



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤炭科学技术

半煤岩巷掘锚一体化高效掘进创新与实践

王虹 陈明军 马凯 荔军 张小峰

引用本文:

王虹, 陈明军, 马凯, 等. 半煤岩巷掘锚一体化高效掘进创新与实践[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 17-26.

WANG Hong, CHEN Mingjun, MA Kai. Innovation and practice of efficient integrated tunneling and bolting in semi-coal rock roadways[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 17-26.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0494>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

“三软”厚煤层回采巷道掘锚一体机工艺优化及应用

Process optimization and application of bolter miner for “three-soft” thick coal seam mining roadway

煤炭科学技术. 2024, 52(8): 1-10 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1530>

软弱围岩掘锚一体化快速掘进关键技术与工程实践

Key technology research and engineering practice of speedy drive with driving and bolting integration in soft surrounding rock

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 280-287 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0544>

矿井提升系统数字孪生快速建模方法研究

Digital twin rapid construction method of a mining hoisting system

煤炭科学技术. 2023, 51(9): 219-230 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1321>

基于数字孪生的智能化工作面三维监测技术研究

Study on digital twin-based smart fully-mechanized coal mining workface monitoring technology

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 153-161 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b530b9b9-7037-4cdb-8cde-3eebc6693924>

智慧矿山数字孪生技术研究综述

Research summary on digital twin technology for smart mines

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3a06c655-8805-44cc-a5a9-53f238a7fd37>

数字孪生驱动的掘进机器人决策控制系统研究

Research on decision control system of tunneling robot driven by digital twin

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 36-49 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/38e466bd-860a-41ee-9da3-9b0a3379e5d7>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王 虹,陈明军,马 凯,等.半煤岩巷掘锚一体化高效掘进创新与实践[J].煤炭科学技术,2025,53(8):17-26.
WANG Hong, CHEN Mingjun, MA Kai, *et al.* Innovation and practice of efficient integrated tunneling and bolting in semi-coal rock roadways[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 17-26.



王虹,男,江苏江阴人,研究员,博士生导师,中国煤炭科工集团有限公司首席科学家,担任孙越崎科技教育基金会秘书长,《煤炭学报》《煤炭科学技术》编委等职务。享受国务院特殊津贴(1999年),获“孙越崎能源大奖”“杰出工程师奖”。研究方向为煤矿巷道掘进技术与装备,致力于煤矿巷道掘进理论、技术及装备研发,主要成果获国家科技进步二等奖3项,省部级特等奖、一等奖6项。

半煤岩巷掘锚一体化高效掘进创新与实践

王 虹^{1,2},陈明军¹,马 凯¹,荔 军³,张小峰¹

(1. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司,山西 太原 030006; 2. 煤炭科学研究总院,北京 100013; 3. 山西天地赛福蒂科技有限公司,山西 太原 030006)

摘 要:半煤岩巷道的高效快速掘进是陕蒙矿区千万吨矿井亟需攻克的重大工程难题,需要对截割效率低、掘锚作业不平行、装备可靠性低、除尘效果差等系列问题进行技术攻关。立足于“煤海蛟龙”快速掘进装备的工程应用基础,根据煤岩截割数据,获得半煤岩截割载荷,将截割功率由340 kW提高至560 kW,并对关键结构件进行了强化、优化设计,研发成功整机高度低至2.0 m的半煤岩掘锚一体机。针对煤岩性质变化剧烈的特点,研发了以自适应截割、规划截割、煤岩识别为核心的智能截割系统。自适应截割系统将截割过载率降低15%,且完全消除了1.5倍额定电流以上的冲击载荷;获得以掏槽方式进行岩石截割是掘锚一体机进行半煤岩截割的最佳工艺。优化的“三幕”控尘技术将半煤岩巷道的除尘效率提高至95%;通过调整自适应截割参数,将振动能量降低17%,奠定了半煤岩掘锚同步作业的基础。提出了基于装载运量感知的装运调速系统,实现了根据铲板堆量自动调整装运速度的功能,不仅满足高效运输需求,而且提高了半煤岩巷道装运系统的使用寿命。研制了基于多源信息的设备智能管理系统,结合相关的专业知识库,通过数据高维融合,实现了对设备故障预警、分析、预测以及运行状态回放,有力保障了设备的高效健康运行。在朱家峁煤矿,进行了工业性试验,经历了岩石硬度为73.2 MPa的考验,验证了各智能系统的可靠性,创造了月进尺853 m的半煤岩掘进纪录,证实了半煤岩掘锚一体机的高效性。

关键词:半煤岩巷道;掘锚一体机;智能截割;数字孪生;快速掘进

中图分类号:TD421

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2025)08-0017-10

Innovation and practice of efficient integrated tunneling and bolting in semi-coal rock roadways

WANG Hong^{1,2}, CHEN Mingjun¹, MA Kai¹, LI Jun³, ZHANG Xiaofeng¹

(1. Taiyuan Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Taiyuan 030006, China; 2. Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China; 3. Shanxi Tiandi CFT Technology Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

收稿日期:2025-04-10

策划编辑:朱恩光

责任编辑:刘雅清

DOI: 10.12438/cst.2025-0494

基金项目:山西省重点研发计划资助项目(202202100401021);天地科技重点资助项目(2025-TD-QZ018)

作者简介:王 虹(1959—),男,江苏江阴人,研究员,博士生导师。E-mail: wanghong@ccteg.cn

通讯作者:张小峰(1983—),男,江苏东台人,研究员,硕士。E-mail: 13453130510@163.com

Abstract: The efficient and rapid excavation of semi-coal rock roadways is a major engineering challenge that needs to be addressed urgently in the mines with ten-million-ton productivity in Shaanxi-Inner Mongolia mining area. A series of technical issues, such as low cutting efficiency, non-parallel excavation and anchoring, low equipment reliability, and poor dust removal should be addressed. Based on the engineering application foundation of the “Coal Sea Dragon” rapid excavation equipment and coal-rock cutting experimental data, the cutting power was increased to 560 kW. Key structural components were strengthened and optimized, resulting in the successful development of a semi-coal rock bolter miner with an overall height as low as 2 m. To address the highly variable nature of coal-rock properties, an intelligent cutting system including adaptive cutting, planned cutting, and coal-rock recognition as its core functions was developed. The adaptive cutting system reduced cutting overload by approximately 15% and completely eliminated loads that exceeding 1.5 times the rated current. Research confirmed that rock cutting using a grooving method is the optimal process trajectory for semi-coal rock excavation. By optimizing the dust control parameters of the “three-stage” system, a 95% dust removal efficiency for semi-coal rock was achieved. Additionally, through the optimization of adaptive cutting parameters, vibration energy was reduced by up to 17%, laying the foundation for synchronous excavation and bolting operations in semi-coal rock conditions. A loading and conveying speed regulation system based on load perception was proposed, what not only met the demand for efficient transportation but also extended the service life of the semi-coal rock roadway loading and conveying system. An intelligent equipment management system based on multi-source information was developed. By integrating relevant professional knowledge databases and performing high-dimensional data fusion, the system achieved fault warning, analysis, prediction, and operational state playback, which strongly supported the equipment’s efficient and healthy operation. Industrial trials were conducted at the Zhujiamao Coal Mine, where the equipment withstood the challenge of rock hardness up to 73.2 MPa. The reliability of all intelligent systems was verified, and a monthly excavation record of 853 m in semi-coal rock was achieved, demonstrating the high efficiency of the semi-coal rock bolter miner.

Key words: semi-coal rock roadway; bolter miner; intelligent cutting; digital twin; rapid excavation

0 引 言

薄煤层是指厚度小于 1.3 m 的煤层,在我国可开采煤炭储量中,薄煤层占比超过了 20%^[1],是煤炭能源重要的组成部分。相较于中厚煤层的开采,薄煤层开采由于其采掘空间狭小的缘故,导致采掘设备体积和功率受限、对环境适应能力差,人工劳动强度大,生产安全性和经济效益等指标远不如中厚煤层^[2]。因此,全国各大矿区普遍存在“采厚去薄”的现象,导致薄煤层的煤炭产量仅占全部煤炭总产量的 10%,造成煤炭资源的严重浪费^[3]。虽然在“双碳”目标的驱动下,风能、太阳能等清洁能源快速发展,煤炭在我国一次能源结构中的占比不断降低^[4],但是作为我国能源安全的兜底,其产量却在逐渐增加。2024 年我国原煤产量创历史新高,达到了 47.8 亿 t^[5]。在保证能源安全的前提下,顺利实现“双碳”目标,必须实现煤炭资源的合理开发,其中薄煤层的安全高效开采,扭转“弃薄采厚”的现状是主要途径之一。相比于中厚煤层的开采,半煤岩巷道掘进是薄煤层开采的独有特点。我国《煤矿安全规程》规定,综合机械化开采工作面,巷道高度不低于 1.8 m;受综采、综掘、运输等设备尺寸限制,现有薄煤层巷道的高度一般在 2.5 m 以上。相比于 1.3 m 的煤层厚度,岩石掘进量可达 50%。半煤岩巷道中岩石以泥岩、砂岩和粉砂岩为主,强度多在 10~60 MPa,且易受风化、水的

作用^[6]。

陕蒙矿区千万吨矿井建设普遍采用掘锚一体机进行掘进,在煤巷中的月进尺普遍大于 1 000 m,是减人提效的关键设备。经过 30 多年的开发,陕蒙矿区开始大量进入薄煤层开采阶段,据神东集团预估,到 2035 年将有 20% 的煤炭开采量来自于薄煤层。研制半煤岩掘锚一体机,实现半煤岩巷道的掘锚同步、快速掘进是千万吨煤矿高效开采的重要保障。工信部印发的《首台(套)重大技术装备推广应用指导目录》中明确提到半煤岩掘锚一体机的推广与应用^[7]。

受岩石截割能耗大、巷道尺寸小、半煤岩地质多样性等条件限制,现有掘锚一体机用于半煤岩巷道掘进普遍存在以下问题:

1)截割岩石的比能耗大、冲击载荷强烈,现有掘锚一体机截割能力不足,截割岩石时振动烈度成倍增加、机体疲劳寿命急剧降低,液压件和电器件在强振动环境下可靠性降低,从而导致整机开机率降低、掘进速度无法满足要求。

2)截割载荷和机身振动烈度无法控制,截割作业的同时无法进行锚护作业,失去了掘锚一体机掘锚同步作业的优势,掘进速度低,最高月进尺小于 500 m。

3)现有掘锚一体机的装运系统根据月进千米的煤巷掘进而设计,在半煤岩巷中,截割时间增长,截

割落料速度慢,装运系统经常处于轻负载以及空载运行状态。另一方面由于岩石的磨损性强,高速行驶装运系统的寿命急剧降低,有效使用时长仅 2 个月。

4)掘锚一体机截割半煤岩巷道的截割工艺不明确,现主要参照全煤巷道截割工艺,存在截割效率低下、截割电流冲击剧烈且机身振动大等问题。

5)岩石截割粉尘浓度高,除尘风筒布置受限,除尘效率低,严重危害工人呼吸健康和施工安全。

笔者以陕蒙矿区千万吨高效矿井的半煤岩巷道为背景,以月近千米的煤巷掘锚一体机为原型,在整机结构参数、多参数耦合控制,掘进工艺参数优化、成套装备施工优化等方面进行了创新与实践,创造了半煤岩月进尺 853 m 的纪录。

1 半煤岩掘锚一体机总体参数

截割载荷是半煤岩掘锚一体机设计的主要依据,需要兼顾割煤的高效性和割岩石的耐磨性。在割煤的高效性方面,一般采用大截割深度、大截线距的截齿排布方式,以保证割煤的成块率和低比能耗。在割岩石方面,由于岩石抗压强度大、磨蚀性强,一般采用小截割深度,小截线距的截齿排布方式,以保证截割的经济型。

1)截割功率确定。在煤矿采掘装备国家工程实验室的截割台上^[1],对不同抗压强度的煤、岩进行了大量截割试验,获得了截割力的变化关系,如图 1 所示。从图 1 中可知,在同等抗压强度下,截割岩石需要的力远远大于截割煤的力,且随着抗压强度的增加,差距越来越大。在我国陕蒙片区,煤质较硬,抗压强度可达 40 MPa;岩石的抗压强度一般小于 60 MPa,大多在 40 MPa 左右。根据图 1 的试验结果,在 40 MPa 的抗压强度下,截割岩石的截割力是截割

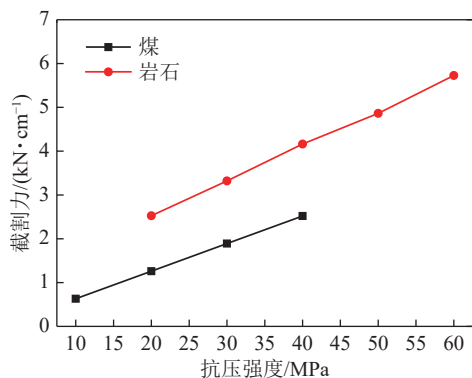


图 1 同等抗压强度下煤岩截割力对比

Fig.1 Comparison of cutting forces for coal and rock with equal compressive strength

煤炭的 1.6 倍。因此,将半煤岩掘锚一体机的截割功率由煤巷掘锚一体机的 340 kW 提升至 560 kW。

2)截割滚筒载荷模拟及结构强化。采用 ED-EM 颗粒流软件,根据岩石性质建立了模拟岩壁,并导入掘锚一体机截割结构(图 2),模拟分析了不同截割方式下的截割载荷情况。从图中可知,岩石截割过程中,载荷波动剧烈,通过 $\delta = \frac{1}{\bar{F}} \sqrt{\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r (F_i - \bar{F})^2}$ 计算,最大波动系数可达 0.55。进一步通过提取截割臂上的截割载荷谱,分别获得了截割力、截割牵引力以及截割扭矩的分布情况。

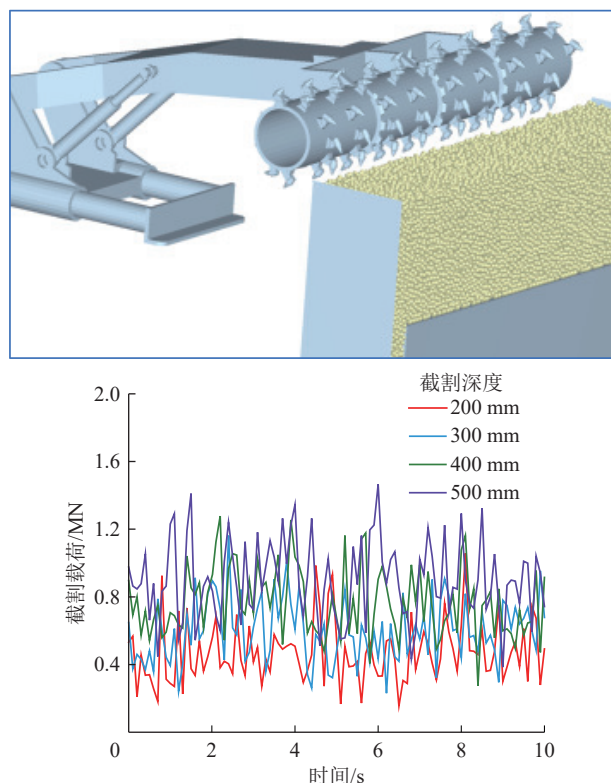


图 2 截割滚筒载荷模拟分析

Fig.2 Load simulation analysis of cutting drum

通过获取的载荷分布,对截割减速器、截割臂、截割滑架、底盘以及截割油缸进行了系统的动力学、静力学、疲劳等力学分析,对相应部件进行了强化优化设计,保障了半煤岩掘锚一体机具有煤巷掘锚一体机同等的使用寿命。创新设计了位于机身两侧的顶天立地支撑油缸,解决了半煤岩掘锚一体机附着力不足与要求接地比压低之间的矛盾。

3)整机参数。以半煤岩巷道高度为设计准则,对滑架、截割臂、底盘等进行了高度方向上的优化设计,将整机高度压缩至 2 000 mm,最大限度地减少岩石截割量。以掘锚同步作业为目标,设计了 4 台具有滑移功能的顶锚钻机,2 台侧帮钻机,能够在截割

的同时完成对顶部、侧帮的支护。研制成功的半煤岩掘锚一体机如图 3 所示,其主要结构参数及其与同类产品的比较见表 1。

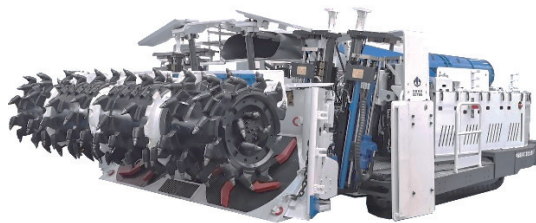


图 3 半煤岩掘锚一体机
Fig.3 Photo of semi-coal and rock bolter miner

2 半煤岩智能截割系统

开发了以自适应截割、规划截割以及煤岩识别为核心的智能截割系统,如图 4 所示。自适应截割通过测量截割载荷,对截割滚筒的牵引速度进行控制,实现割煤和空载时候的快速性,割岩时候的高可

表 1 掘锚一体机主要参数对比
Table 1 Comparison of key parameters of bolt miner

参数	EJM560	EJM270	MB670-1
截割功率/kW	2×280	270	270
截割驱动方式	双电机	单电机	单电机
截割高度范围/m	2.2 ~ 3.5	2.0 ~ 3.3	2.0 ~ 3.3
顶锚杆数量	4	4	4
帮锚杆数量	2	2	2
系统电压/V	3 300/1 140	1 140	1 140

靠性,保证整机的稳定性。规划截割即针对不同的煤岩介质,在保障整机稳定、振动可控的前提条件下,制定不同的截割滚筒的运动轨迹,提高整机截割效率。煤岩识别通过测量截割臂关键部位的振动、截割牵引速度、截割位姿等信息,采用深度学习的方法对当前截割煤岩的性质进行识别,及时调整自适应截割的控制参数以及指定下一截割循环的运动轨迹。智能截割的三大模块相互协同,共同完成智能截割。

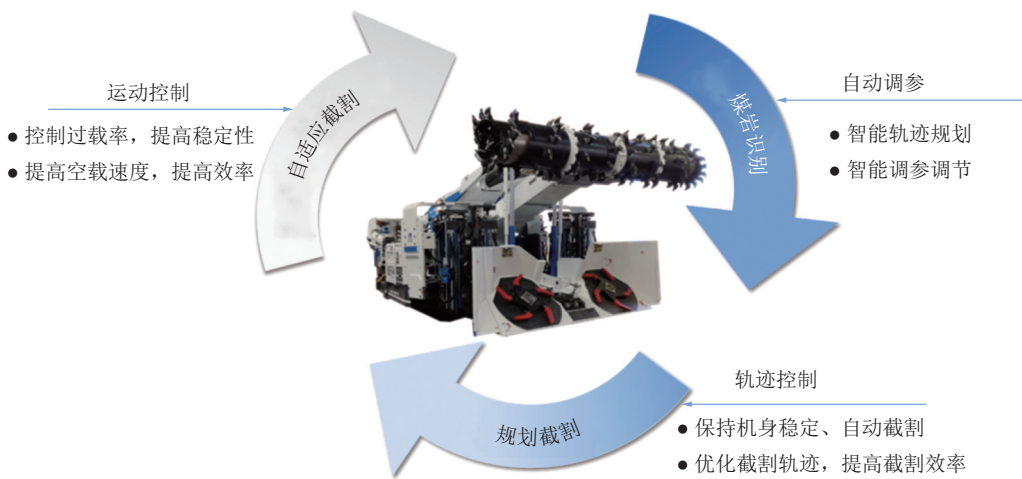


图 4 智能截割系统组成
Fig.4 Composition of intelligent cutting system

1)自适应截割技术。自适应截割一直是采煤机和掘进机智能控制的研究热点,研究人员先后提出了基于模糊控制^[8]、PID 控制^[9]、模糊 PID 控制^[10]等多种控制算法,对截割头牵引速度进行控制,以期实现恒功率截割。为了解决 PID 参数以及模糊算法参数在煤岩性质发生突变,参数设置不合适导致出现振荡和超调等控制不佳的问题,研究人员最新提出了基于煤岩识别的自适应控制^[11],以及牵引速度和截割滚筒转速联合的采煤机控制^[12-13]。

掘锚一体机截割动作分为 2 个过程,分别为掏槽和摆动截割。在掏槽过程中,随着掏槽深度增加,截齿与煤岩壁接触的数量逐渐增加;在上下摆动截

割过程中,由于截割臂悬臂的结构特征,即使液电磁阀的控制流量相同,截割深度也与截割高度呈非线性关系。因此,掘锚一体机的截割过程属于非稳态截割过程,加上煤岩本身性质的突变性,导致截割载荷控制异常困难。为此,半煤岩掘锚一体机在煤岩识别的基础上,采用了模糊控制算法以提高对煤矿井下复杂的地质条件的适应性。

以截割电流偏差作为控制目标,以截割电磁阀和掏槽电磁阀的控制电流为控制信号。基于实验室中截割试验台获得的煤岩强度-截割厚度-截割电流-电流波动的关联数据库,理论推导出截割滚筒的相关载荷特性,并初步设置模糊控制量。在井下工业

性试验中,结合操作工人的经验,对模糊控制策略进行优化调整。

图 5a 为在煤矿井下现场试验监测的模糊控制效果。上图为监测的截割电流,下图为控制器发出的控制信号。在未过载的情况下,控制信号以最大的输出量输出;当监测到截割电流过载以后,控制信号降低,截割电流也随之降低,保障了整机的可靠性。当截割电流保持在额定范围之内运行时,控制信号输出不变。当截割电流小于额定范围以后,控制信号输出量增大,提高截割系统的运行速度。根据控制信号与截割电流相互之间的关系,确定了模糊控制作用在实际工况中的可用性。

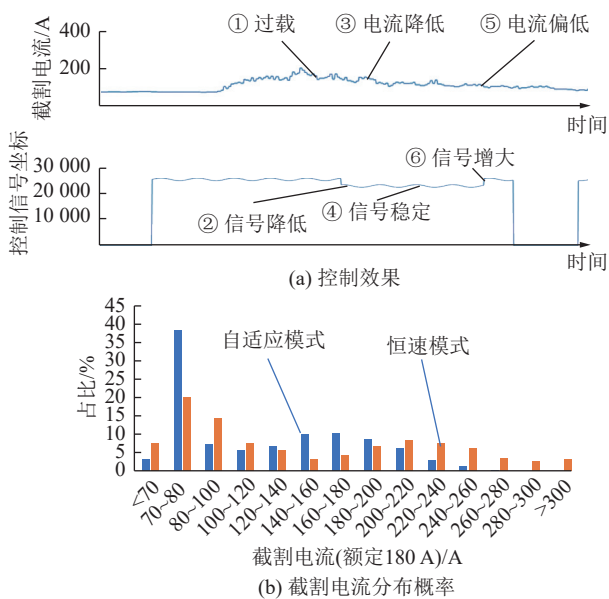


图 5 自适应截割效果

Fig.5 Adaptive cutting performance

根据试验矿井煤岩硬度、截割工艺对模糊控制策略进行了优化。图 5b 为掘锚一体机司机在相邻 2 个截割循环(地质条件几乎相同)分别采用恒速截割和模糊控制截割方式,统计获得的截割电流分布概率。从图中可知,模糊控制截割将截割电流整体向额定附近压缩,将过载率由恒速的 33% 降低到 18% 左右,且完全消除了 1.5 倍额定电流以上的负载。在截割煤及空载的工况下,模糊控制和恒速控制的比例相近。通过对截割时间进行统计,模糊控制掘进 1 m 的耗时约为恒速截割耗时的 89%,说明模糊控制截割具有提高截割速度和保障整机可靠性的双重作用。

2)规划截割工艺。规划截割即根据巷道断面的形状,截割机构的结构特点和尺寸,规划截割滚筒的运动轨迹,使之完成掘进断面的自动成型。规划截

割不仅需要考虑几何轨迹,还需要考虑轨迹运动过程中的整机稳定性,煤岩的截割效率以及顶底板安全等因素。

掘进机是我国掘进用量最大的掘进装备,研究人员对掘进机的轨迹控制进行了大量的研究,分别形成了软煤在层理、节理发育处钻进;均匀中硬煤层在左下角钻进,然后自下向上横扫截割;半煤岩进行先割煤,再割岩的方式;破碎顶板采用留顶煤先割两帮,中间留煤垛的截割轨迹。在轨迹规划中,需要根据煤的软硬及时调整步距,以提高掘进效率^[14]。针对截割轨迹对地质条件发生变化无法及时调整的问题,研究人员提出了基于操作人员示教的记忆截割。为了提高掘进装备的断面成型精度,研究人员对截割臂系统的传递误差、检测元件的测量精度、PID 位置控制算法进行了相应的研究^[15]。

采用全宽截割的掘锚一体机进行半煤岩巷道的掘进在国内外属于前沿探索,还未见相应的截割工艺的研究。为此,基于掘进机掘进工艺的基础,以截割速度、整机振动、截割电流为综合优化目标,在煤矿井下对不同地质条件的截割工艺进行了试验,获得了以掏槽方式进行岩石截割的高效截割工艺。采用颗粒流软件对不同岩石硬度、截割速度、吃刀深度下的截割性能进行了分析,如图 6 所示^[16],获得了截割阻力、扭矩以及比能耗的随截割深度、截割速度的经验公式,为截割轨迹参数的优化提供了理论依据。

在截割工艺的基础上,根据掘锚一体机截割臂的相关参数,采用 D-H 参数法建立截割臂各关节对应坐标系,根据截割范围及轨迹要求,对运动学方程进行求逆解,获得了相应的掏槽油缸位移参数、截割油缸位移参数。采用 PID 算法,对掏槽油缸位移量、截割油缸位移量进行控制,实现截割断面的自动成型。进一步通过煤岩识别的结果选择截割轨迹和相应的参数。

3)多信息融合的煤岩识别系统。根据煤岩性质及时调整自适应截割参数,选择相应的规划截割路径和参数,是保障掘锚一体机自动截割的关键。现有煤岩识别方法主要包括:自然伽马射线法、振动、截割电流、声发射法、红外热成像法、图像识别法、超声波、电磁波探测等多种方法^[17]。在掘进装备上,由于施工环境的特殊性,通过监测设备的振动、截割电流、油缸压力等设备参数是实现煤岩识别的最具工程应用前景的方法。研究人员在多源信号特征提取、信号融合、滤波以及深度网络结构设计等方面进行了深入研究,以提高煤岩识别的精度^[18-20]。

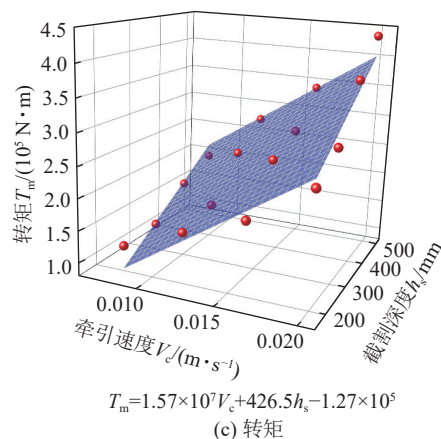
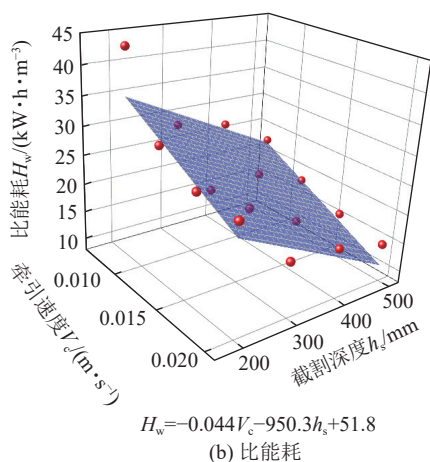
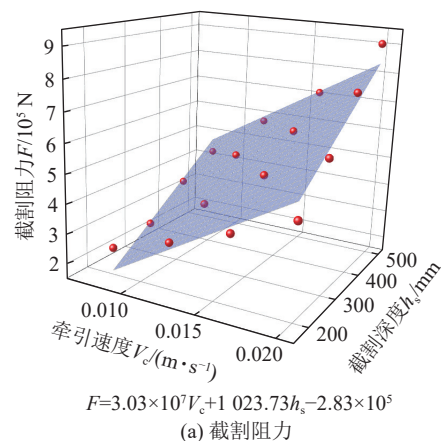


图 6 掘锚一体机半煤岩掘进工艺参数优化

Fig.6 Optimization of process parameters for semi-coal rock tunneling with bolt miner

掘锚一体机的振动、截割电流、截割油缸压力等外在特性是煤岩性质、瞬时截割深度以及参与截割截齿数量综合体现。掘锚一体机的外在特性能够在一定程度上表征煤岩识别特性,不同于采煤机属于相对稳态截割的特征,掘锚一体机工作的全过程都处于非稳态过程,参与截割的截齿数量和方位、瞬时截割深度均在发生变化,传统的方式对煤岩识别的效率较低。

针对上述问题,提出了融合截割头位姿检测的多源信息煤岩识别技术。通过同步检测掏槽油缸位移、截割油缸位移识别截割头当前位置,结合当前位置的系统参数,获得取样时刻点的瞬时截割深度。同时,通过掏槽油缸、截割油缸位移数据,构建截割滚筒三维空间运动历程,识别截割头与煤岩壁的相互作用状态。通过构建基于油缸位移、振动信号、截割电流的神经网络系统,识别煤岩效率可达 84.5%。在实际应用中,通过连续多次取样识别,然后通过概率决定最终的煤岩性质,以提高煤岩识别的准确性。

3 时空多维同步支护工艺及保障技术

传统采用先掘、后锚的掘进工艺中,锚护工艺复杂,工作量大,锚护作业时间占到 60% 以上,是限制快速掘进的主要原因。笔者先后对提高掘进速度的掘锚同步工艺、时空多维同步快速掘进工艺进行了创新^[21-22],提出了根据地质力学条件,合理布局锚杆钻机在快速掘进装备空间的布置位置,在保障掘进安全的条件下,动态调整支护工艺,以实现掘锚完全同步作业。根据不同稳定围岩条件,提出了相应的成套装备配套方案。在半煤岩巷道中,由于截割振动问题、高浓度粉尘问题,严重影响了掘锚同步作业。

项目团队提出了三幕控技术^[23],图 7 是该技术根据通风参数、巷道尺寸,优化通风除尘参数后的半煤岩巷道除尘效果。在截割岩石过程中,粉尘被有效控制在临时支护前方的粉尘池中,临时支护后方的截割臂以及探水钻清晰可见。在掘锚一体机司机处,与未开启除尘器相比,总粉尘除尘效率达到了 95%。半煤岩高效除尘技术的实施,为掘锚同步作业提供了视觉保障,提高了掘锚同步作业的安全性。

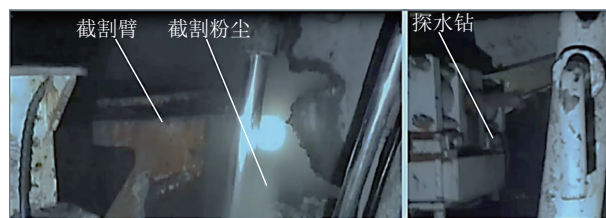


图 7 截割岩石时掘锚一体机视线效果

Fig.7 Visibility performance of bolt miner during rock cutting

基于前述的自适应截割技术、规划截割技术,以锚护底座振动特性为指标,对自适应截割参数和规划截割的参数进行优化控制。通过测量截割臂与减速器连接处的振动,分析对比了自适应截割对整机振动的影响,无论是掏槽工况还是向下截割工况,自

适应截割对于振动的峰峰值减少都很明显,在掏槽工况,峰峰值降低了 72%;向下截割工况,峰峰值降低了 67%。在振动能量方面,掏槽工况的振动能量降低了 5%,向下截割过程中振动能量降低了 17%。为了进一步保障截割状态下整机的稳定性,在机身重心附近设计了大吨位支撑油缸。在自适应截割和大支撑油缸的共同作用下,实现了对锚护底座振动烈度的较好抑制,为掘锚同步作业奠定了基础。

4 半煤岩自动调速装运系统

在半煤岩巷道中,掘锚一体机的截割时间远远大于煤巷中的截割时间。掘锚一体机需要具备在截割煤时,快速将物料运出,减少迎头的堆煤;在截割

岩石时,由于物料较少,需要降低装运系统的速度,减少装运系统的磨损。根据现场调研,在半煤岩巷道中,如果采用常规的煤巷掘锚一体机运输速度,装运系统的刮板链、耙爪的使用寿命急剧降低。为此,发明了如图 8 所示的半煤岩掘锚一体机装运调速控制方法及系统,成功将半煤岩刮板运输系统的有效使用时长提高 1 倍以上。该系统主要由 3 部分组成:控制边界设置模块、装载控制模块和运输控制模块。

控制边界设置模块主要由前述的煤岩识别模块构成,主要通过识别当前掘进断面的性质是属于全煤、全岩还是半煤岩,根据巷道的煤岩属性及占比,对装载、运输系统的最小运输速度、最大运行速度等参数进行设置。

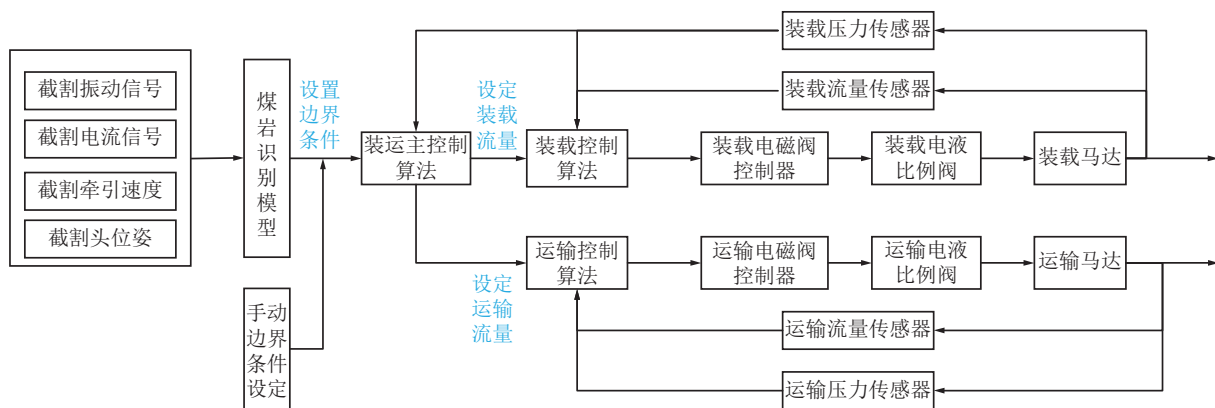


图 8 掘锚一体机装运调速控制系统

Fig.8 Speed regulation control system for loading and hauling of bolt miner

装载控制模块通过检测装载压力,判断出当前掘锚一体机铲板上的堆料情况,然后决策出装载和运输马达流量。当装载压力增大时,认为铲板上堆积物料增多,增加装载和运输马达的流量,将堆料及时运出;当装载的压力减小时,认为铲板上的堆料减少,减小装载和运输马达的流量,从而降低系统能耗消耗和刮板输送机、耙爪的磨损。装载模块的主控制算法包含分阶段控制算法和连续控制算法 2 种。装载控制算法具有检测装载憋卡等异常情况,当装载控制算法检测到装载压力大于最高压力且流量较小时,判断出装载耙爪受到大块煤岩憋卡,发出警告提示,停止装载工作。

运输控制模块接收主控制算法的给定运输流量,并实时检测运输马达的流量和压力,将实时监测的流量与主程序的给定流量进行对比,并通过 PID 算法控制调整运输电磁阀控制器的输出,使运输马达的流量快速达到主程序给定的流量。与此同时,当运输控制算法检测到装载压力大于最大压力,但运

输流量较小时,判断出刮板链受到大块煤岩憋卡,发出警告提示,同时停止装载和运输工作。

5 基于多源信息融合的设备管理系统

掘锚一体机在恶劣的环境中工作,其结构件、液压系统、电气系统等元部件均会逐渐发生故障。煤矿设备的健康智能管理系统,通过对特征参数的监测,以及监测参数的深度分析,获得设备的运行状态,对设备的维护检修、故障预警、数字孪生具有重要意义^[24-25]。

研制了与半煤岩掘锚一体机有机融合的健康智能管理系统,按照使用功能,将管理系统按照截割、装运、锚护、液压、电控、行走分为各子系统进行状态监测。对各子系统的特征参数进行了分析,确定能够全面表征工作状态的多源信息集,以及相应传感器的安装位置。成套系统主要采集的信号组成如图 9 所示,以截割系统为例,主要采集截割电流、截割臂振动、截割油缸位移、压力,掏槽油缸位移和压力 6 个特征参量。根据截割机理、截割载荷特征等

知识库,对这 6 个参量进行高维的融合,获得截割系 统工作状态,形成了数字孪生系统。

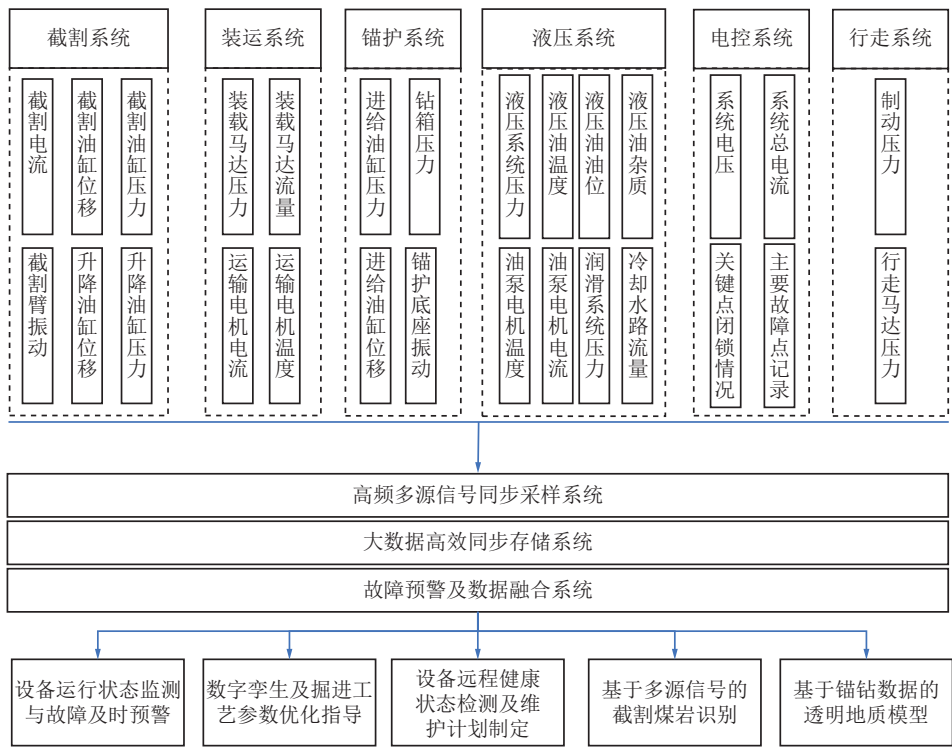


图 9 掘锚一体机状态监测系统组成

Fig.9 Composition of bolt miner condition monitoring system

通过对各系统特征参数的监测、数据纪录及无线、有线传输,实现了数据在掘锚一体机本地、远程集控中心、地面控制中心的储存及显示。研制了大数据分析系统,具备将数据从时域、数量统计、频域分析的功能(图 10)。基于相关专业的知识库,不仅建立了子系统内部的设备运行状态监测模型及故障预测模型,还建立各子系统关联的状态、故障预测模型。图 10 中的右图是基于数据驱动的掘锚一体机

截割轨迹回放及截割电流再现,为优化截割工艺,了解设备全生命周期的运行状态提供了数据基础。

6 工业性试验

半煤岩掘锚一体机在朱家峁矿的 1311-1 进风巷及 1314 回风巷道进行了工业性试验。试验巷道采高 3.3 m,采宽 5.6 m,其中煤层厚度 1.7~2.1 m,平均煤层厚度为 1.9 m,沿煤层顶板掘进。底板大部分地

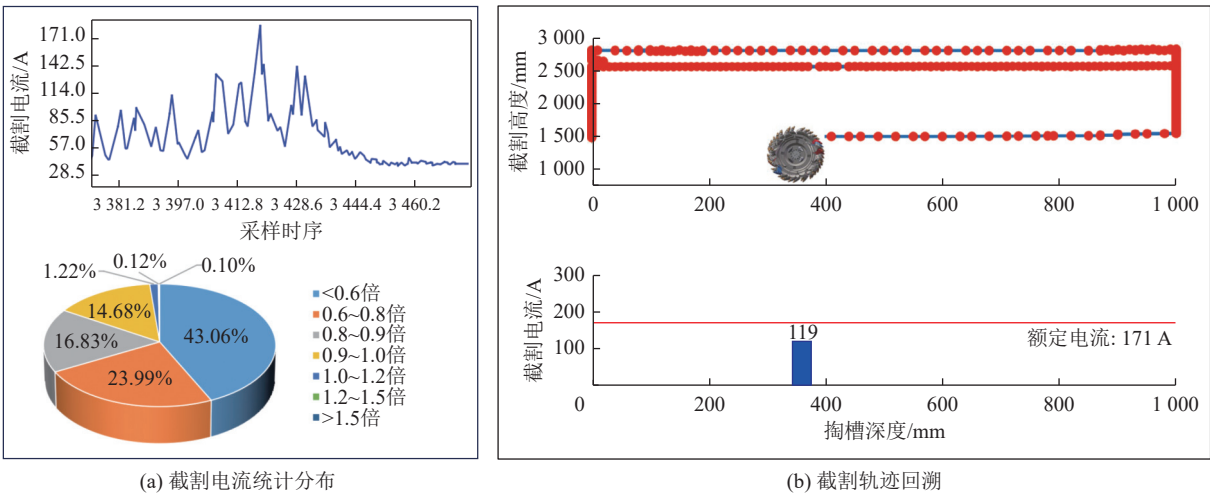


图 10 数据分析及动态回溯软件界面

Fig.10 Interface of data analysis and dynamic backtracking software

段为粉砂质泥岩及泥质粉砂岩,干燥抗压强度 42.5~87.8 MPa,平均为 59.638 MPa,软化系数为 0.17~0.71。采用岩石回弹仪(N 型)测量岩石表面硬度,并采用回弹值-抗压强度经验式^[26]获得 1314 回风巷道的岩石硬度为 44.8 MPa,在 1311-1 进风巷的 1 900 m 处,岩石硬度为 73.2 MPa。

半煤岩掘锚一体化成套系统配套为:半煤岩掘锚一体机的型号为 EJM560/4-2,后接 DZY100/160/135 大跨距带式转载机,最大转运长度可达 50 m。带式转载机跨骑在 DWZY1000/1500 迈步式自移机上。带式转载机后连接 HCN400 除尘器,除尘风筒安装于带式转载机的上方,并与半煤岩掘锚一体机机身的除尘风道相连。

截割工艺为先掏槽完 1 m 的煤,然后以掏槽方式截割岩石。在岩石硬度为 44.8 MPa 的巷道处,掘进 1 m 耗时约 15 min。支护工艺为顶板支护采用 6 根规格为 $\phi 18\text{ mm}\times 2\,000\text{ mm}$ 的锚杆,侧帮不支护,顶板支护一根锚杆的时间为 4 min。根据掘锚一体机的锚杆钻机布置,需要 8~10 min 完成 6 根锚杆的全部支护。截割耗时比支护耗时多 5~7 min。掘锚同步作业规程下,每掘进 1 m 耗时约 15 min。在岩石硬度为 73.2 MPa 的巷道处,截割方式与岩石硬度为 44.8 MPa 处相同,只是将截割滚筒的吃刀深度降低,在自适应截割控制算法的作用力,截割流量实时调节,整机振动烈度较小,每掘进 1 m 耗时量约为 30 min。

工业性试验过程中,设备智能管理系统准确实现了 2 次预警故障。一次左截割油缸的安全阀损坏,左右油缸受力不均衡,通过内置的知识库,实现了及时识别并提出警告,避免了因安全阀损害导致截割油缸损害的重大事故产生。一次是识别出运输电机存在连续保护及长时间过载运行的状况,通过统计电机的异常运行数据,得出电机已处于带病工作状态,建议进行提前备件。在运行 2 个月后,运输电机损坏,由于已提前准备备件,减少了停工停产的风险。经过 3 个月的工业性试验,半煤岩掘锚一体机创造了月进尺 853 m 的半煤岩掘进纪录,相比于综掘机掘进月平均进尺 450 m,掘进速度提高了近 1 倍。

7 结 论

1) 半煤岩掘锚一体化高效掘进技术在煤炭开采领域得到了广泛应用,通过集成掘进、装载、运输、支护等多项功能于一体,实现了掘进与支护的平行作业,降低了劳动强度,并保障了作业安全,半煤岩

巷道的掘进速度提高 1 倍,向月进千米迈进。

2) 以自适应截割、规划截割以及煤岩识别为核心技术的智能截割系统,不仅可以有效控制截割过载率,提高掘锚一体机的可靠性,而且可以降低轻负载的占比,提高掘进效率。根据装载压力识别装载量并进行装运速度的控制方法,在满足高效装运的同时,降低了装运系统的磨损率,将装运系统使用寿命增加 1 倍。与整机有机集成的智能管理系统,融合了各专业的相关知识,完成了对相关故障的预警及预测,极大提高了设备的使用寿命。

3) 大量的工程实践证实,半煤岩掘锚一体机在进一步降低整机高度、提高维护便捷性、优化自动截割的可控性、降低初期投入成本等方面需要进一步攻关。随着煤炭开采技术的不断进步和市场需求的变化,半煤岩掘锚一体机将继续进行技术创新和应用拓展,以适应更加复杂多变的开采环境,为煤炭工业的可持续发展做出更大贡献。

参考文献(References):

- [1] 高士岗,高登彦,欧阳一博,等.中薄煤层智能开采技术及其装备[J].煤炭学报,2020,45(6):1997-2007.
GAO Shigang, GAO Dengyan, OUYANG Yibo, et al. Intelligent mining technology and its equipment for medium thickness thin seam[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1997-2007.
- [2] WANG, J C, WEI W J. Thick coal seam mining in China, thick coal seam underground mining[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025.
- [3] WANG H S, LIU Y, LI L, et al. Study on critical width of semi-coal rock roadway of shallow-buried thin coal seam based on coal side self-stabilization[J]. Sustainability, 2024, 16(13): 5689.
- [4] ZHANG D Y, ZHAO M J, WANG Y Z, et al. Technological innovation and its influence on energy risk management: Unpacking China's energy consumption structure optimisation amidst climate change[J]. Energy Economics, 2024, 131: 107321.
- [5] 国家统计局.中华人民共和国 2024 年国民经济和社会发展统计公报[R/OL]. [2025-02-02]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202502/t20250228_1958817.html.
- [6] 康红普.我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J].岩石力学与工程学报,2021,40(1):1-30.
KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 1-30.
- [7] 中华人民共和国工业和信息化部.工业和信息化部关于印发《首台(套)重大技术装备推广应用指导目录(2024 年版)》的通知[R/OL]. [2025-02-02]. https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2024/art_2fd2b3eff1f64c9fa27d635932a464ee.html
- [8] 杨阳,王鹏江,吉晓冬,等.基于模糊数学的掘进机截割头转速分档预测方法[J].煤炭工程,2022,54(2):172-176.
YANG Yang, WANG Pengjiang, JI Xiaodong, et al. Prediction for

- roadheader cutting head speed of different gears based on fuzzy mathematics[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(2): 172–176.
- [9] 许向前, 简阔, 王宁, 等. 考虑煤岩硬度的悬臂式掘进机截割控制[J]. *工矿自动化*, 2024, 50(4): 153–158.
XU Xiangqian, JIAN Kuo, WANG Ning, et al. Cutting control of boom-type roadheader considering coal rock hardness[J]. *Journal of Mine Automation*, 2024, 50(4): 153–158.
- [10] 王东杰, 王鹏江, 李悦, 等. 掘进机截割臂自适应截割控制策略研究[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(20): 2492–2501.
WANG Dongjie, WANG Pengjiang, LI Yue, et al. Research on adaptive cutting control strategy of roadheader cutting arms[J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(20): 2492–2501.
- [11] ZHANG G T, SHEN G, TANG Y, et al. State recognition based adaptive cutting method for roadheader[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2025, 239(6): 2030–2048.
- [12] 赵丽娟, 王雅东, 张美晨, 等. 复杂煤层条件下采煤机自适应截割控制策略[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 541–563.
ZHAO Lijuan, WANG Yadong, ZHANG Meichen, et al. Research on self-adaptive cutting control strategy of shearer in complex coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 541–563.
- [13] WANG Z B, LI F T, SI L, et al. Research progress and development trends in adaptive cutting technology for shearers[J]. *Coal Science and Technology (Peking)*, 2025, 53(1): 296–311.
- [14] ZHANG C, ZHANG X H, YANG W J, et al. An improved NSGA-II-based method for cutting trajectory planning of boom-type roadheader[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(4): 2126.
- [15] 毛清华, 陈磊, 闫昱州, 等. 煤矿悬臂式掘进机截割头位置精确控制方法[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(S2): 562–567.
MAO Qinghua, CHEN Lei, YAN Yuzhou, et al. Precise control method of cutting head position for boom-type roadheader in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(S2): 562–567.
- [16] 刘昕宇, 常映辉, 陈明军, 等. 半煤岩掘锚一体机滚筒截割性能研究[J]. *煤炭工程*, 2025, 57(2): 208–217.
LIU Xinyu, CHANG Yinghui, CHEN Mingjun, et al. Drum cutting performance of semi coal-rock bolter miner machine[J]. *Coal Engineering*, 2025, 57(2): 208–217.
- [17] SUI Y P, ZHANG L, SUN Z P, et al. Research on coal and rock recognition in coal mining based on artificial neural network models[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(2): 864.
- [18] 张强, 王海舰, 井旺, 等. 基于模糊神经网络信息融合的采煤机煤岩识别系统[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(2): 201–208.
ZHANG Qiang, WANG Haijian, JING Wang, et al. Shearer's coal-rock recognition system based on fuzzy neural network information fusion[J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(2): 201–208.
- [19] 刘春生, 刘延婷, 刘若涵, 等. 采煤机截割状态与煤岩识别的关联载荷特征模型[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 527–540.
LIU Chunsheng, LIU Yanting, LIU Ruohan, et al. Correlation load characteristic model between shearer cutting state and coal-rock recognition[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 527–540.
- [20] 张美晨, 赵丽娟, 王雅东. 基于 CPS 感知分析的煤岩截割状态识别系统[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(12): 4071–4087.
ZHANG Meichen, ZHAO Lijuan, WANG Yadong. Recognition system of coal-rock cutting state based on CPS perception analysis[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(12): 4071–4087.
- [21] 王虹, 王步康, 张小峰, 等. 煤矿智能快掘关键技术与工程实践[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(7): 2068–2083.
WANG Hong, WANG Bukang, ZHANG Xiaofeng, et al. Key technology and engineering practice of intelligent rapid heading in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(7): 2068–2083.
- [22] 王虹, 王建利, 张小峰. 掘锚一体化高效掘进理论与技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2021–2030.
WANG Hong, WANG Jianli, ZHANG Xiaofeng. Theory and technology of efficient roadway advance with driving and bolting integration[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2021–2030.
- [23] 王虹, 陈明军, 张小峰. 我国煤矿快速掘进 20a 发展与展望[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(2): 1199–1213.
WANG Hong, CHEN Mingjun, ZHANG Xiaofeng. Twenty years development and prospect of rapid coal mine roadway excavation in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(2): 1199–1213.
- [24] 王国法, 王虹, 任怀伟, 等. 智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 295–305.
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 295–305.
- [25] 王国法, 张金虎, 任怀伟, 等. 煤炭高效开采数智技术与成套装备研究及应用[J]. *煤炭学报*, 2025, 50(1): 43–64.
WANG Guofa, ZHANG Jinhui, REN Huaiwei, et al. Research and application practice of digital intelligent technology and complete set of equipment for efficient coalmining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 50(1): 43–64.
- [26] AYDIN A, BASU A. The Schmidt hammer in rock material characterization[J]. *Engineering Geology*, 2005, 81(1): 1–14.