

钻锚一体化智能快速掘进成套装备

康红普 姜鹏飞 宋德军 雷亚军 李增林 王子越 张小峰 李发泉 韩存地 王锐 郭吉昌 罗超 韦尧中
陈志良 曹晓明 刘畅 何宗科 杨建威 韩春福 任建超 张权 郭栋 丁维波 张虎 王威 徐志刚 杨勇

研究背景、意义

煤炭是我国的主体能源，掘进与回采是煤炭生产2个基本环节，巷道是煤矿运输、通风、行人的必要通道。我国每年新掘进巷道1.2万km，相当于地球直径，规模巨大。目前，我国巷道掘进技术明显落后于采煤技术，已成为制约煤矿安全、智能开采的瓶颈。我国现有巷道掘进工作面约1.6万个，巷道作业人员超70万人，是采煤工作面作业人员3倍多，且高度依赖人工。全国90%矿井仍需10多个工人在掘进工作面恶劣环境下高强度人工作业，严重影响煤矿安全生产和工人职业健康。在巷道成巷工序中，支护用人最多（占掘进面用人总数60%左右）、用时最长（占成巷总用时70%左右）。支护是当前影响煤巷快速成巷的最主要因素，且目前国内外煤巷自动化支护关键技术整体发展缓慢，现有的支护施工工艺繁琐，尚未有本质的突破。开展煤巷快速掘进关键技术与装备研发，实现自动化减人已成为煤矿高产高效的必然要求。

主要研究内容与创新

主要研究内容

针对掘进过程中锚杆支护工艺繁琐，巷道变形无法及时监测等问题，中煤科工开采研究院有限公司联合中国煤炭科工集团太原研究院有限公司、陕西陕煤曹家滩矿业公司历时4年创新研发出了钻锚一体化锚杆自动支护、巷道表面喷涂护表、随掘

变形动态监测系统，将传统锚杆支护6道工序（钻孔、卸钻杆、安装锚固剂、安装锚杆、搅拌及预紧）简化为1道工序，实现了巷道支护技术变革。主要包含3个方面的研究内容。

研究内容一：钻锚一体化新型锚杆支护材料、工艺、装备及技术

（1）钻锚一体化新型锚杆材料及构件研发

针对现有锚杆施工工艺复杂，难以实现自动化作业的问题，研发出钻锚一体化锚杆，将传统的锚杆施工6道工序简化为1道工序，实现钻孔、锚固、预紧一体化自动作业。研制了配套的锚杆组件，实现了锚杆自动化施工。研制的钻锚一体化锚杆承载力达到260 kN，具备良好的力学性能，并取得国内首个钻锚一体化锚杆煤矿安标认证。钻锚一体化新型锚杆结构组成如图1所示。

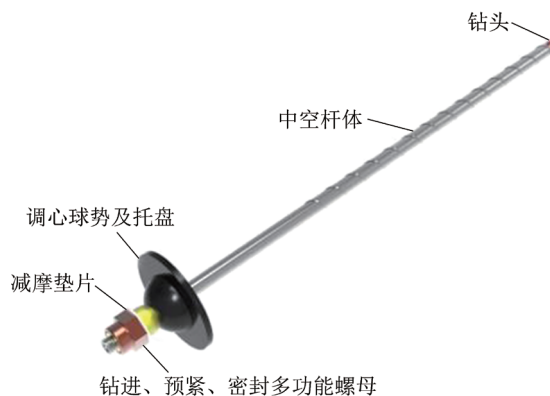


图1 钻锚一体化新型锚杆结构组成



图2 钻锚一体化锚杆支护自动化施工系统

(2) 钻锚一体化锚杆支护自动施工系统研发

基于钻锚一体化新型锚杆，研制出钻锚一体化支护自动施工系统，包括：钻锚一体化钻臂、钻箱、锚杆仓、锚固剂泵注系统、“一键打锚杆”智能化控制系统等，施工装备可实现锚杆支护自动化作业，单根锚杆作业时间由原来5~6 min缩短为3 min，效率比传统设备提高近1倍。钻锚一体化锚固剂泵注后锚固力达到200 kN，预紧扭矩300 Nm。研制的锚杆仓具备8个工位，可一次装载8根锚杆。研制的钻锚一体化支护自动化施工系统具备自主知识产权。钻锚一体化锚杆支护自动化施工系统如图2所示。

(3) “一键打锚杆”自动控制系统研发

在装备的基础上，确定了钻锚一体化新型锚杆智能化施工的工序、配套装备的动作顺序、各个施工环节的时间关系、逻辑关系等，研发出“一键打锚杆”控制系统，实现了钻锚一体化锚杆自动化施工。提出“一键打锚杆”控制算法，开发出钻孔、安装锚固剂、预紧自动顺序动作控制算法，搭建了相应的硬件控制平台，综合实现了锚杆支护施工的自动化作业。钻锚一体化锚杆支护控制系统如图3所示。

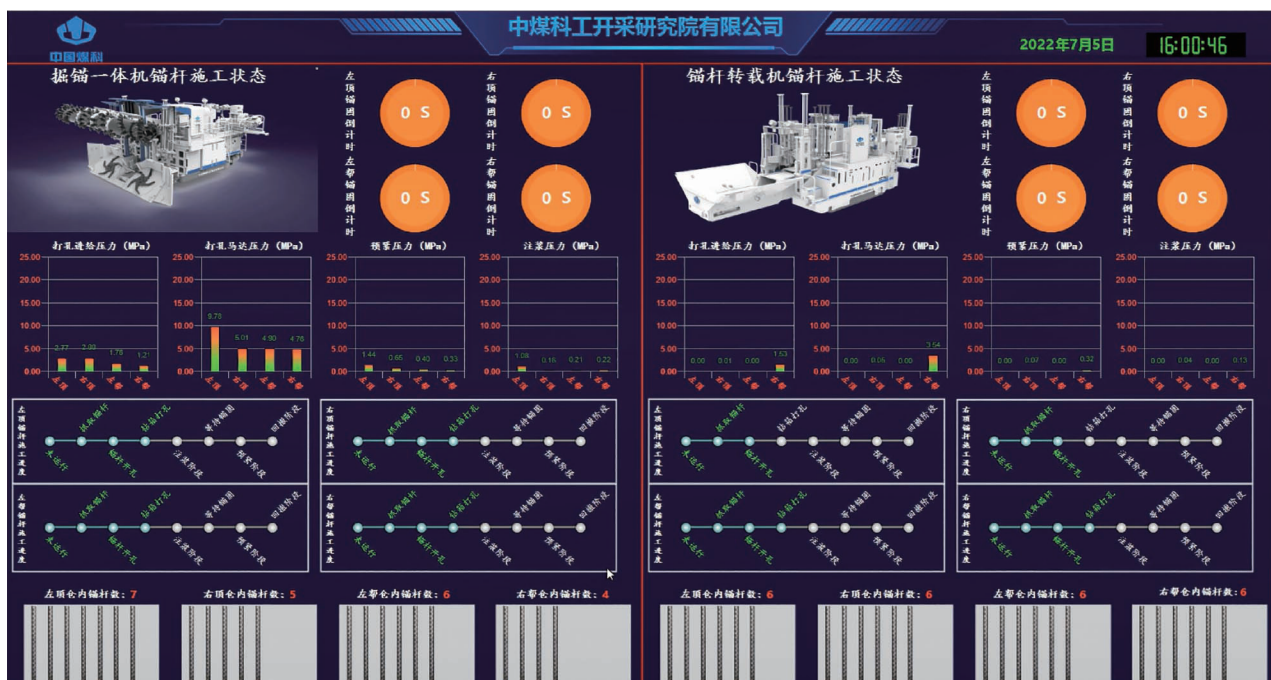


图3 钻锚一体化锚杆支护控制系统界面

研究内容二：喷涂支护材料与系统研发

(1) 高性能喷涂材料研发

针对金属网铺联网用人多的问题，研发出新型矿用高性能喷涂材料，研发的材料具备良好的力学性能和安全性能，可以用于巷道表面喷涂支护，替代金属网，实现自动化主动护表支护。

(2) 快速灌装、高配比精度、大流量泵送系统研发

基于研发的高性能喷涂材料，开发出可快速灌装的上料机构，研发出物料高配比精度的泵送及

控制系统，研发出大流量节拍适应性的泵送系统，最终形成随掘围岩快速喷涂的泵送系统。

(3) 高效喷涂系统研制

根据掘进工作面围岩空间结构、喷头成形特性及掘进工作面设备空间布置情况，研制出与掘锚一体机适配的掘进工作面围岩快速覆盖喷涂模块。开展掘进工作面空间合理覆盖范围的喷头设计及布置，开发出具备6个关节自由度的液压喷涂机械臂、带清洗功能的喷枪、自动化喷涂泵，形成了巷道表面高效自动化喷涂系统。自动化喷涂支护系统在掘锚一体机上的布置如图4所示。

(4) 喷层高效成形控制技术研究

开发了喷涂机械臂运动轨迹最优规划算法，研究了喷涂与掘进设备空间防干涉及协同控制技术，实现快速喷涂成形自动轨迹规划。基于喷涂材料、泵送系统、机械臂及喷头设计，研究了喷涂材料的成形特性；并依据其成形特性，得出最佳成形泵送系统参数、最佳成形喷涂工艺；实现在合理的喷层质量、喷涂速度和喷涂覆盖性条件下使用较少的喷涂材料成膜。开发的高效自动化喷涂控制系统界面如图5所示。



图4 自动化喷涂支护系统布置示意

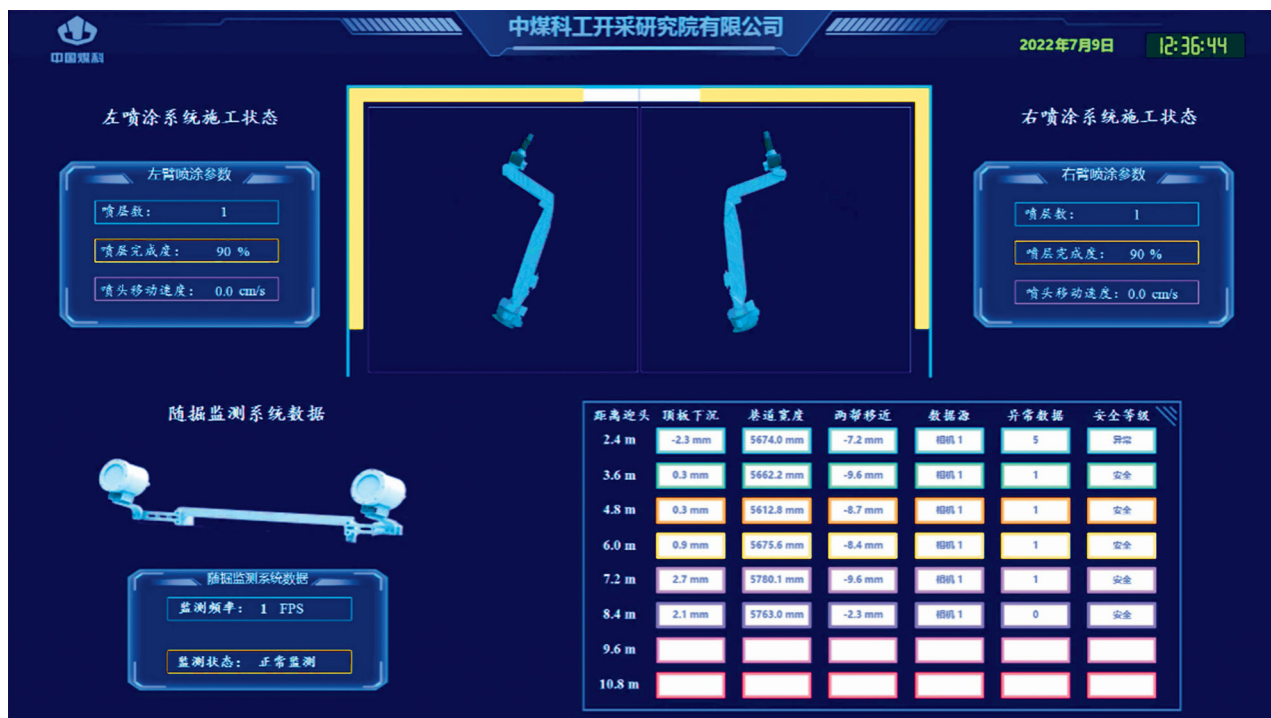


图5 高效自动化喷涂控制系统界面



研究内容三：巷道随掘变形动态监测系统

针对掘进工作面的特点，开发出能实时在线监测的巷道随掘变形动态监测系统，实现两帮和顶板相对变形量的实时监测，用于判断顶板的相对下沉量及两帮移近量，为掘进工作面安全提供了数据支撑，并可根据该数据的实时反馈，为后期掘进工作面支护参数的动态调整提供支持。巷道随掘变形动态监测系统如图6所示。

研究内容四：钻锚一体化智能快速掘进系统研发

基于上述3项核心技术，研制出钻锚一体化智

能快速掘进成套装备，2022年7月7日在太原下线，2022年9月21日在曹家滩煤矿举行地面联合试运转，2022年10月开展井下试验，实现了锚杆自动化施工，引领了智能快掘发展方向（图7—图8）。

创新点

钻锚一体化智能快速掘进成套装备包含3个创新点：

（1）钻锚一体化锚杆施工工艺、装备及技术。突破了现有锚杆施工工艺，将现有施工工艺的6道工序简化为1道工序，开发出新型的泵注式锚



图6 巷道随掘变形动态监测系统



图7 钻锚一体化智能快速掘进成套装备



图8 钻锚一体化智能快速掘进成套装备在曹家滩矿地面联调

固剂，取得了国内首个煤安认证，研制了新型的施工装备，实现了锚杆施工自动化作业。

(2) 喷涂支护材料与系统。突破了高效喷涂材料与技术，开发出高性能喷涂支护材料，研制了六自由度自动化喷涂系统，实现了巷道自动化喷涂支护。

(3) 研发出巷道随掘变形动态监测系统，从硬件、软件和原理等各个方面进行了原创性研发，针对煤巷特殊环境，实现了巷道掘进过程中围岩变形的随掘动态监测。

难题攻克与解决方案

钻锚一体化智能快速掘进成套装备包含的三大核心技术均属国际首创，在项目开展过程中，材料、工艺及装备都在技术的无人区进行摸索，装备研发过程持续4年，最终针对传统锚杆支护施工流

程繁琐、自动化程度低等问题，提出钻锚一体化锚杆成套解决方案，在行业内首次实现了锚杆自动化支护作业；针对井下金属网安装用人多、效率低等问题，提出喷涂护表支护方案，有效地解决了井下铺网、联网的难题；针对现有巷道变形监测缺失，开发出巷道随掘变形动态监测系统，首次实现了巷道变形动态监测。相关独创技术申请国家发明专利60余件，申请PCT专利4件。

应用效果与推广前景

目前，钻锚一体化智能快速掘进成套装备已在陕煤曹家滩煤矿成功应用，井下应用状况如图9所示。在巷道片帮、底鼓的情况下，大幅度提高了巷道掘进与支护的自动化程度，有力推进了我国煤巷掘进与支护装备技术进步。2022年该套装备作为煤炭行业唯一产品入选北京市“2022年首创产



图9 钻锚一体化智能快速掘进成套装备井下应用

品首次进入市场支持项目”，被评为“国际首创产品”，并与C919大飞机、第三艘航母“福建舰”等一起入选2022年央企“十大国之重器”。得益于先进的技术、较高的自动化、智能化水平，目前已与多家煤炭企业达成合作意向，该套装备具备广阔的市场前景。

■ 责任编辑：李艾稣

作者简介：

第一作者：康红普，中国工程院院士，博士。

E-mail: kanghp@163.com

作者单位：中煤科工开采研究院有限公司

热点问答

露天煤矿矿用卡车无人驾驶编组成功运行

露天煤矿是我国煤炭生产体系的重要组成部分，目前我国露天煤矿总计约450余座，总产能约为9.5亿吨/年，占我国煤炭总产量的25%以上，可以说，露天煤矿为国家能源安全与经济发展提供了重要支撑。

据统计，我国约有95%的露天矿采用单斗—卡车工艺。在露天煤矿生产成本中，卡车运输环节约占60%；同时露天煤矿卡车运输环节占劳动定员的45%左右，占用了大量的人力；而从安全角度看，我国露天煤矿的卡车运输环节事故起数占总事故起数的60%以上。未来，我国煤炭行业面临技术人员短缺、人工成本高、安全压力大等问题，迫切需要开展露天煤矿矿用卡车无人驾驶课题研究。

——来源：《中国煤矿智能化发展报告（2020年）》