



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

# 煤炭科学技术

## 煤矸石井下原位智能分选充填技术研究进展

梁卫国 郭凤岐 于永军 张泽寒 闫俊才

### 引用本文:

梁卫国, 郭凤岐, 于永军, 等. 煤矸石井下原位智能分选充填技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 12-27.

LIANG Weiguo, GUO Fengqi, YU YongJun. Research progress on in-situ intelligent sorting and filling technology of coal gangue underground[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 12-27.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1677>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 煤矸石浆体充填技术应用与展望

Application and prospect of coal gangue slurry filling technology

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 93-104 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1919>

#### 多机械臂煤矸石智能分拣机器人关键共性技术研究

Research on key generic technology of multi-arm intelligent coal gangue sorting robot

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 427-436 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2215>

#### 煤矸分拣机器人设计与关键技术分析

Design and key technology analysis of coal-gangue sorting robot

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 232-238 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/941fe867-4493-4ef1-9dbf-8462a2f31f9b>

#### 煤矿智能化(初级阶段)技术体系研究与工程进展

Research and engineering progress of intelligent coal mine technical system in early stages

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5cddf0e4-cce7-450b-8092-a015069d6bd6>

#### 采空区煤矸石浆体充填技术研究进展与展望

Research progress and prospect of coal gangue slurry backfilling technology in goaf

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 143-154 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1725>

#### 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨

New technological progress of coal mine intelligence and its problems

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 1-27 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b16ab13f-c432-4b3b-9f79-3a21e61d95f2>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

梁卫国, 郭凤岐, 于永军, 等. 煤矸石井下原位智能分选充填技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 12-27.  
LIANG Weiguo, GUO Fengqi, YU YongJun, *et al.* Research progress on in-situ intelligent sorting and filling technology of coal gangue underground[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 12-27.

## 煤矸石井下原位智能分选充填技术研究进展

梁卫国<sup>1,2</sup>, 郭凤岐<sup>1,2</sup>, 于永军<sup>1,2</sup>, 张泽寒<sup>1,2</sup>, 闫俊才<sup>1,2</sup>

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

**摘要:**传统井下煤矸石需运输至地面处理, 不仅占用地面国土空间、自燃或雨水淋滤造成大气与环境污染, 而且长距离无效运输造成的能源消耗问题已成为制约煤矿低碳发展的关键瓶颈。为实现煤矿矸石不出井, 从煤炭生产源头减少碳排放与单位产出能源资源消耗, 实现煤炭的绿色低碳智能开采, 回顾了煤矸石井下分选充填技术现状及智能化进展, 并在此基础上展望煤矸石井下分选充填技术发展趋势, 提出了煤矸石井下原位绿色智能分选、充填新方法, 详细阐述了煤矸智能分选机及新型充填液压支架的结构及原理, 以最大化缩短矸石无效运输距离。为处理采煤工作面矸石, 预防煤岩动力灾害, 提出了包含少矸化智能开采系统、原位智能分选系统、工作面矿压反演系统、精准科学充填系统四大子系统的煤矿井下采选充智能一体化系统, 并探讨了各子系统间的新环逻辑关系, 以形成采煤利于分选、分选利于充填、充填利于采煤的良性循环。为处理掘进工作面矸石, 提出了包含智能快掘系统、智能分选系统、煤矸分运系统、智能充填系统四大子系统的煤矿井下掘选充智能一体化系统, 并对各子系统所负责工作及智能化实现进行了阐述。所提出的新工艺有望实现煤矿矸石不出井, 并为煤矸石原位智能分选充填方法及采选充一体化系统的研究提供新思路。

**关键词:** 低碳开采; 智能化; 煤矸识别; 原位分选充填; 采选充一体化

中图分类号: TD823

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)04-0012-16

### Research progress on in-situ intelligent sorting and filling technology of coal gangue underground

LIANG Weiguo<sup>1,2</sup>, GUO Fengqi<sup>1,2</sup>, YU YongJun<sup>1,2</sup>, ZHANG Zehan<sup>1,2</sup>, YAN Juncai<sup>1,2</sup>

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Key Laboratory of In-situ Property-Improving Under Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Coal gangue needs to be transported to the ground for further treatment in traditional underground mines, which not only occupies land spaces, but also causes atmospheric and environmental pollutions due to spontaneous combustion and rainwater leaching. Moreover, energy consumption problems caused by long-distance ineffective transportation have become a key bottleneck restricting the low-carbon development of coal mines. In order to realize the underground disposal of coal gangue, and to reduce carbon emission and energy resource consumption per unit output from the source of coal production, as well as to realize the green low-carbon intelligent mining of coal, the present situation and intelligent progress of underground sorting and filling technology of coal gangue are comprehensively reviewed, and in this regard, the developing trend of underground sorting and filling technology of coal gangue is also anticipated. Meanwhile, an innovative method of underground in-situ green intelligent sorting and filling of coal gangue is proposed, and the structure and principle of coal gangue intelligent sorting and new filling hydraulic support are described in detail, so as to minimize the invalid transportation distance of gangue. In order to deal with the gangue of coal mining face and prevent the dynamic disaster of coal and rock, an intelligent integrated system of mining, sorting and filling in coal mine is designed, including four subsystems, i.e., an intelligent mining system with less gangue, an in-situ intelligent sorting system, a mine pressure inversion system of working face and a precise scientific filling sys-

收稿日期: 2023-12-11 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.12438/cst.2023-1677

基金项目: 国家区域创新发展联合基金重点资助项目 (U22A20167)

作者简介: 梁卫国(1972—), 男, 山西孟县人, 教授, 博士生导师。E-mail: liangweiguo@tyut.edu.cn

tem. Meanwhile, new logic relationships among multiple subsystems are discussed, so as to form a virtuous cycle of coal mining conducive to sorting, sorting conducive to filling and filling conducive to coal mining. In order to deal with the gangue in the heading face, an intelligent integrated system of underground excavation, aimed at sorting and filling in coal mine is proposed also with four subsystems, i.e., an intelligent fast excavation system, an intelligent sorting system, a coal gangue transportation system and an intelligent filling system, and the work and intelligent realization of each subsystem are described. The proposed new process in this study is expected to realize the underground disposal of coal gangue, and provide new ideas for the research of in-situ intelligent sorting and filling method of coal gangue and the integrated system of mining, sorting and filling.

**Key words:** low carbon mining; intelligent mining; coal gangue identification; in-situ sorting filling; integration of mining

## 0 引言

中国共产党第二十次全国代表大会指出, 推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展、促进人与自然和谐共生的关键环节<sup>[1]</sup>。相比于世界能源消费结构中煤炭、石油、天然气长期处于各约30%的占比状态, 我国一次能源中煤炭消费总量长期占比60%以上, 其导致了多年来我国二氧化碳排放量一再位居世界首位<sup>[2-6]</sup>。如何从煤炭生产的源头减小碳排放与单位产出能源资源消耗, 利用科技进步实现煤炭资源的绿色高效开采是当前煤炭行业迫切需要解决的难题<sup>[7-8]</sup>。

传统垮落法处理采空区的煤炭开采方式下, 原煤采出后覆岩发生下沉、破断并不断向上发展, 导致地表沉陷、水土流失、植被枯死与耕地破坏等一系列问题。与此同时, 原煤地面洗选后固体废物堆积形成矸石山, 当矸石山剧烈燃烧时, 每天释放出的二氧化碳达数万立方米。且随着我国矿井逐步向深部推进, 矸石地面洗选井下充填的处理方式也使矸石无效运输耗能逐年上升, 深部开采的强矿压问题也始终威胁着采矿安全。数据显示, 传统煤炭生产中伴生的固体废物矸石一般为原煤产量的15%~25%<sup>[9]</sup>。截至目前, 我国矸石累计堆放量超过70亿t, 形成规模较大的矸石山1600多座, 占地1.5万hm<sup>2</sup>, 且以6.0亿~7.5亿t的排放量逐年增加; 因采矿破坏的土地面积达400万hm<sup>2</sup>, 因采矿引起的塌陷面积达11.5万hm<sup>2</sup>, 发生采矿塌陷灾害的城市30多个; 2010—2020年, 全国煤矿发生冲击地压事故25起、死亡119人、受伤108人, 预防与治理煤炭开采所带来的环境污染、地质破坏、动力灾害等问题迫在眉睫<sup>[10-15]</sup>。

考虑上述问题, 若将原煤伴生矸石在井下进行原位分选与充填处理, 并对井下生产一线的采掘、分选、充填工艺进行一体化设计, 形成高度集约化与智能化的煤矿井下采(掘)选充一体化系统, 有望减少矸石地面堆积自燃或雨水淋滤造成的环境污染, 同

时最大化的缩短矸石无效运输距离, 降低单位产出能源资源消耗, 在生产源头形成有效的碳排放控制阀门。

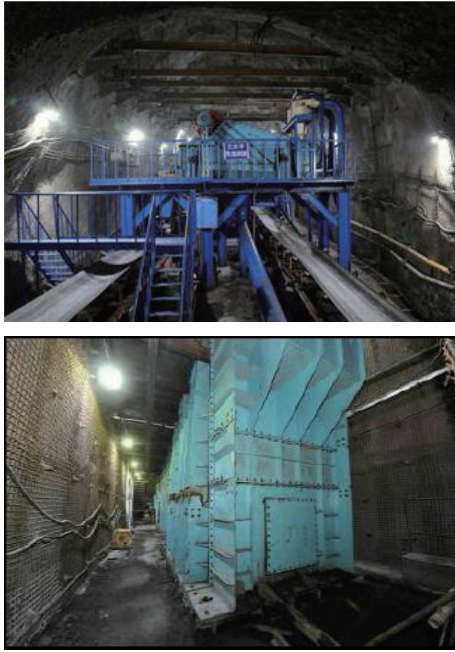
基于此, 系统论述了煤矸石井下分选充填的技术现状及智能化研究进展, 从煤矿绿色开采的角度出发, 将节约能源资源放在首位, 提出煤矸石井下原位绿色智能分选充填新方法以及以矸石原位智能分选充填为核心的采、掘选充智能一体化系统, 并探讨其子系统的新环逻辑关系, 以期实现煤矿矸石不出井, 并为煤矸石原位智能分选、充填方法及采选充一体化系统的研究提供新思路。

## 1 煤矸石井下分选充填技术

### 1.1 煤矸石井下分选技术

随着矿井的大型化与开采技术的现代化, 放顶煤和薄煤层开采技术广泛应用于煤矿开采中, 导致工作面煤层顶、底板岩石在开采过程中大量混入原煤, 原煤含矸率显著增加。原煤中的矸石来源主要包括巷道掘进时产生的矸石, 保护层开采、综放开采煤过程中混入的矸石, 煤层中的夹矸, 工作面回采过程中顶板冒落的矸石, 采煤工作面因地质条件变化而采出的矸石等。

近年来, 相关学者针对煤矸井下分选开展了大量研究, 并在多家煤矿进行了工业应用。所形成的煤矸井下分选方法主要分为干法选矸和湿法选矸2种, 其中湿法选矸包括跳汰分选、重介浅槽分选和旋流器分选等<sup>[16]</sup>; 干法选矸包括人工分拣、选择破碎法分选、图像识别、多光谱识别、射线识别(X射线或 $\gamma$ 射线)、三维激光扫描等<sup>[17-23]</sup>。各方法主要是依据煤与矸石不同的物理性质对二者进行区分, 如煤矸的密度、灰度、纹理、硬度、放射性、导磁性等。目前, 煤矸井下分选技术已成功应用于新巨龙煤矿、济阳煤矿、翟镇煤矿、平煤集团十二矿、龙煤集团益新煤矿、冀中能源邢东矿、开滦集团唐山矿、山东良庄矿业和西山煤电集团杜儿坪煤矿等, 主要分离方法为重力选矿法、重介浅槽法及动筛跳汰法<sup>[24-27]</sup>(图1)。

图1 煤矸井下分选技术<sup>[27]</sup>Fig.1 Underground sorting technology of coal gangue<sup>[27]</sup>

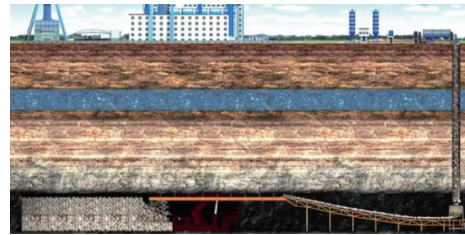
## 1.2 煤矸石井下充填技术

众所周知,充填开采能够有效控制岩层移动和地表沉陷,实现煤炭低环境损伤的开采目标,符合绿色开采的发展要求,尤其在我国中东部“三下”压煤较严重的矿区有显著技术优势和良好应用前景<sup>[28]</sup>。而煤矸石井下充填是实现煤矸石综合利用的重要途径之一,其对于煤炭绿色开采的推行具有重大意义。

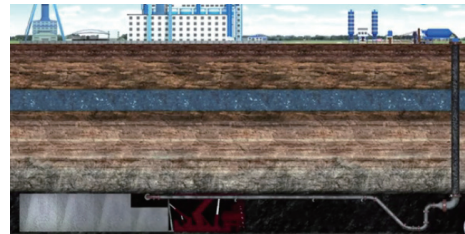
目前,矸石井下充填方法按材料不同,分为散体矸石直接充填、矸石加胶结剂胶结充填、矸石加粉煤灰加凝石等材料制成似膏体充填、矸石加粉煤灰加水泥等材料制成膏体充填、矸石加水制成浆体注浆充填<sup>[9,29-32]</sup>。按充填方式不同,分为采空区全部充填、充填协同垮落法开采、长壁条带充填、墩柱充填、切顶充填、沿空留巷充填、急倾斜煤层分段充填和连采连充等<sup>[9,29,33-38]</sup>。经过长期发展,逐渐形成了固体矸石直接充填与膏体矸石管输充填2套充填工艺(图2)。

## 1.3 采选充一体化技术

传统煤炭生产模式中,采煤、选煤、充填各为独立的系统,煤炭由井下采出后运至地面选煤厂进行分选,选出的矸石再由地面运输至井下充填工作面处理,矸石长距离往返运输及设备占用问题一直未得到有效解决。随着我国矿井现代化建设进程加快,井下煤矸分离技术的不断发展成熟,逐步形成了井下采煤→分选→充填一体化技术,其是指将采煤、选煤、充填工艺有机的结合在一起,在煤矿井下形成“采煤→分选→充填→采煤”的循环闭合开采体系,从而实现煤炭的安全、绿色、高效开采。



(a) 固体矸石直接充填工艺



(b) 膏体矸石管输充填工艺

图2 煤矸石井下充填工艺

Fig.2 Underground filling process of coal gangue

在煤矿井下采选充一体化研究方面,张吉雄等<sup>[39-41]</sup>针对过去几十年形成的采煤与充填分离、先采煤后充填的固定模式,结合自行研发的底卸式刮板输送机、采煤与充填一体化液压支架等设备,率先提出了综合机械化固体充填采煤一体化技术,并阐述了其原理;此后,逐步构建了采选充、采选抽充采、“采选充+X”等一体化集成系统,并提出了煤矿矸石井下分选协同原位充填开采模式<sup>[16,27,42-43]</sup>(图3)。理论研究方面,针对“采选充+X”一体化矿井的开采技术问题的复杂性,屠世浩等<sup>[28]</sup>从充填控制岩层移动、应力集中、裂隙场发育、留(掘)巷稳定等角度出发,提出了满足不同充填控制要求的选择性开采技术的理论框架,并从理论上进一步展开研究。此外,也有不少学者在工艺装备上进行了优化,如刘峰等<sup>[44]</sup>分析了煤炭采选一体化绿色生产的必要性,将两产品重介质旋流器用于井下巷道排矸,结合条带充填开采创立了煤炭采选一体化的绿色生产新模式。杨所武、郭二鹏等<sup>[45-46]</sup>则基于煤矿井下采选充采一体化循环闭合开采模式,在采选充采一体化系统的布置和工艺方面进行了优化设计,形成了高效的井下煤矸分选和采空区充填技术。

上述关于煤矸石井下分选充填技术的研究主要集中在工艺装备的优化改善以及充填理论的推陈出新,但在智能控制与决策方面还有待深入探究。如今,第4次工业革命席卷全球,新一代信息技术与能源矿业工程的深度融合成为必然趋势。以5G、大数据、人工智能、区块链等为代表的新一代信息技术,已成为煤矿智能化和智能绿色矿山建设的重要支

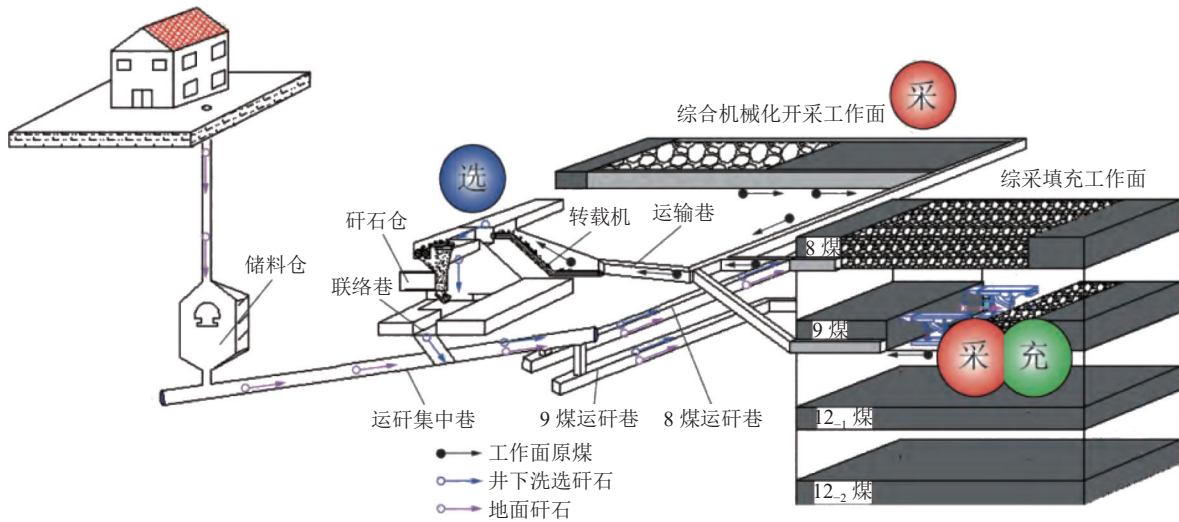


图3 采选充采一体化生产系统<sup>[42]</sup>

Fig.3 Integrated production system of mining, sorting, filling and mining<sup>[42]</sup>

撑<sup>[47-48]</sup>。只有建设符合煤矿开采特色的矿山大数据云平台,研发满足特定作业要求的智能算法,开发矿山多源异构数据的深度融合处理、智能系统装备云端运维、信息实时感知的远程专业化分析处理等增值服务,才有利于推进矿山智能化的快速发展,形成智能化矿山高质量运行新模式。

## 2 煤矸石井下智能分选充填技术

### 2.1 煤矸石井下智能分选技术

随着大数据技术的发展,数据驱动检测技术在煤炭行业的应用越来越广泛。支持向量机(Support Vector Machine, SVM)及人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)等监督学习方法常被应用于学习特征向量与模式之间的映射关系;深度学习(Deep Learning, DP)则主要利用数据训练神经网络,指导机器高质量、高效率地完成各种任务<sup>[49]</sup>。目前的智能识别体系中,部分学者将神经网络与煤矸识别结合,以实现煤矸的智能识别与分选。

TDS智能干选机作为煤矸井下射线分选的代表性装置,采用智能算法结合X射线识别技术实现了煤矸的高效分选,以其设备体积小、系统简单、不污染地下水等优点,已应用于黄陵一号矿、双柳煤矿、滨湖煤矿等国内多个矿井,取得了良好的经济效果与社会效益<sup>[50-54]</sup>(图4)。

鉴于图像识别技术(Digital Image Process, DIP)具有成本低、安全稳定、易与人工智能等前沿技术相结合的优势,国内外研究人员逐步开始从图像分析或视觉计算的角度对煤矸识别进行研究。在图像纹理特征的研究方面,LIU等<sup>[55]</sup>通过建立不同矿石的

综合识别模型和支持向量机模型,完成了不同矿石的识别。Hui-ling M等<sup>[56]</sup>则针对煤岩纹理特征的不同,以GLCM对煤岩特征进行提取,用BPNN对煤岩界面进行识别,该方法一定程度上提高了煤岩识别的效率。此外,也有学者利于其他方式进行煤矸识别的,如HOU等<sup>[57]</sup>采用灰度直方图和GLCM得到适于煤矸识别的煤矸特征参数,并以FFNN为分类器,实现了煤矸自动识别。MAXWELL K等<sup>[58]</sup>使用监督学习技术基于现场钻井数据对变质煤成功进行了分类与识别。在煤矸的检测及定位方面,曹现刚等<sup>[59]</sup>利用基于迁移学习的改进Alexnet网络和RPN网络,结合相机标定技术,成功实现了对煤矸的检测及定位,同时也证明了深度学习方法可以应用于煤矸分选。赵浩棣<sup>[18]</sup>则结合煤矸识别与定位系统的需求,提出了基于可见光机器视觉的煤矸识别与定位技术及一套包含图像去噪增强、分割定位的煤矸识别与定位算法,满足了实际工程对煤矸识别与定位的精度需求,如图5所示。

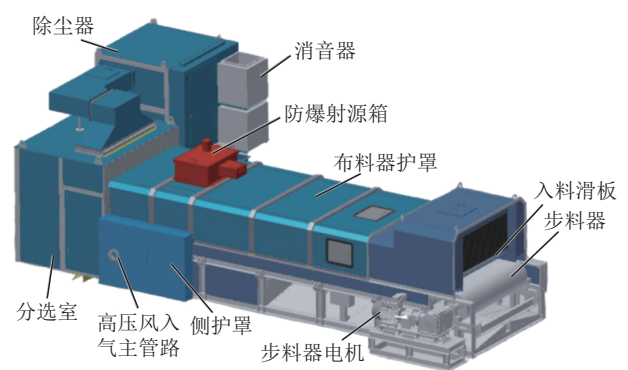
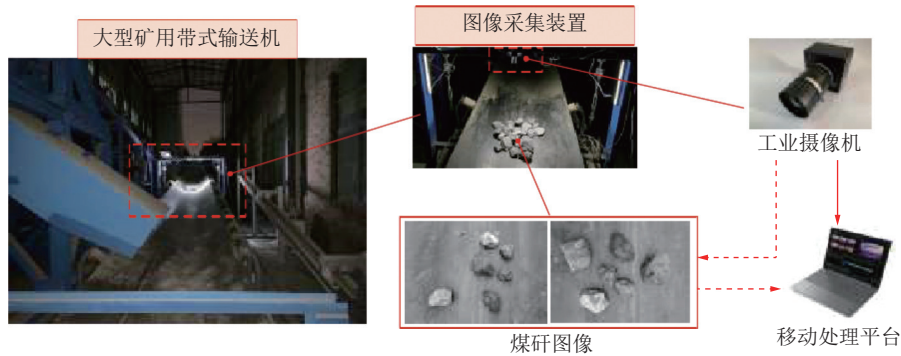


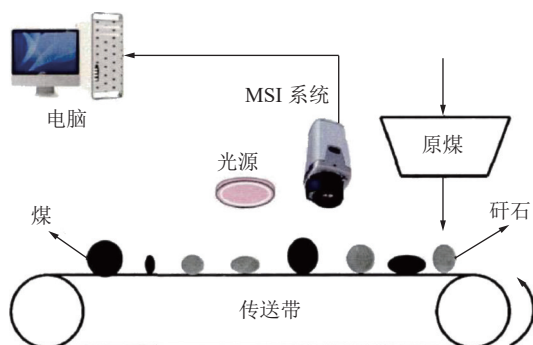
图4 TDS智能干选机<sup>[54]</sup>

Fig.4 TDS intelligent dry separator machine<sup>[54]</sup>

图5 图像识别过程<sup>[60]</sup>Fig.5 Image recognition process<sup>[60]</sup>

多光谱成像(Multispectral Imaging, MSI)作为一种在农业、食品科学和生物医学等领域应用广泛的高效无损检测手段,近年来也已被应用于煤矸石识别的研究中。其是以煤和矸石的多光谱数据为研究对象,通过分析多光谱数据(图像信息和光谱信息)来辨识煤矸。如王聘<sup>[60]</sup>将多光谱成像技术结合聚类算法应用于煤矸石识别的研究中,这种无监督学习方式省去了建立标签等繁琐步骤,为煤矸石精准识别提供了一种新的思路的同时,也丰富了聚类算法的应用。TRIPATHY D P<sup>[61]</sup>则研究了一种基于多光谱颜色纹理融合的煤矸石识别方法,获得了较好的煤矸石识别率。针对多光谱的图像信息和光谱信息的异构特性,HU等<sup>[21]</sup>结合深度学习提出了一种用于二维图像数据和一维光谱数据的异构融合卷积神经网络(CNN)识别模型,并将其成功应用于煤和矸石的多光谱辨识问题中,推动了多光谱的图谱异构融合的发展(图6)。来文豪等<sup>[62]</sup>利用轻量级目标检测速度快、精度高的优势,结合多光谱信息成功实现了煤矸石识别。

随着深度学习的不断发展,单模态的识别无论在识别性能还是在安全性上均存在瓶颈,而多模态融合技术可以将不同类型的数据(信息)进行融合,进一步提高识别的准确率和稳定性<sup>[63]</sup>。鉴于煤矿井

图6 多光谱识别<sup>[21]</sup>Fig.6 Multispectral recognition<sup>[21]</sup>

下工作环境复杂,依靠可见光图像单一数据进行检测效果并不稳定,笔者提出一种融合图像和密度信息的煤矸石检测深度神经网络 FD-YOLOv4-tiny,该网络首先利用 Dualbranch-Fusion 模块提取可见光图像和红外图像特征,采用 Addition 策略对二者进行融合,再利用 FDhead 融合图像和密度多模态信息,最后解码运算实现对煤矸石目标的分类和定位,经测试,模型的 MAP(Mean Average Precision)值达到 99.02%,说明 FD-YOLOv4-tiny 可以有效完成煤矸石目标检测(图7)。

## 2.2 煤矸石井下智能充填技术

随着人工智能的发展,相关学者在充填开采智能化方面亦展开了大量研究。

在智能算法的应用方面,齐冲冲等<sup>[64-67]</sup>对全尾砂絮凝沉降特性、细粒尾矿絮凝脱水特性、胶结充填体强度等进行了预测,获得了良好效果。吴爱祥、DU K等<sup>[68-72]</sup>基于充填体强度与采场稳定性需求智能匹配、胶结充填料浆流动性和强度特性、胶结充填体全时序应力演化规律,相继构建了材料强度、流变性能与充填料浆环管压降的智能预测模型,基本实现了材料配比、泵送参数及充填工艺的智能控制。在智能装备的改造方面,张强等<sup>[73-74]</sup>基于 MDH 运动学建模,提出了充填关键装备工况位态精准表征方法,阐述了多孔底卸式刮板输送机和充填液压支架智能化改造方法,设计了固体智能充填控制程序与系统,并应用 Keil5 软件进行了程序的编写(图8)。在此基础上,杨印朝等<sup>[75]</sup>分析了机构干涉对实现智能充填工艺的影响,得到了固体智能充填机械自主夯实过程机构干涉调控路径。而陈鑫政<sup>[76]</sup>则设计了充填智能控制系统,实现了充填工艺流程的自动启停等功能,并进行了工程应用。

然而,采空区智能充填的关键问题在于对井下充填过程进行智能决策与控制,以及利用智能算法建立

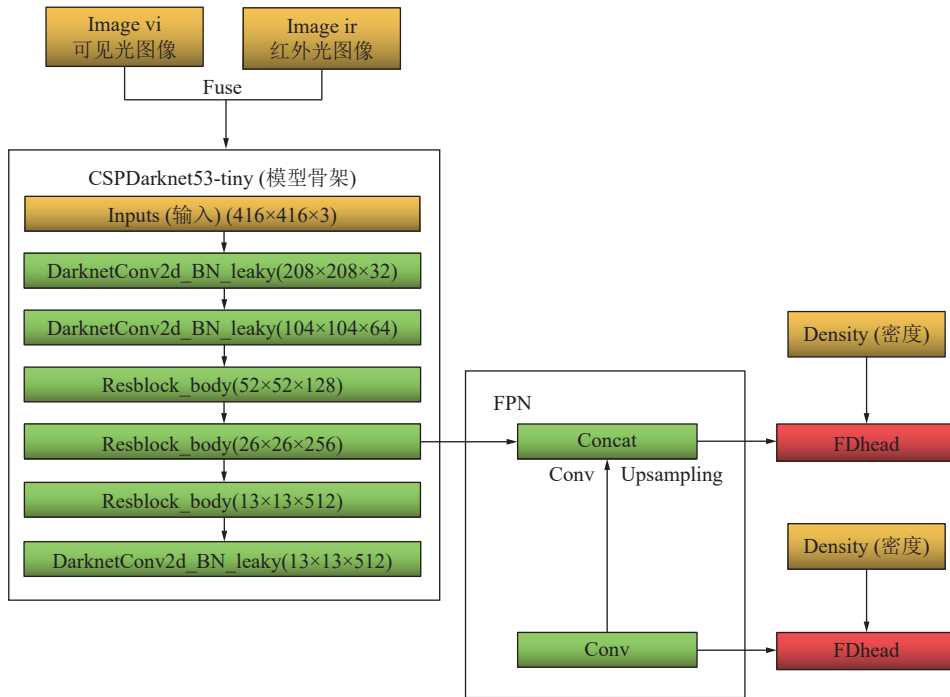


图 7 FD-YOLOv4-tiny 结构  
Fig.7 Structure of FD-YOLOv4-tiny



图 8 固体智能充填方法原理<sup>[73]</sup>  
Fig.8 Principle of solid intelligent filling method<sup>[73]</sup>

煤矿采空区充填方案和充填效果之间的联系,进行不同开采条件下充填效果预测,从而确定最优充填方案。为实现该目的,笔者建立了一种煤矿采空区智能充填深度神经网络算法,该算法可以通过输入煤层埋深、厚度、工作面长度、直接顶厚度等关键基本参数,进行相应条件下不同充填方案的采场应力及围岩变形计算分析,以便优选最佳方案实施充填,应用该算法

计算获得的采场应力与现场实测值进行对比,结果基本吻合,表明了该算法科学可行<sup>[71]</sup>(图 9)。

### 2.3 采选充智能一体化技术

在采选充智能一体化技术方面,部分学者搭建了采选充一体化智慧平台,以实现采选充之间的高效智能协同。

随着“采选充+X”一体化矿井的选择性开采技

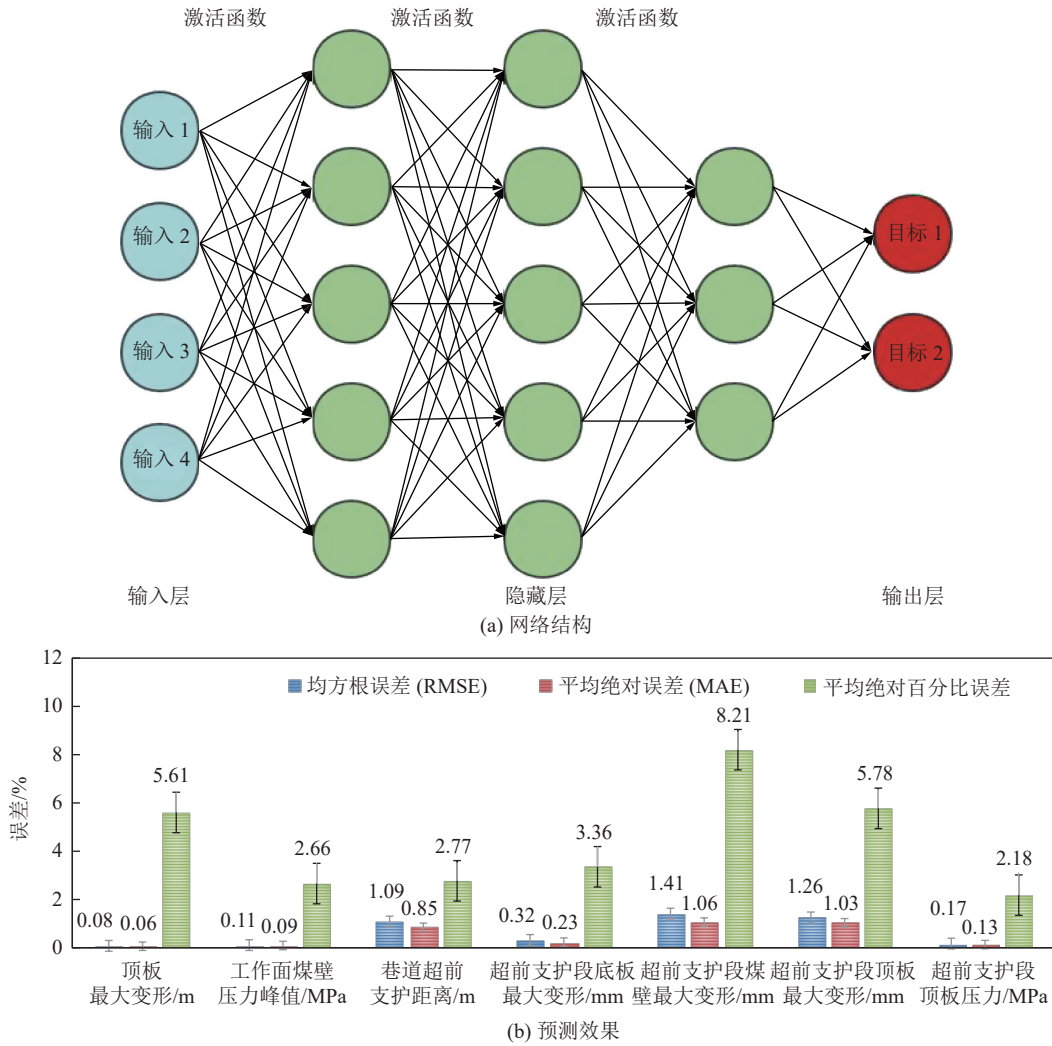


图 9 采空区智能充填深度神经网络  
Fig.9 Depth neural network of goaf intelligent filling

术理论构想的提出,屠世浩等<sup>[28]</sup>在满足不同充填控制要求的选择性开采技术基础上,提出了“采选充+X”一体化矿井选择性开采技术平台的构建思路和基本内容,如图 10 所示。与此同时,在采充协调方面,纪欣卓<sup>[78]</sup>研发了工作面配采智能决策支持系统,实现了采选充一体化矿井回采工作面和充填工作面智能配采,并在此基础上计算出充填工作面合适的推进速度。杨振乾<sup>[79]</sup>研究了井下煤矸运输路径及井下分选系统相关参数、保护层工作面参数,优化了保护层、被保护层和配采工作面的接替方案,设计了采充抽协调开采软件,并在工程上得到验证。

如今,采选充智能一体化各子系统的开发暂处萌芽阶段,亟需将大数据、人工智能、数字孪生技术融入煤矿采选充一体化系统中,逐步实现采煤、分选、充填过程的数字化、可视化、智能化,构建全面感知、实时互联、分析决策、自主学习、动态预测、协同控制的采选充智能一体化系统,推动煤矸石井下分选充填

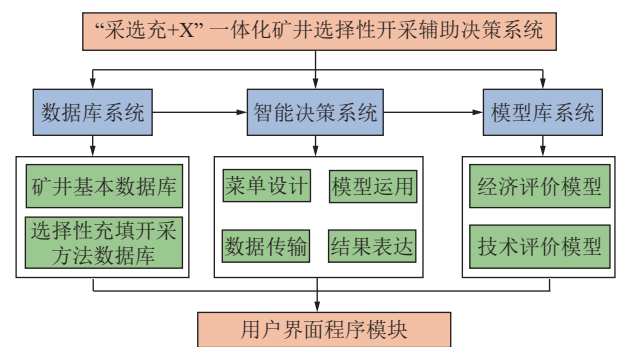


图 10 “采选充+X”一体化矿井辅助决策系统基本框架<sup>[28]</sup>  
Fig.10 Basic block diagram of integrated mine auxiliary decision-making system of “mining, dressing and charging +X”<sup>[28]</sup>

智能化的快速发展,实现煤炭的绿色低碳智能开采。

### 3 煤矸石井下分选充填技术发展方向

#### 3.1 煤矸石井下原位绿色智能分选技术

根据 2019 年国家煤矿安全监察局公布的《煤矿



机器人重点研发目录》中第二十一条“选矸机器人”的具体研发应用要求,煤矸分选装备应具备目标破碎、自动识别、精确定位、快速选拣、分类投放等功能,实现煤矸高效分离<sup>[80]</sup>。

鉴于此,笔者提出煤矸井下智能分选机的结构应如图11所示。煤矸智能分选机的识别方式可采用上述所提出的图像识别+密度区分;识别算法可采用能进行多源数据融合的深度神经网络;执行机构可采用自动推矸装置代替机械手。该分选机由排队机构、传感系统、决策系统、执行机构、分运机构等部分组成,如图11a所示。

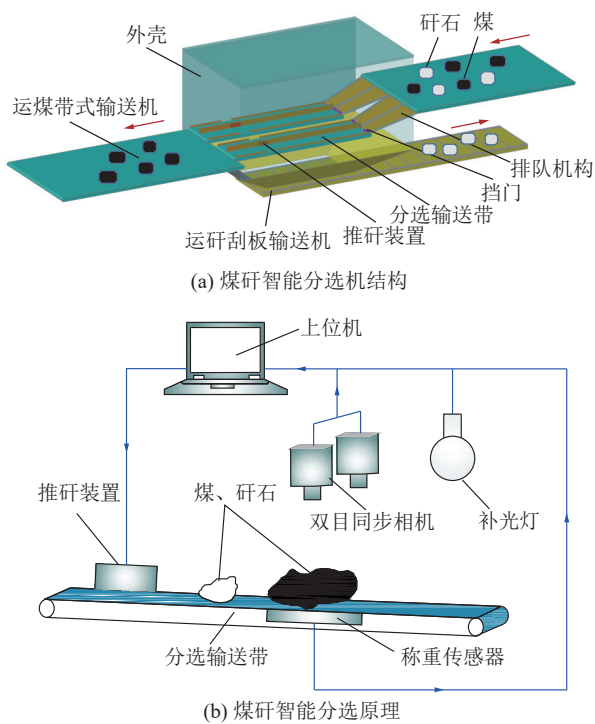


图11 煤矸智能分选机

Fig.11 Coal gangue intelligent sorting equipment

对于煤矸分选位置的选择,为简化煤矸分选系统,最大化缩短矸石无效运输距离,节能降耗,优先将分选系统布置于工作面运输巷中,但为满足不同矿井需求,也可布置于采区煤仓上方或采用多级分选布置。当分选系统布置于工作面运输巷中时,可实现煤矸石井下原位分选与充填,通过研发,可将破碎机、转载机、煤矸智能分选机集成为破碎、转载、分选一体机,随采随移,在煤炭生产的源头减小碳排放与单位产出的能源资源消耗,如图12所示。

具体分选工艺可参照图11b及图12所示,原煤采出后,由工作面刮板输送机运至运输巷破碎、转载、分选一体机原位实施煤矸分选。分选时,原煤首先由振动筛进行筛分,筛分后的粉煤落入振动筛下方

运煤带式输送机运走,块煤块矸则进入分选机,由分选机排队机构将煤矸块体排列为多个单列行进的长条。经分选输送带运输,各长条上的块煤块矸依次通过双目同步相机与称重传感器,其中煤与矸石的图像利用双目同步相机进行拍摄采集,煤与矸石的质量利用称重传感器进行采集,采集到的信息通过电路传输到上位机。之后上位机对所采集信息进行处理,包括煤矸识别以及煤矸位置确定,其中上位机是一个集组态王、深度神经网络、ACCESS数据库等为一体的工业计算机。最后上位机将识别信息以及矸石位置信息传输到PLC可编程逻辑控制器,通过PLC控制推矸装置将矸石拨落,由推矸装置推落的矸石落入分选机下方V形空间,V形空间底部设置小型刮板输送机,通过小型刮板输送机将矸石反方向运至采空区充填,而分选后的块煤进入运煤输送带与粉煤一同运出工作面,从而达到煤矸分选分运的目的。该煤矸分选方式有效地规避了湿法选矸工艺复杂,设备体积大、人工分拣效率低,劳动强度大、射线识别具有辐射风险且管控严格以及单一图像识别精度低等问题,具有良好的应用前景。

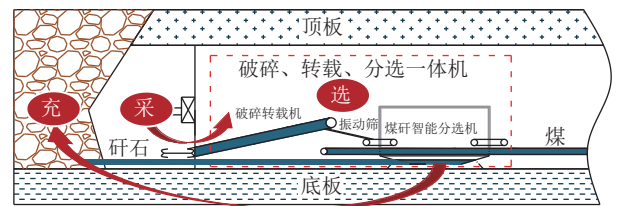


图12 工作面分选系统布置

Fig.12 Working face sorting system layout diagram

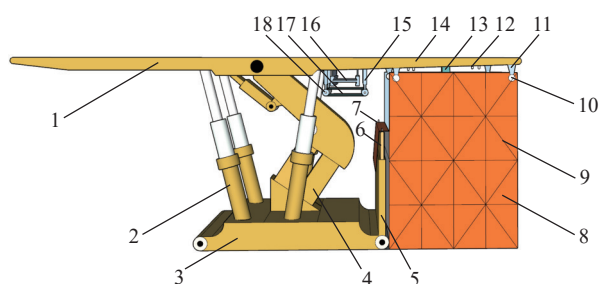
### 3.2 煤矸石井下原位绿色智能充填技术

冲击矿压是煤矿开采空间周围煤岩体突然破坏,并释放大量能量的一种强烈动力显现,是煤矿破坏性最为严重的动力灾害之一,易造成重大人员伤亡<sup>[81]</sup>。文献[28,82]表明,采空区充填可以有效降低工作面应力集中程度和应变能密度,防止坚硬岩层断裂并将应力峰值转到煤壁深处预防冲击地压。而若通过采空区关键位置充填将工作面应力集中区域的应力调控至一定阈值,不仅可以防止应力集中导致的煤岩动力灾害,还可实现沿空留巷、降低超前支护工作量,减少掘进、支护成本的同时也缓解了采掘接替紧张的局面,使充填有利于采煤。

鉴于此,笔者提出一种以减小工作面应力集中、预防煤岩动力灾害为目标的精准科学充填方法。该充填方法首先根据工作面超前支承压力的实时分布情况,预警工作面前方应力峰值区域,其次利用智能

决策系统自主决策出采空区关键充填位置,最后将井下矸石精准充填于该处,使矿压控制在安全范围内并最大程度减小覆岩沉降,实现沿空留巷、降低超前支护工作量,防止产生煤岩动力灾害,其可根据工作面应力实时分布情况,随应力峰值迁移<sup>[83-85]</sup>自适应调整充填方案,实现矸石处理与矿压及岩层控制的有机结合。

由于精准科学充填需随应力峰值迁移同步调整充填位置,因此要求充填体在短时间内实现自立,且能达到一定强度支撑顶板。综合考虑,精准科学充填采用散体矸石胶结的方法进行充填,并设计了新型充填液压支架,如图13所示。



1—液压支架顶梁; 2—液压支架立柱; 3—液压支架底座; 4—液压支架四连杆机构; 5—伸缩挡板固定端; 6—伸缩挡板活动端; 7—伸缩柱; 8—柔性充填袋; 9—侧限铁网; 10—挂孔; 11—夹具; 12—胶结剂喷淋装置; 13—双目同步相机; 14—支架尾梁; 15—伸缩液压柱; 16—底卸式刮板输送机; 17—多角度高速抛矸输送带; 18—托辊

图13 新型充填液压支架

Fig.13 New filling hydraulic support

该支架具有胶结剂喷淋装置、底卸式刮板输送机、多角度高速抛矸输送带和伸缩挡板等装置,支架后方空间用于挂设柔性充填袋以形成充填空间。其中,底卸式刮板输送机负责将矸石运输至对应充填位置并将其卸至多角度高速抛矸输送带上;多角度高速抛矸输送带负责将矸石抛至柔性充填袋中,通过调整抛矸输送带的带速、角度使矸石均匀铺满充填空间,随后封闭充填口;胶结剂喷射装置负责将胶结剂注入充填空间,使散体矸石固结成具有一定强度的整体结构;伸缩挡板在充填中起模具与封隔的作用。值得注意的是,当充填开始到充填体达到自立为止的整个充填工艺所用时间小于充填液压支架的移架周期时,即可实现前方采煤与后方充填互不影响,亦即采充协调,高效充填。

此外,在装备智能化方面,底卸式刮板输送机可搭载运量调节和运速调节系统,可将矸石定量准时运至对应充填位置并将其卸至多角度高速抛矸输送带上。抛矸输送带可搭载自适应带速、角度调节系

统,可将矸石均匀铺满充填空间。胶结剂喷淋装置可搭载自适应喷淋系统,可将胶结剂定量均匀注入充填空间,使散体矸石固结成具有一定强度的整体结构。双目同步相机负责实时监测充填情况。通过多个智能系统的协同运行,精确把控充填工序,保证充填质量,实现煤矸石的原位绿色智能充填。

为适应充填,柔性充填袋左、右、后方可设计为整体结构,前方设计为半整体半活动结构,整体结构高度与伸缩挡板固定端一致,活动结构高度与支架伸缩挡板活动端一致。活动结构侧边设置拉链,拉链端部设置挂环,挂环挂在伸缩挡板活动端的伸缩柱上(图14)。随充填高度的提升,伸缩挡板活动端逐渐升高,此时挂在伸缩柱上的挂环也逐渐升高,从而将柔性充填袋的活动结构变为整体结构,起到密封和塑性的作用。柔性充填袋的两个侧边设置有挂孔以便挂在支架夹具上,夹具可遥控移动至伸缩挡板处便于挂袋,也可自动松开充填袋挂孔以便移架。

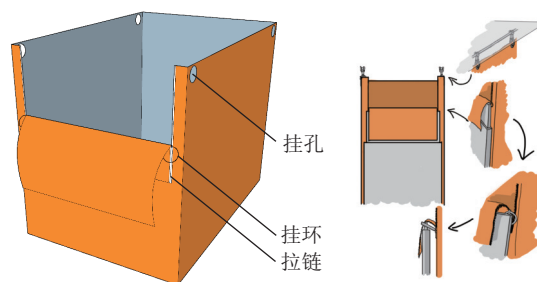


图14 柔性充填袋

Fig.14 Flexible filling bag

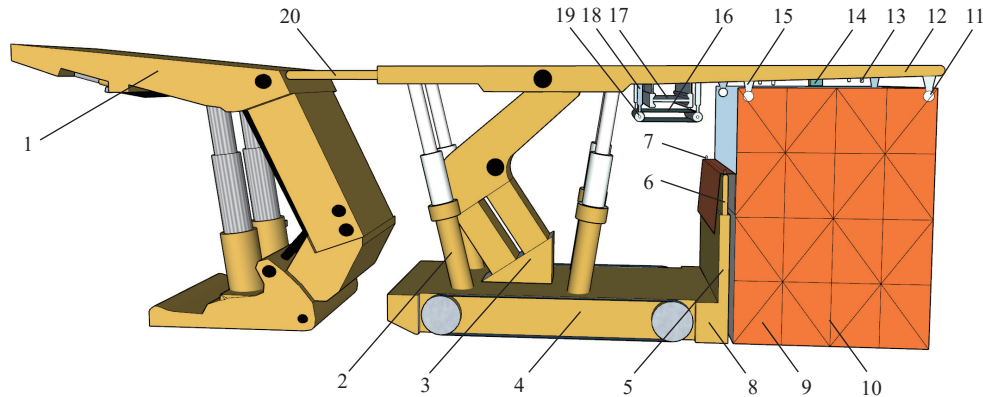
根据采煤工作面前后支撑压力分布特征可知,工作面处于前后支撑压力分布的应力降低区内<sup>[86]</sup>。针对部分矿井由于资金不足等原因无法全部变更工作面液压支架的情况,亦可设计一种特种液压支架布置于传统支架后方,以形成充填作业空间,如图15所示。

### 3.3 采、掘选充智能一体化系统

#### 3.3.1 采选充智能一体化系统

煤矿井下采选充智能一体化系统是集采煤、分选、充填、矿压控制于一体的系统,系统内各环节相辅相成、集成一体,实现采煤利于分选、分选利于充填、充填利于矿压控制,矿压控制利于采煤的良性循环。其应包含少矸化智能开采系统、原位智能分选系统、工作面四维矿压反演系统、精准科学充填系统四大子系统。

1)少矸化智能开采系统负责从煤炭开采的源头减少原煤含矸量,并使截割后的煤与厚层夹矸具有明显的块度区分,缓解分选压力。其可利用煤岩识



1—液压支架顶梁；2—特种支架立柱；3—特种支架四连杆机构；4—升降履带；5—伸缩挡板固定端；6—伸缩挡板活动端；7—伸缩柱；8—特种支架底座；9—柔性充填袋；10—侧限铁网；11—挂孔；12—支架尾梁；13—胶结剂喷射装置；14—双目同步相机；15—夹具；16—多角度高速抛矸输送带；17—底卸式刮板输送机；18—伸缩液压柱；19—托辊；20—伸缩梁

图 15 履带自移式特种液压支架

Fig.15 Crawler self-moving special hydraulic support

别技术与自主记忆截割技术实现采煤机截割过程的少矸化；利用充填后工作面的应力分布情况，实时调整采煤机运行速度及支架位态，减少顶底板岩层的破坏混入，实现工作面开采过程的少矸化。同时，根据受工作面超前支承压力影响后的煤体破裂情况与工作面矿压分布情况，精准控制采煤机截割参数进行自适应截割，使截割后的煤与厚层夹矸具有明显的块度区分，便于后续煤矸分选的实施，缓解分选压力。

2)原位智能分选系统负责将原煤伴生矸石原位高效分选出来，保证原煤的低含矸率，并为采空区充填提供矸石材料。其利用位于工作面运输巷的破碎、转载、分选一体机实现煤矸的智能高效分选，分选后的精煤由运煤带式输送机运出工作面，矸石则反向运输至采空区原位充填。

3)工作面四维(时间与三维空间)矿压反演系统负责实时监测液压支架工作载荷，并反演工作面矿压分布情况供少矸化智能开采系统、精准科学充填系统参考。其可利用布置于工作面液压支架上的压力传感器实时监测液压支架工作阻力，利用深度神经网络建立支架工作阻力与超前支承压力间的复杂非线性关系，形成四维矿压智能反演系统。通过液压支架工作阻力与超前支承压力间的关系，计算出工作面超前支承压力的分布情况，确定应力峰值大小，预警应力集中区域位置并同步显示在可视化数字孪生系统中，为采煤工艺的调整、充填方案的选择提供依据。

4)精准科学充填系统负责智能决策采空区关键充填位置，利用关键位置充填控制工作面矿压，保证安全开采。其根据工作面矿压反演系统得出的工作

面矿压分布情况、应力峰值大小和应力集中区域位置，利用智能决策系统智能决策出采空区关键充填位置，使在该位置充填后可将矿压控制在安全范围内并最大程度减小覆岩沉降，实现沿空留巷、降低超前支护工作量，防止产生煤岩动力灾害。

各子系统的逻辑关系为：工作面原煤由少矸化智能开采系统采出，后经原位智能分选系统实现煤矸分离，根据工作面四维矿压反演系统所提供的工作面矿压实时分布情况，预警工作面前方应力峰值区域，利用精准科学充填系统智能决策出采空区关键位置进行充填，以实现工作面的科学、绿色、智能开采，如图 16 所示。

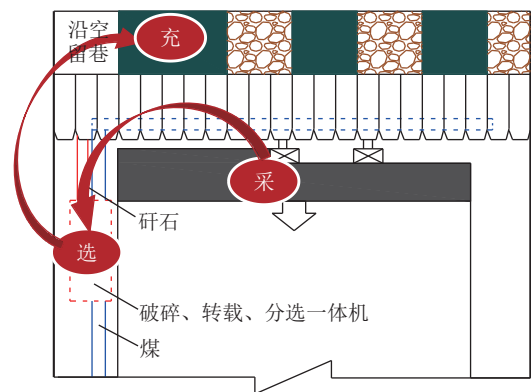


图 16 采选充智能一体化系统

Fig.16 Intelligent integrated system of mining, sorting and filling

综上，采出原煤含矸率低，则分选压力小，分选效率高；分选效率高，则煤炭品质好，充填材料足；充填材料足，则充填体力学性能好，矿压控制效果好；矿压控制效果好，则减灾效果好，采煤更安全。由此，便达到了采煤利于分选、分选利于充填、充填利于矿

压控制、矿压控制利于采煤的良性循环,即为采选充一体化。

### 3.3.2 掘选充智能一体化系统

岩巷、半煤岩巷掘进是井下矸石的重要来源之一。针对掘进工作面矸石处理问题,应形成集掘进、分选、分运、充填于一体的掘选充智能一体化系统。

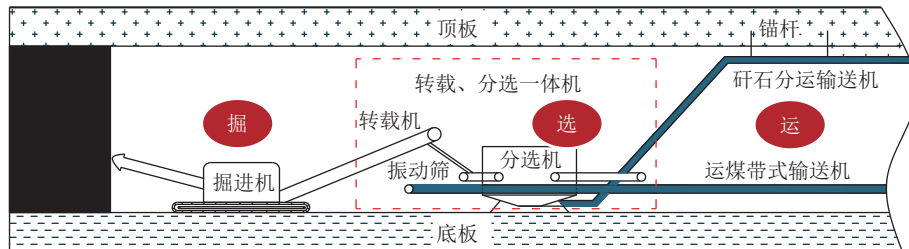


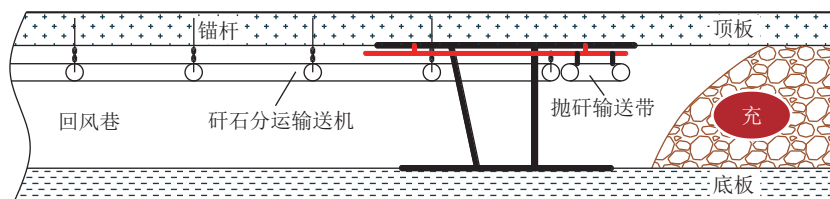
图 17 掘选充智能一体化系统

Fig.17 Intelligent integration system of driving, sorting and filling

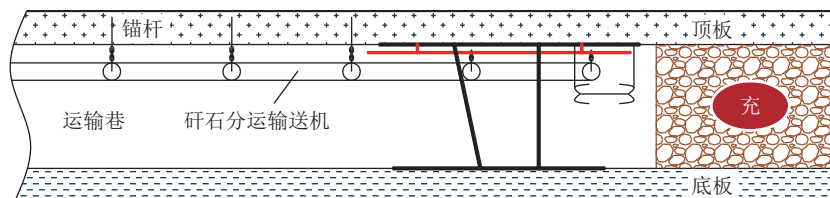
1)智能快掘系统负责保证巷道掘进速度与精度,其可利用掘进机位姿检测与导航技术指导掘进机快速截割;利用自动打锚杆、自动铺网技术实现快速支护;利用煤岩识别技术识别煤岩界面,进行自适应截割。

2)智能分选系统负责将原煤伴生矸石原位高效选出,保证掘进出煤的低含矸率,并为采空区充填提供矸石材料。其利用位于掘进机后方的转载、分选一体机实现煤矸的智能高效分选,分选后的精煤和矸石进入煤矸分运系统。

3)煤矸分运系统负责将排矸后的精煤由架设在底板上的运煤带式输送机运出工作面,将分离出的矸石由悬挂在顶板上的矸石分运输送机运至工作面直接处理或运至矸石仓储存。其可根据不同的矸石处理方式智能决策最优运输路径。当矿井采用矸石废弃空间抛弃等方式时,掘进工作面矸石分选后直接运往采煤工作面回风巷处理(图 18a)。当矿井采用矸石充填利用等方式时,掘进矸石可先运至矸石仓备用,待需要时再由矸石分运输送机运至采煤工作面运输巷(图 18b)。



(a) 回风巷运输系统示意(矸石抛弃)



(b) 运输巷运输系统示意(矸石充填利用)

图 18 工作面运输系统示意

Fig.18 Working face transportation system diagram

此外,该系统还可搭载矸石运输智能调控子系统和输送机智能调速子系统,可根据充填需要智能调控各输送线矸石运量,并进行运输路线的智能规划、自动运输,同时搭载基于视频 AI 技术的节能调

速优化系统、智能强化综合保护系统及智能调速管理平台,当掘进工作面出矸量不稳定时,可根据出矸量智能调节输送带运输速度,以实现运输过程的节能降耗。

4)智能充填系统则负责处理掘进工作面矸石,通过搭载的智能决策系统精确计算各充填方式所需矸石量,并调取矸石仓矸石配合采煤工作面矸石,保证充填材料的足量供应。

## 4 结语与展望

1)目前,关于煤矸石井下分选充填技术的研究主要集中在工艺装备的优化改善以及充填理论的推陈出新上,采选充智能一体化系统的开发暂处萌芽阶段,亟待建设符合煤矿开采特色的矿山大数据云平台,研发满足特定作业要求的智能算法,开发矿山多源异构数据的深度融合处理、智能系统装备云端运维、信息实时感知的远程专业化分析处理等增值服务,形成智能化矿山高质量运行新模式。

2)针对目前井下煤矸分选方法的不足,提出了煤矸石井下原位绿色智能分选技术,该技术识别方式采用图像识别+密度区分,设计了煤矸井下智能分选机,并给出了工作面分选系统布置图,该煤矸分选方式有效地规避了湿法选矸工艺复杂,设备体积大、人工分拣效率低,劳动强度大、射线识别具有辐射风险且管控严格以及单一图像识别精度低等问题,具有良好的应用前景。

3)针对目前煤矸石井下充填采充不协调、智能化程度较低的情况,提出了煤矸石井下原位绿色智能充填新方法,该方法可通过采空区关键位置充填将工作面矿压及覆岩沉降控制在一定范围内,不仅可以防止应力集中导致的煤岩动力灾害,还可实现沿空留巷、降低超前支护工作量,且可根据工作面应力实时分布情况,随应力峰值迁移自适应调整充填方案,实现矸石处理与矿压及岩层控制的有机结合。

4)为处理采掘矸石,预防煤岩动力灾害,提出了煤矿井下采选充智能一体化系统和掘选充智能一体化系统,并探讨各子系统间的逻辑关系,使各系统、各环节相辅相成、集成一体,形成采煤利于分选、分选利于充填、充填利于采煤的良性循环,实现煤炭的科学、绿色、智能开采。

未来,还需逐步搭建采选充智能一体化大数据平台,将大数据、人工智能、数字孪生技术融入煤矿采选充一体化系统中,逐步实现采煤、分选、充填过程的数字化、可视化、无人化,构建全面感知、实时互联、分析决策、自主学习、动态预测、协同控制的采选充智能一体化系统,推动煤矸石井下分选充填智能化的快速发展。

## 参考文献(References):

- [1] 徐慧,刘希,刘嗣明. 推动绿色发展,促进人与自然和谐共生: 习近平生态文明思想的形成发展及在二十大的创新[J]. 宁夏社会科学, 2022(6): 5-19.  
XU Hui, LIU Xi, LIU Siming. Promoting green development and promoting harmonious coexistence between man and nature: the formation and development of Xi Jinping's ecological civilization thought and its innovation in the 20th National Congress[J]. Social Sciences in Ningxia, 2022(6): 5-19.
- [2] NEWELL R, RAIMI D, ALDANA G. Global energy outlook 2019: the next generation of energy[J]. Resources for the Future, 2019, 1: 8-19.
- [3] 邹才能,何东博,贾成业,等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 233-247.  
ZOU Caineng, HE Dongbo, JIA Chengye, et al. Connotation and pathway of world energy transition and its significance for carbon neutral[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 233-247.
- [4] 李辉,庞博,朱法华,等. 碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5294-5304.  
LI Hui, PANG Bo, ZHU Fahua, et al. Comparison of energy consumption structure and mode between China and major energy consuming countries in the world under the background of carbon emission reduction[J]. Environmental Science, 2022, 43(11): 5294-5304.
- [5] 张剑,刘景洋,董莉,等. 中国能源消费CO<sub>2</sub>排放的影响因素及情景分析[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 71-78.  
ZHANG Jian, LIU Jingyang, DONG Li, et al. Influencing factors and scenario analysis of CO<sub>2</sub> emission from energy consumption in China[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1): 71-78.
- [6] 张明,胡耘,朱法华,等. 中国与世界主要经济体能源消费特征比较研究[J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(1): 47-54.  
ZHANG Ming, HU Yun, ZHU Fahua, et al. A comparative study on the characteristics of energy consumption between china and the world's major economies[J]. Natural Resource Economics of China, 2021, 34(1): 47-54.
- [7] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.  
HU Angang. China's peak carbon dioxide emissions goal before 2030 and its main ways[J]. Journal of Beijing University of Technology(Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1-15.
- [8] 谢和平,任世华,谢亚辰,等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2197-2211.  
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7): 2197-2211.
- [9] 张吉雄. 矸石直接充填综采岩层移动控制及其应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.  
ZHANG Jixiong. Study on strata movement controlling by raw waste backfilling with fully-mechanized coal winning technology

- and its engineering applications[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [10] 李 猛. 矽石充填材料力学行为及控制岩层移动机理研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.  
LI Meng. Mechanical behaviour of gangue backfill material and control mechanism of strata movement[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [11] FAN Gangwei, ZHANG Dongsheng, WANG Xufeng. Reduction and utilization of coal mine waste rock in China: a case study in Tiefa coalfield[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2014, 83: 24–33.
- [12] 张吉雄, 缪协兴, 郭广礼. 矽石(固体废物)直接充填采煤技术发展现状[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 395–401.  
ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing, GUO Guangli. Development status of backfilling technology using raw waste in coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 395–401.
- [13] XUE Qiang, LU Haijun, ZHAO Ying, *et al.* The metal ions release and microstructure of coal gangue corroded by acid-based chemical solution[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(7): 3235–3244.
- [14] ZHANG Yingyi, NAKANO Jinichiro, LIU Lili, *et al.* Trace element partitioning behavior of coal gangue-fired CFB plant: experimental and equilibrium calculation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(20): 15469–15478.
- [15] 潘一山, 宋义敏, 刘 军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2081–2095.  
PAN Yishan, SONG Yimin, LIU Jun. The pattern, change and new situation of mine rockburst prevention and control in China[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(9): 2081–2095.
- [16] 张吉雄, 巨 峰, 李 猛, 等. 煤矿矽石井下分选协同原位充填开采方法[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 131–140.  
ZHANG Jixiong, JU Feng, LI Meng, *et al.* Method of coal gangue separation and coordinated in-situ backfill mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 131–140.
- [17] 徐龙江. 煤矽颗粒在鼠笼式选择性分离装备中的动力学行为模拟[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 678–682.  
XU Longjiang. Dynamic behavior simulation of coal gangue particles in squirrel-cage selective separation equipment[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(4): 678–682.
- [18] 赵浩棣. 基于机器视觉的矿井煤矽分选技术研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.  
ZHAO Haodi. Research on sorting technology of coal and gangue in mine based on machine vision[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [19] HOBSON D M, CARTER R M, YAN Y, *et al.* Differentiation between coal and stone through image analysis of texture features[C]//2007 IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques. IEEE, 2007: 1–4.
- [20] MA X M, LIANG C. Application of rough set theory in coal gangue image process[C]//2009 Fifth International Conference on Information Assurance and Security. IEEE, 2009, 1: 87–90.
- [21] HU F, ZHOU M, YAN P, *et al.* Multispectral imaging: a new solution for identification of coal and gangue[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 169697–169704.
- [22] ROBBEN C, DE Korte J, WOTRUBA H, *et al.* Experiences in dry coarse coal separation using X-ray-transmission-based sorting[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2014, 34(3/4): 210–219.
- [23] ZHANG C. Coal gangue separation system based on density measurement[C]//2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE). IEEE, 2012, 1: 216–218.
- [24] 缪协兴, 张吉雄. 井下煤矽分离与综合机械化固体充填采煤技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1424–1433.  
MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong. Key technologies of integration of coal mining gangue washing-backfilling and coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1424–1433.
- [25] 张吉雄, 屠世浩, 曹亦俊, 等. 深部煤矿井下智能化分选及就地充填技术研究进展[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 1–10, 22.  
ZHANG Jixiong, TU Shihao, CAO Yijun, *et al.* Research progress of technologies for intelligent separation and in-situ backfill in deep coal mines in China[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(1): 1–10, 22.
- [26] 孙传尧, 宋振国. 地下采选一体化系统的研究及应用概况[J]. 矿冶, 2017, 26(1): 1–6.  
SUN Chuanyao, SONG Zhenguo. Development and application outline of integrated underground mining-processing system[J]. *Mining and Metallurgy*, 2017, 26(1): 1–6.
- [27] 张吉雄, 张 强, 巨 峰, 等. 煤矿“采选充+X”绿色化开采技术体系与工程实践[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 64–73.  
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, JU Feng, *et al.* Practice and technique of green mining with integration of mining, dressing, backfilling and X in coal resources[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(1): 64–73.
- [28] 屠世浩, 郝定溢, 李文龙, 等. “采选充+X”一体化矿井选择性开采理论与技术体系构建[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(1): 81–92.  
TU Shihao, HAO Dingyi, LI Wenlong, *et al.* Construction of the theory and technology system of selective mining in “mining, dressing, backfilling and X” integrated mine[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(1): 81–92.
- [29] 李永明, 刘长友, 邹喜正, 等. 急倾斜薄煤层胶结充填开采合理参数确定及应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 7–12.  
LI Yongming, LIU Changyou, ZOU Xizheng, *et al.* Determination and application of rational parameters of cemented filling mining in steep thin seam[J]. *Acta Sinica Coalmine*, 2011, 36(S1): 7–12.
- [30] 李春生, 安勇焯, 于健浩. 瑞丰煤业超高水材料充填技术研究与应用[J]. 煤炭工程, 2012(9): 40–41.  
LI Chunsheng, AN Yongye, YU Jianhao. Research and application of ultra-high water filling technology in Ruifeng Coal Industry[J]. *Coal Engineering*, 2012(9): 40–41.

- [31] 魏秀泉, 孙恒虎, 王莹莹. 似膏体充填用胶凝材料微观结构及物理力学特性研究[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(S1): 37-40.  
WEI Xiuquan, SUN Henghu, WANG Yingying. Study on micro-structure and physical and mechanical properties of cementitious materials for paste-like filling[J]. Silicate Bulletin, 2009, 28(S1): 37-40.
- [32] 陈磊, 赵明, 赵健. 煤矿高浓度胶结充填料浆流变特性试验研究[J]. 中国煤炭, 2016, 42(10): 34-37, 46.  
CHEN Lei, ZHAO Ming, ZHAO Jian. Experimental study on rheological properties of high-concentration cemented filling slurry in coal mines[J]. China Coal, 2016, 42(10): 34-37, 46.
- [33] 殷伟, 缪协兴, 张吉雄, 等. 矸石充填与垮落法混合综采技术研究与实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(5): 845-852.  
YIN Wei, MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong. Research on mixed mining technology with backfilling and caving methods[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(5): 845-852.
- [34] 谢文兵, 史振凡, 陈晓祥, 等. 部分充填开采围岩活动规律分析[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 38-41.  
XIE Wenbing, SHI Zhenfan, CHEN Xiaoxiang. Analysis of surrounding rock activities in partial backfill mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(2): 38-41.
- [35] 许家林, 轩大洋, 朱卫兵, 等. 部分充填采煤技术的研究与实践[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1303-1312.  
XU Jialin, XUAN Dayang, ZHU Weibing, et al. Study and application of coal mining with partial backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1303-1312.
- [36] WANG C, SHEN B, CHEN J, et al. Compression characteristics of filling gangue and simulation of mining with gangue backfilling: an experimental investigation[J]. Geomechanics and Engineering, 2020, 20(6): 485.
- [37] 黄艳利, 张吉雄, 张强, 等. 综合机械化固体充填采煤原位沿空留巷技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1624-1628.  
HUANG Yanli, ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, et al. Technology of gob-side entry retaining on its original position in fully-mechanized coalface with solid material backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1624-1628.
- [38] WANG S, MA L. Characteristics and control of mining induced fractures above longwall mines using backfilling[J]. Energies, 2019, 12(23): 4604.
- [39] 缪协兴, 张吉雄, 郭广礼. 综合机械化固体充填采煤方法与技术研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 1-6.  
MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong, GUO Guangli. Study on waste-filling method and technology in fully-mechanized coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 1-6.
- [40] 张吉雄, 周跃进, 黄艳利. 综合机械化固体充填采煤一体化技术[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(11): 10-13, 27.  
ZHANG Jixiong, ZHOU Yuejin, HUANG Yanli. Integrated technology of fully mechanized solid backfill mining[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(11): 10-13, 27.
- [41] ZHANG J, ZHANG Q, SPEARING A J S S, et al. Green coal mining technique integrating mining dressing gas draining backfilling mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(1): 17-27.
- [42] 张吉雄, 张强, 巨峰, 等. 深部煤炭资源采选充绿色化开采理论与技术[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 377-389.  
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, JU Feng, et al. Theory and technique of greening mining integrating mining, separating and backfilling in deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 377-389.
- [43] 张吉雄, 缪协兴, 张强, 等. “采选抽充采”集成型煤与瓦斯绿色共采技术研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1683-1693.  
ZHANG Jixiong, MIAO Xiexing, Zhang Qiang, et al. Integrated coal and gas simultaneous mining technology: mining-dressing-gas draining-backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1683-1693.
- [44] 刘峰, 王娜. 煤炭采选一体化绿色生产关键技术[J]. 有色金属(选矿部分), 2013(S1): 35-40.  
LIU Feng, WANG Na. Key technologies of integrated green production of coal mining and dressing[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2013(S1): 35-40.
- [45] 杨所武. 煤矿井下采选充采一体化工艺与技术研究[J]. 山东煤炭科技, 2016(2): 21-22, 24.  
YANG Suowu. Mine ventilation system reliability and the research of early warning mechanism[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2016(2): 21-22, 24.
- [46] 郭二鹏. 煤矿井下采选充采一体化关键技术研究[J]. 山东工业技术, 2017(10): 67.  
GUO Erpeng. Research on key technologies of integration of underground mining, dressing, charging and mining in coal mine[J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2017(10): 67.
- [47] 王国法, 任世华, 庞义辉, 等. 我国智能绿色矿业发展战略研究[J]. 煤炭经济研究, 2021, 41(12): 4-10.  
WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, et al. Research on the development strategy of intelligent green mining industry in China[J]. Research on Coal Economy, 2021, 41(12): 4-10.
- [48] 郭文兵, 吴东涛, 白二虎, 等. 我国煤矿智能绿色开采技术现状与展望[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 1-17.  
GUO Wenbing, WU Dongtao, BAI Erhu, et al. Present situation and prospect of intelligent green mining technology in coal mines in China[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science Edition), 2023, 42(5): 1-17.
- [49] MINAR M R, NAHER J. Recent advances in deep learning: an overview[J]. Arxiv Preprint Arxiv: 1807.08169, 2018.
- [50] 梁兴国. TDS智能干选机在井下排矸充填技术的应用[J]. 选煤技术, 2020(2): 30-34.  
LIANG Xingguo. Application of TDS intelligent dry separator in underground gangue discharge and filling technology[J]. Coal Preparation Technology, 2020(2): 30-34.
- [51] 缙新学, 何晨. TDS智能干选机在黄陵一号煤矿选煤厂的应用[J]. 煤炭加工与综合利用, 2020(8): 26-29.  
GOU Xinxue, HE Chen. Application of TDS intelligent dry separator in Huangling No.1 coal preparation plant[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2020(8): 26-29.
- [52] 黄邦松. TDS智能干选机在双柳煤矿的应用[J]. 中国煤炭, 2020, 46(3): 47-50.

- HUANG Bangsong. Application of TDS intelligent dry separator in Shuangliu Coal Mine[J]. *China Coal*, 2020, 46(3): 47–50.
- [53] 林丽凤, 靳远志, 赵天波, 等. TDS 智能选矸系统在滨湖煤矿井下的应用[J]. *选煤技术*, 2020(6): 49–52.
- LIN Lifeng, JIN Yuanzhi, ZHAO Tianbo, *et al.* Application of TDS intelligent gangue separation system in Binhu coal mine[J]. *Coal Preparation Technology*, 2020(6): 49–52.
- [54] 吴金保, 王慧超. TDS 智能干选机在灵新选煤厂的应用[J]. *中国煤炭*, 2019, 45(12): 43–47.
- WU Jinbao, WANG Huichao. Application of TDS intelligent dry separator in Lingxin Coal Preparation Plant[J]. *China Coal*, 2019, 45(12): 43–47.
- [55] LIU C, LI M, ZHANG Y, *et al.* An enhanced rock mineral recognition method integrating a deep learning model and clustering algorithm[J]. *Minerals*, 2019, 9(9): 516.
- [56] MA Huiling, LI Man. Characteristic analysis and recognition of coal-rock interface based on visual technology[J]. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 2016, 9(4): 61–68.
- [57] HOU W. Identification of coal and gangue by feed-forward neural network based on data analysis[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2019, 39(1): 33–43.
- [58] MAXWELL K, RAJABI M, ESTERLE J. Automated classification of metamorphosed coal from geophysical log data using supervised machine learning techniques[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 214: 103284.
- [59] 曹现刚, 刘思颖, 王 鹏, 等. 面向煤矸分拣机器人的煤矸识别定位系统研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 237–246.
- CAO Xiangang, LIU Siying, WANG Peng, *et al.* Research on coal gangue identification and positioning system for coal gangue sorting robot[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 237–246.
- [60] 王 骋. 多光谱成像结合聚类分析在煤矸识别中的应用[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- WANG Cheng. Application of multispectral imaging combined with cluster analysis in coal gangue identification [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020.
- [61] TRIPATHY D P, GURU Raghavendra Reddy K. Novel methods for separation of gangue from limestone and coal using multispectral and joint color-texture features[J]. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*, 2017, 98: 109–117.
- [62] 来文豪, 周孟然, 王锦国, 等. 多光谱波段筛选的煤矸石快速定位[J]. *中国激光*, 2021, 48(16): 190–200.
- LAI Wenhao, ZHOU Mengran, WANG Jinguo, *et al.* Rapid localization of coal gangue by multi-spectral band screening[J]. *China Laser*, 2021, 48(16): 190–200.
- [63] BALTRUSAITIS T, AHJA C, MORENCY L P. Multimodal machine learning: a survey and taxonomy[J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2018, 41(2): 423–443.
- [64] 齐冲冲, 杨星雨, 李桂臣, 等. 新一代人工智能在矿山充填中的应用综述与展望[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(2): 688–700.
- QI Chongchong, YANG Xingyu, LI Guichen, *et al.* Overview and prospect of the application of new generation artificial intelligence in mine filling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(2): 688–700.
- [65] QI C, LY H B, CHEN Q, *et al.* Flocculation-dewatering prediction of fine mineral tailings using a hybrid machine learning approach[J]. *Chemosphere*, 2020, 244: 125450.
- [66] QI C, FOURIE A, CHEN Q, *et al.* A strength prediction model using artificial intelligence for recycling waste tailings as cemented paste backfill[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 183: 566–578.
- [67] QI C, TANG X, DONG X, *et al.* Towards Intelligent Mining for Backfill: A genetic programming-based method for strength forecasting of cemented paste backfill[J]. *Minerals Engineering*, 2019, 133: 69–79.
- [68] 吴爱祥, 李 红, 程海勇, 等. 全尾砂膏体流变学研究现状与展望(上): 概念、特性与模型[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(7): 803–813.
- WU Aixiang, LI Hong, CHENG Haiyong, *et al.* Research status and prospect of paste rheology of tailings (I): concept, characteristics and model[J]. *Journal of Engineering Science*, 2020, 42(7): 803–813.
- [69] 白春红. 基于 SVM 模型的充填体强度与采场稳定性需求智能匹配研究[J]. *中国矿业*, 2019, 28(11): 104–108.
- BAI Chunhong. Research on intelligent matching between backfill strength and stope stability requirements based on SVM model[J]. *China Mining*, 2019, 28(11): 104–108.
- [70] DU K, LIU M, ZHOU J, *et al.* Investigating the slurry fluidity and strength characteristics of cemented backfill and strength prediction models by developing hybrid GA-SVR and PSO-SVR[J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2022, 39(2): 433–452.
- [71] 魏晓明, 郭利杰, 周小龙, 等. 高阶阶段胶结充填体全时序应力演化规律及预测模型研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(11): 3613–3620.
- WEI Xiaoming, GUO Lijie, ZHOU Xiaolong, *et al.* Study on stress evolution law and prediction model of high-stage cemented backfill[J]. *Geotechnical Mechanics*, 2020, 41(11): 3613–3620.
- [72] QI C, GUO L, LY H B, *et al.* Improving pressure drops estimation of fresh cemented paste backfill slurry using a hybrid machine learning method[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 163: 106790.
- [73] 张 强, 王云搏, 张吉雄, 等. 煤矿固体智能充填开采方法研究[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2546–2556.
- ZHANG Qiang, WANG Yunbo, ZHANG Jixiong, *et al.* Study on solid intelligent filling mining method in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2546–2556.
- [74] 张 强, 崔鹏飞, 张吉雄, 等. 固体智能充填关键装备工况位态表征及自主识别调控方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(12): 4237–4249.
- ZHANG Qiang, CUI Pengfei, ZHANG Jixiong, *et al.* State characterization and self-identification control method of key equipment for solid intelligent filling[J]. *Acta Coal*, 2022, 47(12): 4237–4249.
- [75] 杨印朝, 王云搏, 张 强, 等. 固体智能充填机械自主夯实过程机构干涉判别与调控研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022,



- 39(5): 921-929.
- YANG Yinchao, WANG Yunbo, ZHANG Qiang, *et al.* Study on interference discrimination and regulation of solid intelligent filling machinery in the process of self-compacting[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2022, 39(5): 921-929.
- [ 76 ] 陈鑫政, 杨小聪, 郭利杰, 等. 矿山充填智能控制系统设计及工程应用[J]. *有色金属工程*, 2022, 12(2): 114-120.
- CHEN Xinzheng, YANG Xiacong, GUO Lijie, *et al.* Design and engineering application of mine filling intelligent control system[J]. *Nonferrous Metal Engineering*, 2022, 12(2): 114-120.
- [ 77 ] 周忠斌, 梁卫国, 郭凤岐, 等. 煤矿采空区智能充填深度神经网络算法研究[J]. *太原理工大学学报*, 2024, 55(2): 223-230.
- ZHOU Zhongbin, LIANG Weiguo, GUO Fengqi, *et al.* Research on neural network algorithm of intelligent filling depth in coal mine goaf [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2024, 55(2): 223-230.
- [ 78 ] 纪欣卓. 深部采选充一体化矿井工作面配采方案优化 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- JI Xinzhuo. Optimization of matching mining scheme in deep mining, selection and filling integrated mine face [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [ 79 ] 杨振乾. 平煤十二矿突出煤层采充协调开采技术研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- YANG Zhenqian. Study on coordinated mining technology of outburst coal seam in No. 12 Mine of Pingmei [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [ 80 ] 国家煤监局: 煤矿机器人已经纳入安全改造中央预算内投资计划支持范围 [J]. *中国煤炭工业*, 2019(9): 23.
- State Administration of Coal Supervision: Coal mine robots have been included in the support scope of the investment plan in the central budget for safety transformation [J]. *China Coal Industry*, 2019(9): 23.
- [ 81 ] 窦林名, 姜耀东, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载的“应力场-震动波场”监测预警技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(4): 803-811.
- DOU Linming, JIANG Yaodong, CAO Anye, *et al.* Monitoring and early warning technology of “stress field-vibration wave field” for dynamic and static load of rock burst in coal mine[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(4): 803-811.
- [ 82 ] 柏建彪, 周华强, 侯朝炯, 等. 沿空留巷巷旁支护技术的发展[J]. *中国矿业大学学报*, 2004, 33(2): 59-62.
- BAI Jianbiao, ZHOU Huaqiang, HOU Chaojiong, *et al.* Development of support technology beside roadway in goaf-side entry retaining for next sublevel[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 33(2): 59-62.
- [ 83 ] 王国法, 张金虎, 徐亚军, 等. 深井厚煤层长工作面支护应力特性及分区协同控制技术[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 763-773.
- WANG Guofa, ZHANG Jinhu, XU Yajun, *et al.* Stress characteristics of long working face in deep well and thick coal seam and cooperative control technology in different zones[J]. *Acta Coal*, 2021, 46(3): 763-773.
- [ 84 ] 刘长友. 安全高效综放开采理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013.
- LIU Changyou. Theory and technology of safe and efficient fully mechanized caving mining[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2013.
- [ 85 ] 康红普. 深部煤矿应力分布特征及巷道围岩控制技术[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(9): 12-17.
- KANG Hongpu. Stress distribution characteristics and strata control technology for roadways in deep coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(9): 12-17.
- [ 86 ] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- QIAN Minggao, SHI Pingwu, XU Jialin. Ground pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010.