架线无轨辅助运输装备

Fig.3 Typical explosion double power stringing auxiliary transportation equipment

防爆铅酸蓄电池类装备主要集中在综采工作面搬家工艺装备上,国产装备主要为山西天地煤机装备有限公司生产的CLX3、WJX-7FB、WJX-10FB、WX35J、WX45J、WX80J多功能铲运机和铲板式搬运车,应用数量在30台左右。进口装备主要为比塞洛斯生产的VTC636、VTC650、VTC680、488铲车4种车型,应用数量分别为16、24、5和28台<sup>[4]</sup>,基本都逐步淘汰,在用数量仅为总数的20%,主要集中在国家能源集团和山东能源集团应用。

防爆双动力架线类无轨辅助运输装备,国外在瑞典、加拿大、俄罗斯、美国、南非等地的金属矿山有相关的应用案例。国内主要是由山西天地煤机与国家源集团合作开发了基于架线网供电的3大类、18种防爆双动力电动辅助运输装备,并在神东的补连塔煤矿完成了工业性试验,解决了常规无轨辅助运输装备长距离、大坡度斜井巷道运输存在的上坡动力不足、下坡机械制动磨损过快等问题,实现了高效、安全、点对点一次性运输。

## 1.2 标准现状

矿用电动无轨辅助运输装备标准归口单位及发证单位为安标国家矿用产品安全标志中心有限公

司,鉴于相关设备均属于新产品,更多以借鉴国外标准和非矿用产品标准为主,基于煤矿环境进行了一系列的制修订。

防爆锂离子蓄电池类无轨辅助运输装备主要参照地面锂离子蓄电池车辆制定的《矿用防爆锂离子蓄电池无轨车辆安全技术要求》(试行)。矿用防爆锂离子单体电池参照QC/T 743—2006《电动汽车用锂离子蓄电池》,结合煤矿防爆要求制定的《矿用锂离子蓄电池安全技术要求》(暂行)标准和《矿用隔爆(兼本安)型锂离子蓄电池电源安全技术要求》(暂行)标准。

防爆铅酸蓄电池类无轨辅助运输装备主要依据标准为MT/T 989《防爆柴油机通用技术条件》和JB/T 5500《地下铲运机》,防爆铅酸蓄电池参照MT 658—2011《煤矿用特殊型铅酸蓄电池》执行,防爆驱动电机按照类型不同参照不同的标准,如:矿用隔爆型变频调速三相异步电动机参照MT/T 1040—2007《采煤机变频调速装置用YBVF系列行走电动机技术条件》。

双动力架线类无轨辅助运输装备主要参照MT/T 661—2011《煤矿井下用电器设备通用技术条件》、CJJ/T 72—2015《无轨电车牵引供电网工程技术规范》等,整机主要参照MT/T 989—2006《矿用防爆柴油机无轨胶轮车通用技术条件》和JB/T 5500《地下铲运机》。

## 1.3 技术现状

### 1.3.1 整机现状

结合煤矿无轨辅助运输工艺,矿用防爆锂离子蓄电池类装备主要以运输人员、物料和小型装备为主,通常以地面轻型卡车底盘为基础车型进行改装,最大载人数量19人,最大载质量5 t,运人车最高车速25 km/h,运料车最高车速40 km/h,最大爬坡度 $10^{\circ} \sim 14^{\circ}$ ,续航里程50~80 km,无电池快换机构,充电时间一般在2~4 h。

结合综采工作面搬家工艺,防爆铅酸蓄电池类无轨辅助运输装备主要用于综采工作面各种设备的搬运,以中央铰接式整机为主,分为2段中央铰接式整机和3段回转铰接式整机,额定载质量3~100 t,整车运行最高速度为10 km/h,整机爬坡度 $10^{\circ} \sim 14^{\circ}$ ,续航里程超过25 km,配套电池快换机构,单组电池容量应满足整机作业时间超过8 h的需求,整机通常配备3组防爆电源装置,行业称为“一充一备一用”。

双动力架线类无轨辅助运输装备整机主要参照以柴油机为动力机型,加装架线供电装备和电驱动系统实现柴油机动力驱动与电机驱动切换,在综采

工作面区域采用柴油机驱动,在辅助运输大巷连续大坡度区域采用电机驱动,上坡利用电机过载特性提升车辆的动力性能,下坡利用电机反制动特性,将坡度的势能转化为电能回馈电网,进而实现辅助制动,提升制动安全性能。

### 1.3.2 动力驱动系统现状

当前防爆电动无轨辅助运输装备动力驱动系统传动方式主要为:两驱类运输装备通过防爆驱动电机取代原来的防爆柴油机,动力通过变速箱、传动轴、驱动桥传递至车轮,有前驱和后驱2种配置;四驱类车辆主要有:单电机+分动箱+前后驱动桥系统、双电机+变速箱+前后驱动桥系统、双电机+前后驱动桥系统、四电机+轮边减速器驱动系统4类。上述各种动力驱动系统均在矿用电动无轨辅助运输装备上得到了应用,但普遍暴露出传动效率低、作业时间短和可靠性差等问题,究其原因主要是该类装备的动力驱动系统关键元部件选型困难,未与使用工况进行准确的动力性和经济性匹配,普遍出现“大马拉小车”现象<sup>[11]</sup>。

### 1.3.3 防爆驱动电机及控制系统现状

煤矿无轨辅助运输装备通常需求最高车速40 km/h,最大爬坡能力为14°,使得防爆驱动电机必须具备低速大转矩和高速小转矩特性,对电机本身性能提出了较为苛刻的要求。当前应用的防爆驱动电机主要有:交流感应电机、开关磁阻电机和永磁电机,功率范围覆盖15~100 kW。对于交流感应电机主要以矢量控制为主,通过调节三相电压的幅值和频率改变电机的转速和转矩。对于开关磁阻电机和永磁电机,主要通过调节电压和切换绕组的导通关断的时序,实现电机调速。当前该类装备应用的防爆电机及控制系统基本都是地面非防爆电机进行了防爆处理,未真正结合装备运行工况需求开发,使得整个防爆驱动系统高效区覆盖整机运行工况的区域较小,85%以上的系统效率覆盖装备运行工况区域不足60%,使得装备常用工况下对应的驱动系统综合效率未完全工作在高效区,整个驱动效率比较低。

### 1.3.4 防爆动力电池现状

矿用防爆锂离子蓄电池行业标准只允许使用磷酸铁锂电池,其他类型锂离子蓄电池禁止使用,单体电池容量不允许超过100 A·h,电源装置PACK成组数量不允许超过100块,且单体电池需要进行过放电、过充电、短路、跌落、加热、挤压和针刺等试验,并需要在国家安全标志中心进行备案,整个电源装置主要基于《矿用隔爆(兼本安)型锂离子蓄电池电源安全技术要求》标准,典型装置如图4

所示。



图4 典型防爆锂离子蓄电池电源装置

Fig.4 Typical explosion proof lithium ion battery power supply device

目前国内使用的防爆铅酸蓄电池单体主要参照煤矿相关标准在地面铅酸电池的基础上进行防爆处理,并将各个单体电池按照煤矿标准安装在一个金属制壳体内组成电源装置,防爆铅酸蓄电池单体容量有530、900、1 200、2 000 A·h等规格。防爆铅酸蓄电池执行煤矿“特殊型”防爆标准,煤矿用特殊型铅酸蓄电池主要基于MT 658—2011《煤矿用特殊型铅酸蓄电池》标准执行,典型装置如图5所示。



图5 典型防爆铅酸蓄电池电源装置

Fig.5 Typical explosion proof lead acid battery power supply device

防爆双动力架线类无轨辅助运输装备供电主要采用接触网进行供电,矿井接触网采用三轨形式,结构主要由化学锚栓、C型槽钢、T型调节螺栓、横梁、绝缘子、载流轨、接地轨等组成,布置于煤矿辅助运输平硐顶部,将供电系统输出的电能传输到双动力车辆,驱动车辆电驱方式运行,如图6所示。

## 2 关键技术

“十一五”“十二五”期间,随着国家科技部“863计划”电动汽车关键技术与系统集成重大项目、矿用防爆高比能量蓄电池动力技术的研究以及国家科研院所技术开发研究专项资金等项目的实施和资



图6 典型矿用双动力类装备供电接触网

Fig.6 Typical power supply catenary of mining dual power equipment

助,使得矿用电动无轨辅助运输装备某些关键技术得到突破,并向产业化过渡。

1) 基于矿用电动无轨辅助运输装备搭建矿用智能互联电动无轨辅助运输系统平台。针对当前辅助运输系统严重制约安全高效矿井各大系统效能发挥等问题,开发矿用智能互联电动无轨辅助运输系统平台,基于矿井巷道条件,通过防爆车载传感系统和信息终端实现与人、车、路等的智能信息交换,使装备具备智能环境感知能力,自动分析车辆行驶的安全及危险状态,使车辆按照人的意愿安全、高效到达目的地,最终实现无人驾驶。同时平台通过车辆车载终端、无线通信及互联网系统、运营管理平台(云平台),完成对车辆及相关物料、人员和设备等的信息采集、处理、分析和统计,满足煤矿对车辆、人员及物料等的监控、管理和调度<sup>[9]</sup>。

2) 整车技术方面,结合煤矿绿色、安全高效无轨辅助运输装备的需求,基于煤矿特定工况,建立了具有完全自主知识产权的防爆锂离子蓄电池装备、防爆铅酸蓄电池装备的整体式通用底盘和铰接式通用底盘,开发了单电机驱动、双电机驱动和四电机驱动动力系统平台,并掌握了装备集成技术,目前陆续研制出20余种装备,并在国内大中型煤矿完成了工业性试验,得到了小范围的推广应用。在后续的发展中,通过改善整车结构、减轻动力电池质量,优化装备使用材料及改进智能化、安全化集成技术等措施,进一步提升矿用电动无轨辅助运输装备动力性和经济性指标及智能化水平。

3) 基于煤矿安全标准开发新型矿用防爆动力电池是矿用电动无轨辅助运输装备及技术发展的重中之重,直接影响着其推广应用,而高比能量、高安全、长寿命、低成本是矿用防爆动力电池的发展方向,研制一种新型的防爆动力电池显得尤为重要。比如:研制矿用特殊型阀控式铅炭铅酸蓄电池(又

名:石墨烯基水平双极耳铅炭电容电池),与常规电池相比,具有维护量少、大电流耐受、循环寿命长、宽温适应性和抗振动能力等特点。防爆全固态锂电池也是未来电池的主要发展方向之一,研发新型锂离子电池和新体系电池(锂硫电池、锂空气电池、固态电池等),将拓展动力电池技术边界,实现动力电池多元应用与开发<sup>[6]</sup>。

4) 防爆驱动电机控制技术是矿用电动无轨辅助运输装备的关键技术<sup>[13]</sup>,需要基于矿用电动无轨辅助运输装备低速大转矩、功率需求突变频繁等特殊需求,研究高安全性动力驱动系统匹配技术,较好适应频繁爬坡、制动、加减速等工况,从电机设计理论出发优化电机运行过程兼顾低速、高速性能,在完善电机控制的基础上,建立整车各子控制单元之间的联系,主要涉及动力总成控制单元、防爆电机驱动控制子系统、防爆蓄电池管理系统和车辆显示终端等,并从矿用纯电动防爆车辆的工况和整车系统方面优化控制结果,对结果进行显示和监控,达到优化整车性能,提高舒适性、操作性和安全性等目的<sup>[7]</sup>。

5) 目前混合动力技术主要在乘用车和客车领域,而在矿用无轨辅助运输装备上的运用还处于探索研究阶段,但是发展混合动力技术是节约能源和降低排放最有效的途径之一,也是全球公认的中短期发展方向,研究混合动力矿用无轨辅助运输装备具有重要的意义,尤其能量管理技术是当前研究的热点。

6) 随着矿用电动无轨辅助运输装备及技术的发展,防爆电池需求量急剧增大,防爆电池生产和废旧电池回收处理过程中的污染问题不容忽视,完善各类防爆动力电池回收体系,解决重金属、电解质溶液污染迫在眉睫,要边发展边治理,让矿用电动无轨辅助运输装备真正成为真正绿色无污染的无轨辅助运输准备<sup>[12-13]</sup>。

### 3 结 语

1) 目前,矿用电动无轨辅助运输装备的设计多停留基于地面装备参考应用上,针对煤矿特定工况、特定设备需求的研究尚未见到。迫切需要拥有独立自主研发性能良好的矿用电动无轨辅助运输装备。

2) 亟待完善行业标准,当前制定的矿用电动无轨辅助运输装备相关标准,基本都是基于地面非防爆标准和煤矿防爆标准的堆砌,其政策、法规未能及时跟上,而政策、法规的不健全将直接影响决策者的理念和管理能力。因此,政策、法规有待进一步的完善,新标准的制修订迫在眉睫。

3) 矿用防爆动力电池技术是制约矿用电动无轨辅助运输装备发展的关键因素,是影响续航里程和进一步大面积推广的主要制约因素,在提升矿用防爆动力电池性能的基础上,如何保障电池系统的使用安全和循环寿命,是当前研究的热点和突破的重点。

4) 研究攻克矿用电动无轨辅助运输装备“大脑”的整车控制系统等重大共性关键技术,对提高装备安全性、经济性、可靠性、舒适性、功能性尤为重要,能够实现整车能耗的降低和续航里程的提升,未来需要结合智能化和网联化手段,基于各类电动无轨辅助运输装备运行工况,开发动力系统工作效率最佳且工况适应性最强的智能化整车控制策略及软件、智能互联平台控制架构,实现高效的装备能量管理、智能的驱动控制和可靠的安全监控,而电动无轨辅助运输装备各系统标定与匹配技术、大型设计软件与仿真技术、车控操作系统等是后续突破重点。

5) 围绕矿用电动无轨辅助运输装备高效节能、安全舒适的目标,以大数据为基础科学量化装备运行工况场景和充放电规律、装备和电池、电机等关键部件性能变化与故障演化规律,在装备安全故障诊断与预警、驾驶行为与能耗管理、充电设施规划、装备综合性能评价、动力电池性能和残余价值评估等方面持续开展技术应用实践,将成为矿用电动无轨辅助运输装备技术领域的发展热点和重点。

6) 随着国家政策的不断出台,矿用电动无轨辅助运输装备一系列“卡脖子”技术不断突破、关键元部件成功开发,并在各类装备上成果应用推广,能够高效地实现矿井生产人员、设备和物料等的绿色运输,极大改善井下工作环境,是未来煤矿井下无轨辅助运输技术与装备领域的发展方向,后期具有良好的市场前景。

#### 参考文献(References):

- [1] 任志勇.纯电动防爆车辆续航里程影响因素研究[J].煤炭科学技术,2019,47(2):150-155.  
REN Zhiyong. Research on influence factors affecting driving range of flame-proof battery electric vehicles[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 150-155.
- [2] 袁晓明.煤矿蓄电池无轨运输车辆电控系统的关键技术研究[J].电气开关,2011,39(5):80-82.  
YUAN Xiaoming. Research on key technology of electronic control system of mine electric trackless transportation vehicle [J]. Electric Switchgear, 2011, 39(5): 80-82.
- [3] 周密林.矿用纯电动防爆车辆发展现状综述[J].煤炭工程,2020,52(6):170-173.  
ZHOU Milin. Overview on development status of mine pure electric explosion-proof vehicle[J]. Coal Engineering, 2020, 52(6): 170-173.
- [4] 任志勇.矿用纯电动防爆胶轮车双电机驱动系统研究[J].煤炭工程,2017,49(7):136-138,141.  
REN Zhiyong. Study on dual-motor driving system for pure electric explosion-proof rubber tire vehicle for mine [J]. Coal Engineering, 2017, 49(7): 136-138, 141.
- [5] 任志勇.防爆锂离子蓄电池车辆整车控制系统研究[J].煤炭工程,2017,49(12):29-33.  
REN Zhiyong. Research on vehicle controlling system of explosion-proof lithium-ions battery vehicle [J]. Coal Engineering, 2017, 49(12): 29-33.
- [6] 任志勇.防爆锂电池车主从分布式电池管理系统的研究[J].电源技术,2019,43(12):1993-1995.  
REN Zhiyong. Key technology research for mine explosion-proof pure electric vehicle [J]. Coal Science and Technology, 2019, 43(12): 1993-1995.
- [7] 梁玉芳,杨小凤.煤矿用电动无轨胶轮车车身轻量化技术研究[J].煤炭技术,2015,34(6):224-226.  
LIANG Yufang, YANG Xiaofeng. Mine trackless electric car body lightweight technology research [J]. Coal Technology, 2015, 34(6): 224-226.
- [8] 李亭杰.矿用锂电池无轨胶轮运人车设计[J].煤炭工程,2018,50(2):148-150.  
LI Tingjie. Design of a mine trackless rubber tyre vehicle powered by lithium battery [J]. Coal Engineering, 2018, 50(2): 148-150.
- [9] 王国法,赵国瑞,胡亚辉.5G技术在煤矿智能化中的应用展望[J].煤炭学报,2020,45(1):16-23.  
WANG Guofa, ZHAO Guorui, HU Yahui. Application prospect of 5G technology in coal mine intelligence [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 16-23.
- [10] 袁晓明.煤矿电动无轨运输车辆的关键技术研究[J].煤炭科学技术,2011,39(5):80-82.  
YUAN Xiaoming. Research on key technology of mine electric trackless transportation vehicle [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(5): 80-82.
- [11] 谢进.防爆电动无轨胶轮车在神东矿区井下应用研究[J].煤炭科学技术,2017,45(S2):87-91.  
XIE Jin. Application study on trackless rubber tyred vehicle with explosion proof electric in underground Shendong Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(S2): 87-91.
- [12] 王文伟,孙逢春.全气候新能源汽车关键技术及展望[J].中国工程科学,2019,21(3):47-55.  
WANG Wenwei, SUN Fengchun. Key technologies and prospects and prospects of all-climate new energy vehicles [J]. Engineering Sciences, 2019, 21(3): 47-55.
- [13] 欧训民,张希良,覃一宁,等.未来煤电驱动电动汽车的全生命周期分析[J].煤炭学报,2010,35(1):6-9.  
OU Xunmin, ZHANG Xiliang, TAN Yining, et al. Life cycle analysis of electric vehicle charged by advanced technologies coal power in future China [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 6-9.