

基于EBZ260M-2型掘进机的智能化掘进工作面建设研究

姚新宇¹ 兰天伟^{2,3} 唐小富^{2,3} 马耀荣¹ 王博¹

1. 北京昊华能源股份有限公司 鄂尔多斯市昊华红庆梁矿业有限公司, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 014316

2. 辽宁工程技术大学 鄂尔多斯研究院, 中国·内蒙古 鄂尔多斯 017010

3. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 中国·辽宁 阜新 123000

摘要: 目前煤矿巷道掘进设备的智能化水平远低于综采工作面, 缺乏对地质情况的超前精准探测、掘进机位姿、掘进工作面环境、设备运行状态和围岩参数等的自主感知能力, 根据煤矿安全高效生产的需要及智能化掘进工作面研究与建设目标。本论文建设应用 EBZ260M-2 型掘进机智能化掘进工作面, 通过深入分析远程控制与智能监测需求的基础上, 设计并实现了掘进机智能控制系统; 通过在掘进机本体部署高清摄像设备及无线传输基站等关键硬件, 构建了掘进机远程可视化系统, 实现了作业场景的实时远程监控; 利用数字孪生技术将“数据-模型-设备”进行拟合, 对掘进工作面情况进行全面的管理与控制, 形成了一套掘进工作面集控系统; 融合 AI 技术与 UWB 高精度定位技术, 建立了掘进机人员定位系统。

关键词: EBZ260M-2 型掘进机; 智能控制系统; 人员定位; 智能化掘进工作面; 远程集控

Research on intelligent heading face based on EBZ260M-2 roadheader

Yao Xinyu¹, Lan Tianwei^{2,3}, Tang Xiaofu^{2,3}, Ma Yaorong¹, Wang Bo¹

1. Beijing Haohua Energy Co., Ltd. Ordos City Haohua Hongqingliang Mining Co., Ltd., China Inner Mongolia Ordos 014316

2. Ordos Research Institute of Liaoning Technical University, China Inner Mongolia Ordos 017010

3. Mining College of Liaoning Technical University, China Liaoning Fuxin 123000

Abstract: At present, the intelligent level of coal mine roadway excavation equipment is far lower than that of fully mechanized mining face. It lacks the independent perception ability of advanced and accurate detection of geological conditions, roadheader pose, heading face environment, equipment operation status and surrounding rock parameters. According to the needs of safe and efficient production in coal mines and the research and construction goals of intelligent heading face, the intelligent heading face construction is carried out based on EBZ260 M-2 roadheader. On the basis of in-depth analysis of remote control and intelligent monitoring requirements, the intelligent control system of roadheader is designed and implemented. By deploying key hardware such as high-definition camera equipment and wireless transmission base station in the roadheader body, the remote visualization system of the roadheader is constructed, and the real-time remote monitoring of the working scene is realized. Using digital twin technology to fit the 'data-model-equipment', the comprehensive management and control of the heading face is carried out, and a set of heading face centralized control system is formed. Combining AI technology and UWB high-precision positioning technology, a roadheader personnel positioning system was established.

Keywords: EBZ260M-2 roadheader; Intelligent control system; Personnel positioning; Intelligent tunneling face; Remote centralized control

0 引言

截至 2025 年 8 月底, 全国已建成智能化采煤工作面 1922 处、智能化掘进工作面 2154 处。通过积极推进新一代信息技术与煤炭产业的深度融合, 持续加快煤矿智能化

建设进程, 已成功建成多座技术先进、具有行业引领作用的智能化示范煤矿。该举措显著实现了减员增效与安全水平提升, 进一步强化了煤炭在国家能源安全保障体系中的基础支撑与兜底作用。

作为煤矿生产的前端环节,传统煤矿巷道掘进施工主要采用掘进机配合单体锚杆钻机、连续掘进机与锚杆钻机联合作业,以及掘锚一体化机组等工艺模式^[1]。然而,受制于采掘工作面环境的复杂性,煤矿智能掘进技术发展进程相对缓慢。当前,巷道掘进装备的智能化水平显著低于综采工作面,具体表现为缺乏对超前地质条件的精确探测能力、掘进机位姿的实时感知能力、工作面环境与设备运行状态的智能辨识能力,以及围岩变形与力学参数的自动监测能力等。为提升掘进作业效率与智能化水平,可依托工业互联网、大数据分析及云计算等新一代信息技术^[2-5],针对掘进工艺方法、掘-支-运一体化装备及集中控制系统等关键环节开展技术攻关。

在国外的德国 VMT 公司开发的 TUnIS 导航系统^[6]通过融合多维激光与二维倾角传感技术,为传统隧道掘进提供了高精度测量与高性能导航功能,并引入基于单目相机的目标识别系统,以实现掘进机三维姿态的确定。奥地利 Geodata 公司^[7]研发的 TaurosRH 系统可集成于掘进机控制系统,能够实现截割头的高精度定位,并利用双轴倾角仪实时监测机体倾斜状态,从而支持自动断面截割作业。澳大利亚 PEMPEK 公司^[8]提出了一套适用于煤矿井下的掘进机激光导引与远程控制方案,该系统的核心组成部分包括顶板激光模块(L0YP)、机器控制系统(ObelixPLUS)、便携式控制室套件以及遥测系统(ROYCE)等。康红普院士团队^[9]构建了面向掘进作业自动化与智能化的总体技术框架,对相关关键核心技术进行了系统剖析,并进一步提出了阶段化发展路径。张旭辉^[10]探讨了当前煤矿远程智能掘进过程中存在的主要挑战及相应研究进展,指出应重视以数字孪生为驱动的掘进装备远程智能控制模型与技术体系的构建。胡兴涛等^[11]对煤矿巷道快速掘进的相关理论与关键技术进行了系统探讨,并构建了一套命名为 SmartX 的智能化掘进软件系统。该系统采用分层架构,主要包括数据源层、智能化超前感知与数据采集层、多源数据及图像传输存储层、大数据云平台数据分析层和决策应用层。王国法等^[12]系统梳理了我国智能化煤矿的建设进展,并根据煤层赋存条件的差异,提出了四种智能化开采模式,包括:面向大采高工作面的智能耦合人机协同高效开采模式,适用于薄及中厚煤层的无人化智能开采模式,以及针对综放工作面的智能控制与人工辅助放煤相结合的开采模式,以及适应复杂地质条件的机械化与智能化融合开采模式。

综上所述,智能化掘进工作面的研究现状显示,我国

在提升煤矿智能化水平方面已经取得一定成果,但仍面临一些挑战,包括掘进状态感知基础理论研究不足、掘进机定位问题尚待突破、掘进机定向导航与成形截割亟待深入研究等。因此对掘进机进行系统升级和改造研究是有助于提升智能化掘进工作面的建设,从而实现更高水平的自动化和智能化。

1 智能化掘进工作面建设

1.1 智能化掘进工作面控制系统分析

掘进机是煤矿智能化掘进工作面建设的关键设备。针对 EBZ260M-2 型掘进机,采用的智能化掘进工作面控制系统由掘进机电气系统、掘进机后配套电气系统和智能化控制系统三部分组成。

智能化控制系统由矿用隔爆兼本安型控制箱(简称数据分站)、矿用隔爆型信号转换器、矿用本安型无线基站、掘进工作面远程集控中心、掘进工作面地面调度室监控系统、组合导航系统、矿用本安型摄像仪、矿用本质安全型摄像仪、矿用浇封兼本安型读卡器(含标识卡)、矿用本安发射器(含腰带、充电器及配套天线)和各种传感器等组成。其中矿用隔爆型信号转换器和矿用本安型无线基站实现数据的远程传输;掘进工作面远程集控中心可放置于硐室或风门处,实现掘进机和后配套的远程可视化控制;数据分站、矿用本安发射器和各种传感器作为掘进工作面智能化控制系统重要组成部分,实现掘进机和后配套的智能化控制。

1.2 掘进机智能控制系统研究

1.2.1 远程控制单元

远程控制单元是实现智能化、自动化掘进的关键技术之一。其使得操作人员可以在安全的环境中远程操控掘进机,提高了作业的安全性和效率。远程控制系统依托多种传感设备对井下作业环境进行实时监测(视频与设备运行数据),并借助远程遥控、参数设定及地面一键启停等功能,实现对井下设备的远距离操控。

通过在掘进工作面设备上安装的摄像头、摄像仪、各种传感器、数据分站等相关设备,将掘进机工作时的音视频(主要包括截割画面、整机画面和后配套画面)以及设备运行状态信息等数据传输至掘进机后方的集控中心和地面调度室,如图 1 则是掘进机远程控制系统界面。通过数据解析技术,将音视频及数据信息分别显示在显示屏上,操作人员通过集控中心实时显示和播放的视频信息、音频信息和设备运行状态信息,通过遥控发射器,实现对掘进机的远程控制。

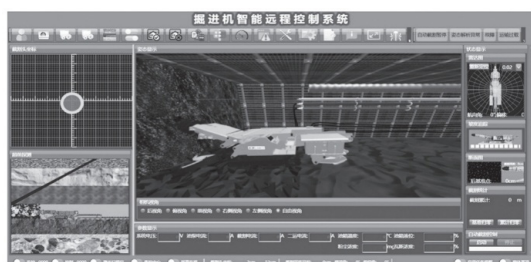


图1 掘进机智能远程控制系统界面

1.2.2 智能监测单元

在掘进工作面安装多种传感器,用于监测粉尘浓度、瓦斯含量、水量等关键环境参数。传感器实时收集环境数据,并将这些数据传输到掘进机的控制系统,控制系统内置的智能分析模块对收集到的环境数据进行处理和分析,以评估工作环境的安全状况和掘进机的性能。根据智能分析的结果,控制系统能够自动调整掘进机的操作参数,实现掘进、锚固、运输和支护等工序的智能联动。

通过对环境数据的智能分析,控制系统能够优化掘进作业流程,提高作业效率。操作人员可以在远程监控中心实时查看环境监测数据和掘进机的工作状态,进行远程管理和控制。系统会记录所有监测数据,供进一步的分析和决策使用,以持续改进作业流程和安全措施。

1.3 掘进机远程可视化系统研究

1.3.1 掘进工作面状态远程监视

集控中心和地面调度室用于掘进工作面视频监控和数据监控,集控中心布置六台 21 寸液晶显示屏、地面调度室布置六台 27 寸宽屏曲面显示器用于显示视频和数据画面,视频可以实现全屏和六宫格显示。

如图 2 (a)、(b) 所示,为掘进机视频监控画面,视频画面中每路摄像头视频都具备抓图、录像、回放、存储和拷贝等功能,数据画面用来显示掘进机重要参数,并且与嵌入式面板或遥控器发射器配合实现相应姿态传感器参数标定、巷道边界标定以及定位截割控制,数据画面具备查询一些重要电气设备的参数以及报警信息功能,为工作人员统计设备运行状况以及故障分析提供了重要的数据支撑,如图 2 (c) 所示为历史数据查询画面。



(a)



(b)

时间	位置	粉尘浓度	瓦斯浓度	温度	湿度	风速	噪音	振动	其他
2023-10-27 10:00:00	掘进机	0.15	0.05	25.0	65.0	1.0	85.0	0.5	正常
2023-10-27 10:05:00	掘进机	0.18	0.06	25.5	66.0	1.1	86.0	0.6	正常
2023-10-27 10:10:00	掘进机	0.20	0.07	26.0	67.0	1.2	87.0	0.7	正常
2023-10-27 10:15:00	掘进机	0.22	0.08	26.5	68.0	1.3	88.0	0.8	正常
2023-10-27 10:20:00	掘进机	0.25	0.09	27.0	69.0	1.4	89.0	0.9	正常
2023-10-27 10:25:00	掘进机	0.28	0.10	27.5	70.0	1.5	90.0	1.0	正常
2023-10-27 10:30:00	掘进机	0.30	0.11	28.0	71.0	1.6	91.0	1.1	正常
2023-10-27 10:35:00	掘进机	0.32	0.12	28.5	72.0	1.7	92.0	1.2	正常
2023-10-27 10:40:00	掘进机	0.35	0.13	29.0	73.0	1.8	93.0	1.3	正常
2023-10-27 10:45:00	掘进机	0.38	0.14	29.5	74.0	1.9	94.0	1.4	正常
2023-10-27 10:50:00	掘进机	0.40	0.15	30.0	75.0	2.0	95.0	1.5	正常
2023-10-27 10:55:00	掘进机	0.42	0.16	30.5	76.0	2.1	96.0	1.6	正常
2023-10-27 11:00:00	掘进机	0.45	0.17	31.0	77.0	2.2	97.0	1.7	正常
2023-10-27 11:05:00	掘进机	0.48	0.18	31.5	78.0	2.3	98.0	1.8	正常
2023-10-27 11:10:00	掘进机	0.50	0.19	32.0	79.0	2.4	99.0	1.9	正常
2023-10-27 11:15:00	掘进机	0.52	0.20	32.5	80.0	2.5	100.0	2.0	正常
2023-10-27 11:20:00	掘进机	0.55	0.21	33.0	81.0	2.6	101.0	2.1	正常
2023-10-27 11:25:00	掘进机	0.58	0.22	33.5	82.0	2.7	102.0	2.2	正常
2023-10-27 11:30:00	掘进机	0.60	0.23	34.0	83.0	2.8	103.0	2.3	正常
2023-10-27 11:35:00	掘进机	0.62	0.24	34.5	84.0	2.9	104.0	2.4	正常
2023-10-27 11:40:00	掘进机	0.65	0.25	35.0	85.0	3.0	105.0	2.5	正常
2023-10-27 11:45:00	掘进机	0.68	0.26	35.5	86.0	3.1	106.0	2.6	正常
2023-10-27 11:50:00	掘进机	0.70	0.27	36.0	87.0	3.2	107.0	2.7	正常
2023-10-27 11:55:00	掘进机	0.72	0.28	36.5	88.0	3.3	108.0	2.8	正常
2023-10-27 12:00:00	掘进机	0.75	0.29	37.0	89.0	3.4	109.0	2.9	正常
2023-10-27 12:05:00	掘进机	0.78	0.30	37.5	90.0	3.5	110.0	3.0	正常
2023-10-27 12:10:00	掘进机	0.80	0.31	38.0	91.0	3.6	111.0	3.1	正常
2023-10-27 12:15:00	掘进机	0.82	0.32	38.5	92.0	3.7	112.0	3.2	正常
2023-10-27 12:20:00	掘进机	0.85	0.33	39.0	93.0	3.8	113.0	3.3	正常
2023-10-27 12:25:00	掘进机	0.88	0.34	39.5	94.0	3.9	114.0	3.4	正常
2023-10-27 12:30:00	掘进机	0.90	0.35	40.0	95.0	4.0	115.0	3.5	正常
2023-10-27 12:35:00	掘进机	0.92	0.36	40.5	96.0	4.1	116.0	3.6	正常
2023-10-27 12:40:00	掘进机	0.95	0.37	41.0	97.0	4.2	117.0	3.7	正常
2023-10-27 12:45:00	掘进机	0.98	0.38	41.5	98.0	4.3	118.0	3.8	正常
2023-10-27 12:50:00	掘进机	1.00	0.39	42.0	99.0	4.4	119.0	3.9	正常
2023-10-27 12:55:00	掘进机	1.02	0.40	42.5	100.0	4.5	120.0	4.0	正常

(c)

图2 历史数据查询画面

1.3.2 掘进机工作面工况参数信息监测

通过在掘进机机身合适位置布置三路低照度摄像头、机身尾部一路集成音频输入输出的网络摄像仪以及在组合开关布置两路低照度摄像头实现掘进工作面音视频信息监测,还原工作面视频画面及音频信息。其中掘进机上四路摄像头用于监视掘进机前方断面、悬臂运动情况、机尾后方情况及实现语音对讲。组合开关上两路摄像头用于监视自移机尾前方和后方情况。

通过在掘进机机身上布置两个物位传感器测量掘进机与巷道的距离。最终,借助布置于掘进机身上的各类传感器与摄像装置,实现对设备运行状态及周边环境音视频数据的实时采集,利用 5G 无线通讯技术将工作面音视频信息和整机工况参数传输至工作面后方的集控中心和地面调度室,实现数据的远程传输。通过集控中心和地面调度室显示相关视频和数据信息,为就地人员提供控制决策。

2 掘进机集控系统研究

2.1 智能化控制算法

基于智能化控制算法,系统可实现设备的一键式启停控制、供配电管理、设备运行状态监测、视频监控、无线数据网络调度、单元可视化操作、多机协同控制、远程集中调控及流程自动启停等功能。该系统能够适应工作面恶劣工况,有效避免工作人员暴露于高粉尘、强噪声及高危作业区域,显著改善劳动条件,降低安全事故发生风险,并提升掘进作业的效率与整体安全性。

2.2 井下集控中心与地面集控中心

在煤矿巷道掘进中，井下集控中心与地面集控中心是两个重要的控制枢纽，它们共同构成了矿山智能化管理的核心部分。以下是井下集控中心与地面集控中心的主要职责和特点：

（1）井下集控中心：

井下集控中心位于矿井内部，负责对井下作业的直接控制和监控。由于井下环境的特殊性，如高湿度、高粉尘、瓦斯、有限空间等，井下集控中心需要具备良好的环境适应性。井下集控中心收集井下作业区域的各种数据，包括环境参数、设备状态、作业进度等，监控井下作业设备的状态，如掘进机、输送带、通风系统等，确保设备正常运行。在紧急情况下，如瓦斯泄漏、火灾等，井下集控中心能够迅速响应并采取措。

（2）地面集控中心：

地面集控中心负责远程监控井下作业的全面情况，通过实时数据和视频监控系统。为矿山管理层提供决策支持，如作业调度、资源分配、安全策略制定等。

智能掘进管控平台主要安装于掘进工作面集控中心（即井下集控中心），承担井下底层数据的采集、传输、解析、边缘计算、协同控制及存储等核心任务。该平台利用井下工业以太网，将预处理后的数据上传至地面调度指挥中心（地面集控中心），从而实现对掘进生产过程的实时分析及集中调度管理。该平台能够定期通过反馈机制进行自我迭代与优化。

集控中心是掘进机智能化控制系统重要组成部分，借助数据传输系统将掘进机动态画面、整机关键参数、机身位姿参数等重要信息呈现出来，实现掘进机的远程可视化控制。如图 3 所示，为井下集控中心内部电气元件图。

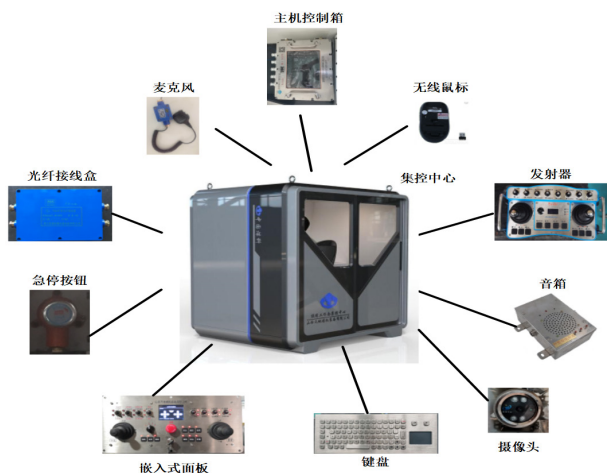


图3 井下集控中心内部电气元件图

2.3 掘进机定位系统研究

2.3.1 视觉 AI 技术的应用

视觉 AI 技术利用摄像头或其他视觉传感器捕捉场景中的图像或视频，并通过深度学习算法对图像进行分析和处理，以实现目标检测、识别和跟踪。在人员防误入系统中，视觉 AI 技术主要用于：① 实时监测人员位置：系统会不断扫描工作区域，使用视觉 AI 技术检测工作区域内的人员位置和活动情况^[20]。② 识别人员身份：视觉 AI 技术能够识别出进入禁止区域的人员身份，例如工作人员或外来人员。

2.3.2 UWB 高精度定位技术的应用

UWB 技术通过发送和接收超短脉冲信号来测量距离，具有高精度和抗干扰能力。在人员防误入系统中，UWB 技术可用于精确定位人员位置和区分禁止区域。

（1）精确定位人员位置：UWB 定位系统可以精确测量人员在工作区域内的位置，提供高精度的定位信息。基于 UWB 精确定位技术，系统能够对入井人员实现从入井至出井全过程的动态监控。人员入井后，井下部署的 UWB 定位网络可对其位置进行实时高精度追踪，地面人员可通过上位机系统查看每位井下工作人员的实时位置。调度管理人员能够借助定位终端设备与井下人员实现指令交互，并可及时接收其发出的求助信号，确保紧急情况下的信息快速传达。此外，该系统还支持历史轨迹回放功能，可根据所记录的精确位置数据重现指定人员在特定时刻的活动路径。

同时系统可对井下人员实施实时动态定位与跟踪，并对特种作业人员的工作位置和作业时长进行精细化管控。针对巡检人员或其他需严格管理的工作者，系统可依据预设路径对其移动轨迹进行监测，从而推动煤矿人员作业管理向规范化与自动化方向发展。在发生井下紧急事件时，安全监测系统可实时联动人员定位系统，实现对特定区域或全矿范围内人员的快速疏散与精准调度^[21-23]。该机制显著提升了应急响应的针对性、准确性与时效性，增强了矿井管理的整体效能。煤矿井下人员精确定位系统的结构如图 4 所示。



图4 井下人员精确定位系统

(2) 区分禁止区域: 采掘工作面环境复杂且安全风险较高, 因此需持续增强防护体系的精准性与可靠性, 同时提升自动化控制与智能监测水平, 为井下作业人员提供更为安全的作业环境。当人员进入管控区域或接近危险源时, 接近保护装置将自动触发语音报警, 并可联动控制转载机、带式输送机、采煤机及掘进机等设备执行闭锁停机。通过在固定或移动范围较小的设备上部署 UWB 全向定位设备, 有效遏制工作面违规作业现象。

3 结语

(1) 对远程控制和智能监测进行了分析研究, 构建了掘进机智能控制系统。

(2) 通过在掘进机上安装的高清摄像头、传输站等相关设备, 建立了掘进机远程可视化系统。

(3) 基于数字孪生技术, 实现了“数据-模型-设备”的系统融合, 从而对掘进工作面实施全流程智能化监控与调控, 并形成了一套掘进工作面集控系统。

(4) 基于视觉 AI 与 UWB 高精度定位技术, 构建了一套人员防误入系统, 该系统融合了主动与被动的组合检测机制, 实现了对人员进入危险区域的实时识别和预警。

参考文献:

[1] 康红普, 王国法, 王双明等. 煤炭行业高质量发展研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(5): 130-138.

[2] 汤家轩, 刘具, 梁跃强等. “十四五”时期我国煤炭工业发展思考[J]. 中国煤炭, 2021, 47(10): 6-10.

[3] 王步康. 煤矿巷道掘进技术与装备的现状与趋势分析[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 1-11.

[4] 鄢丽娜, 刘永宏. 我国煤矿智能化建设全面升级提速[N]. 中国煤炭报, 2023-04-22(001).

[5] 张建国, 孙海良, 张国川等. 煤矿智能掘进关键

技术探讨及工程实践研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(2): 609-621.

[6] MAOS, SHEN XS, LU M, Virtual laser target board for alignment control and machine guidance in tunnel-boring operations[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2015, 79: 385-400.

[7] GEODATA Survey & Monitoring Group, Navigation system for roadheader[EB/OL]. https://www.geodata.com/en/produkte/tauros_xh/.

[8] Pempek. Underground Miner Laser Guidance and Remote Control System [EB/OL]. <https://pemupek.com.au/underground-miner-laser-guidance-and-remote-control-system/>.

[9] 康红普, 姜鹏飞, 高富强等. 掘进工作面围岩稳定性分析及快速成巷技术途径[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2023-2045.

[10] 张旭辉, 杨文娟, 薛旭升等. 煤矿远程智能掘进面临的挑战与研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 579-597.

[11] 胡兴涛, 朱涛, 苏继敏等. 煤矿巷道智能化掘进感知关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2123-2135.

[12] 王国法, 刘峰, 孟祥军等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J]. 煤炭科学技术. 2019, 47(8): 1-36. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.08.001.

基金项目: 鄂尔多斯市标志性创新团队项目(TD20240005); 鄂尔多斯市重点研发计划项目(YF20250274); 鄂尔多斯市科技“突围”工程“揭榜挂帅”重大项目(JB20251447)。

作者简介: 姚新宇(1991.10-), 男, 内蒙古赤峰市人, 大学本科, 工程师, 研究方向: 主要从事煤矿采掘技术、地测防治水方面的研究工作。