

金属矿山安全智能化发展现状及展望

王鑫阳^{1,2}, 魏鹏鹏^{1,2}, 崔铁军^{1,2*}

(1. 沈阳理工大学环境与化学工程学院; 2. 沈阳理工大学辽宁省现代安全工程产业学院)

摘要:智能化矿山是传统矿业与前沿技术深度融合的产业发展新方向,以人工智能和机器学习为核心技术支撑构建全链条数字化体系。国内金属矿山建设与智能化技术协同推进,但矿山安全生产仍面临多重风险耦合的严峻挑战。通过对金属矿山安全智能化研究进展进行梳理,重点从复杂地质条件、设备安全风险及多灾源隐患3方面阐述当前金属矿山安全现状,以及智能化技术在应对金属矿山核心风险因素中的具体应用。同时,提出矿山智能化在技术瓶颈与设备智能化水平、数据整合与标准化难题、深部开采与复杂环境适应性方面存在的挑战,并从核心技术的自主创新与装备升级、数据驱动的协同管控与标准化建设及深部极端环境适应性对金属矿山安全智能化技术发展进行了展望。

关键词:金属矿山;智能化;安全风险;事故灾害;机械伤害;火灾爆炸

中图分类号:TD852

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)07-0026-06

doi:10.11792/hj20250703

引 言

金属矿山作为国民经济的重要支柱产业,其安全生产直接关系到资源供给保障与从业人员生命安全。然而,随着浅部资源逐渐枯竭,金属矿山开采逐步向深部、复杂地质条件区域延伸,高地压、高温、高湿及多灾源耦合等极端环境导致传统安全技术模式面临严峻挑战。近年来,矿山事故仍时有发生,诱因多集中于复杂地质条件引发的围岩失稳、突水突泥,设备老化与操作不规范导致的机械故障,以及可燃气体与粉尘积聚引发的火灾爆炸等系统性风险。这些问题的解决亟须突破传统技术框架,探索智能化技术与矿山安全管理的深度融合路径。

当前,以人工智能(AI)、物联网(IoT)、大数据为代表的智能化技术为金属矿山安全治理提供了新思路。通过多源数据实时感知、灾害动态预测与智能决策响应,智能化技术已在边坡监测、设备运维、火灾防控等领域取得显著进展。然而,金属矿山安全风险具有一定复杂性,在智能化技术落地过程中面临装备自主化水平低、数据标准化缺失及深部环境适应性不足等问题。此外,智能化技术如何与矿山地质力学特性、开采工艺及管理流程高效协同,仍需系统性理论与方法支撑。

本文基于文献研究与技术分析,系统梳理金属矿

山安全智能化领域的研究进展。首先,从地质与开采条件风险、机械设备故障及火灾爆炸隐患3方面剖析当前金属矿山安全现状;其次,阐述智能化技术在地质灾害预警、设备风险防控及多灾源协同管理中的创新应用;最后,针对关键技术瓶颈、数据整合难题及深部环境适应性挑战,提出未来发展方向。研究旨在为金属矿山安全智能化技术体系构建提供理论参考,推动行业实现本质安全与高效开采。

1 金属矿山安全现状

1.1 地质与开采条件风险因素

地质与开采条件风险是矿产资源开发的核心制约因素,其风险集中体现在矿体赋存特征与岩体工程性质的耦合作用上(见图1)。从地质灾害层面,矿体厚度、倾角及构造特征直接影响围岩稳定性,厚大矿体或陡倾矿体易引发应力集中,导致坍塌、岩爆及地压灾害等;断裂构造带的存在可能诱发采空区顶板冒落或巷道片帮。水文地质条件复杂化进一步加剧地质灾害风险,岩溶发育区域或高渗透性地层易引发突水事故,如矿坑涌水量超过设计排水能力将造成淹井风险。从开采技术适应性角度,岩体工程性质差异显著影响工艺选择,破碎带或软弱夹层发育的围岩稳定性差,需采用超前支护或充填法控制冒顶风险;矿石硬度、结块性等物理特性若与采矿方法不匹配,例如:

收稿日期:2025-03-19; 修回日期:2025-05-01

基金项目:辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金资助项目(LJ212410144051)

作者简介:王鑫阳(1995—),男,副教授,博士,从事粉尘爆炸理论及防治技术研究工作;E-mail:wxinyang@sylu.edu.cn

*通信作者:崔铁军(1983—),男,教授,博士,研究方向为系统可靠性及系统故障演化理论;E-mail:ctj_159@163.com

坚硬矿石采用普通崩落采矿法易导致二次破碎成本激增,而高粉矿率矿体采用空场采矿法则可能引发拱堵塞事故。这些地质与技术条件的动态交互作用,

要求开采方案必须建立在地质力学精准评估与工艺参数优化的基础上。

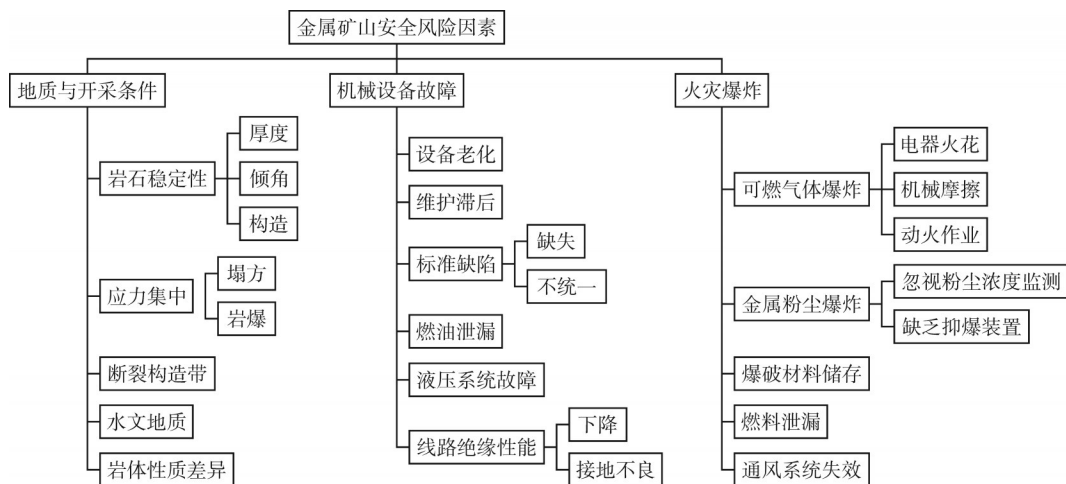


图1 金属矿山安全风险因素

Fig. 1 Safety risk factors in metal mines

1.2 机械设备故障风险因素

金属矿山机械设备存在显著的安全风险(见图1),主要表现为设备老化、维护滞后导致故障率升高,无轨运输车辆等关键设备安全装置标准缺失或不统一(如警示灯、对讲机功能不完善),柴油动力设备燃油泄漏或液压系统故障可能引发火灾,电气线路绝缘性能下降或接地不良易产生电火花,加之施工机具操作不规范(如超载、违规改装)。这些因素共同增加了机械伤害、意外停机事故风险,需通过设备智能化升级、定期检修制度强化及安全操作标准化管理实现系统性风险防控。

1.3 火灾爆炸风险因素

火灾爆炸风险主要源于地下作业环境中可燃气体的积聚与金属粉尘的悬浮(见图1),当浓度达到爆炸极限时,遇电气火花、机械摩擦或违规动火作业等极易引发爆炸;同时,爆破材料储存或使用不当、柴油设备燃料泄漏及通风系统失效等问题进一步加剧了此类风险,而未按规范执行动火审批或忽视粉尘浓度监测与缺乏抑爆装置或应急预案则使火灾爆炸隐患更加复杂化。这些风险因素相互叠加,在高温、高湿等复杂作业环境下形成系统性安全隐患,通过动态监测、技术升级及严格管控可实现系统性防控。

2 智能化技术在金属矿山安全中的应用

2.1 应对地质与开采条件风险的智能化技术

基于AI与机器学习(ML)技术的矿山地质灾害防控体系,通过构建多维度实时监测网络(IoT传感器^[1]、卫星InSAR^[2]、微震系统^[3-4])与多源数据融合分析平台,实现灾害风险的动态预测与主动防控。在变

形滑坡预警领域,基于双向长短期记忆(BiLSTM)和卷积神经网络-长短期记忆(CNN-LSTM)模型成功预测矿山边坡形变^[5];结合随机森林算法(RF)与EEMD-CNN-LSTM时序模型协同分析降雨量等对滑坡位移影响规律,生成滑坡预测图^[6]。针对岩爆与地压灾害,基于DCNN微震信号识别,结合大数据深度学习,地压岩爆微震信号自动识别精度与分类效率有效提升^[7-8];采用MIDAS-NX建立矿区三维可视化模型,基于开采接续时空关系,模拟围岩应力、位移指标,优化采场布置方案^[9-10]。针对透水事故防控,采用GWO-Elman神经网络预测底板突水通道^[11],采用WOA-ELM算法快速识别突水水源^[12],并基于时变网络路径规划算法构建矿井水害应急疏散系统^[13]。面对复杂岩体特性,融合DL与YOLO图像识别的岩体结构面识别方法准确识别结构面裂隙^[14],建立深度信息学习算法、分析地质构造与地应力场关系、构建多场耦合非线性计算方法及多尺度地应力场反演与重构,精确反演深部复杂地应力场分布^[15]。智能化技术在矿山地质安全风险^[16]中的应用见图2。

2.2 机械设备风险防控的智能化技术

机械智能化技术通过集成智能传感、远程操控、实时监测及数据分析等先进手段(见图3),有效降低了矿山机械设备的安全风险,并提升了安全管控水平。针对设备老化与维护滞后,智能化系统借助传感器实时采集设备运行数据,结合预测性维护算法提前识别潜在故障^[17],减少突发停机与事故风险。燃油泄漏与电气线路隐患方面,智能监控技术可实时监测油压异常或绝缘性能下降,触发自动断电或隔离措施^[18]。对于操作不规范问题,自动驾驶运输设备^[19]和

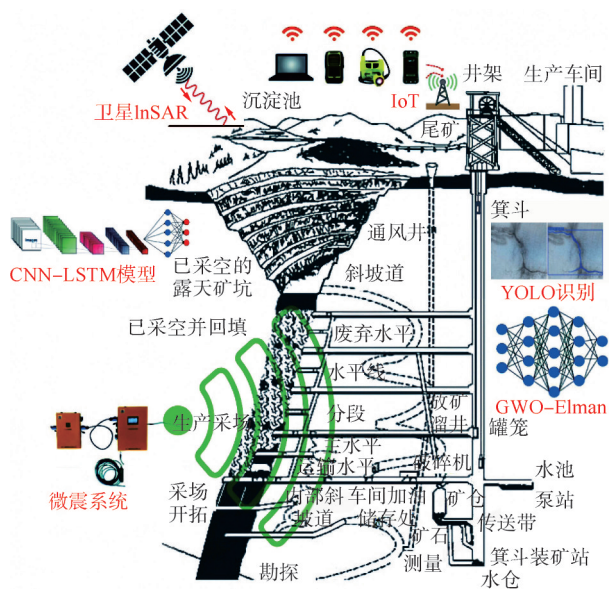


图2 智能化技术在矿山地质安全风险中的应用

Fig. 2 Application of intelligent technology to the prevention of safety risks in mine geology

远程操控技术^[20]减少了人员直接接触高危环境的机会,同时标准化操作程序通过智能系统强制执行,规避超载、违规改装等行为。此外,智能化管理系统整合多灾源风险评估体系、实时监测和预警、多灾源风险管控策略、跨领域协同合作机制和相关政策法规的协同配套,实现全流程动态监管,为制订防灾减灾措施优化资源配置、提高应急响应能力^[21-22]。

2.3 火灾爆炸风险防控的智能化技术

2.3.1 火灾风险智能化防控

火灾风险智能化技术通过多维度的实时监测、精准预警与自动化响应,有效应对矿山火灾安全风险隐患。针对可燃气体与粉尘爆炸风险,智能预警系统分布式光纤测温与光谱束管监测技术^[23]实时追踪井下温度、气体浓度及粉尘分布,通过数据关联分析提前识别异常,实现矿井火灾智能分级预警^[24]。对于设备故障与电气火源隐患,智能监控技术集成传感器实时监测设备温度、油压及线路绝缘状态,一旦发现异常,

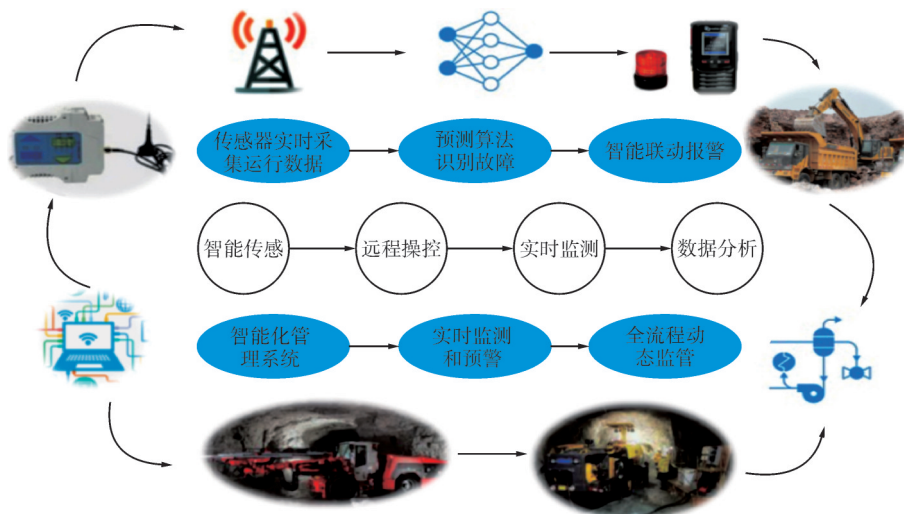


图3 机械设备风险防控智能化技术

Fig. 3 Intelligent risk prevention and control technology for mechanical equipment

如柴油机燃油泄漏或电路过热,立即启动断电或隔离措施,并通过联动喷淋装置快速控制初期火情,避免火势蔓延。火险避灾应急响应方面,避灾路径规划系统^[25]基于 Dijkstra 算法动态生成最优逃生路线,引导人员撤离;同时,基于“监测-预警-防火-应急-管理”架构智能防火平台^[26],以智能预测预警、灾情响应、联动控制和智慧管理决策为手段,为火灾防控智能化建设提供防控架构。而多灾源协同管控框架^[27]将火灾风险与其他灾害联动分析,实时动态监测矿井生产状态,生成矿井即时三维仿真示意图,预测灾害危险程度、发生地点及波及范围。

2.3.2 爆炸风险智能化防控

金属矿山爆炸风险以硫化矿尘爆炸导致的金属矿山热动力内因灾害为主^[28]。通过 Factsage 数值模

拟硫化矿尘爆炸反应机理,建立专门用于金属硫化矿尘爆炸的缩核-挥发分爆炸反应过程机理模型^[29]。结合试验研究确定爆炸特性参数,运用风险矩阵对爆炸严重程度和敏感性分级,建立危险性评估二维矩阵模型^[30]及硫化矿尘爆炸压力和爆炸压力峰值预测模型^[31]。此外,硫化矿尘的实时监测是防止爆炸危险形成的有效措施,基于光纤光栅和光纤准直器的新型测量技术具备无电检测 and 本质安全优势^[32]。硫化矿尘爆炸机理、评价与预测模型及实时监测技术的协同发展,为矿山安全风险防控提供了理论支撑与技术保障。

2.3.3 通风智能化技术

智能通风“一通三防”管理平台基于巷道优化、装备升级与智能算法构建,实现数据共享与动态决策^[33]。进一步融合大数据、云计算和 AI 技术,通风网

络可视化系统支持在线异常诊断与三维动态分析,提升了通风系统的透明化管控能力^[34-37]。在设备智能化方面,设计风机实时监测与变频调风系统^[38],并进一步提出防冻风门和不停风倒机技术^[39],显著缩短倒机时间,降低停风风险。通过优化通风网络布局与智能调控策略,降低能耗并提升安全性^[40-41],应用低功耗变频技术,故障率降低 91.25 % 和能耗减少

18.7 %^[42]。当前研究依托物联网、分布式架构与多源数据融合^[43],推动通风系统从单一控制向“感知-分析-决策-执行”全链条智能化转型,但仍需突破复杂地质适应性、模型自优化等瓶颈,未来需深化 AI 与边缘计算技术的融合应用,构建标准化、自适应的一体化智能通风体系。矿井通风安全智能防控系统架构见图4。

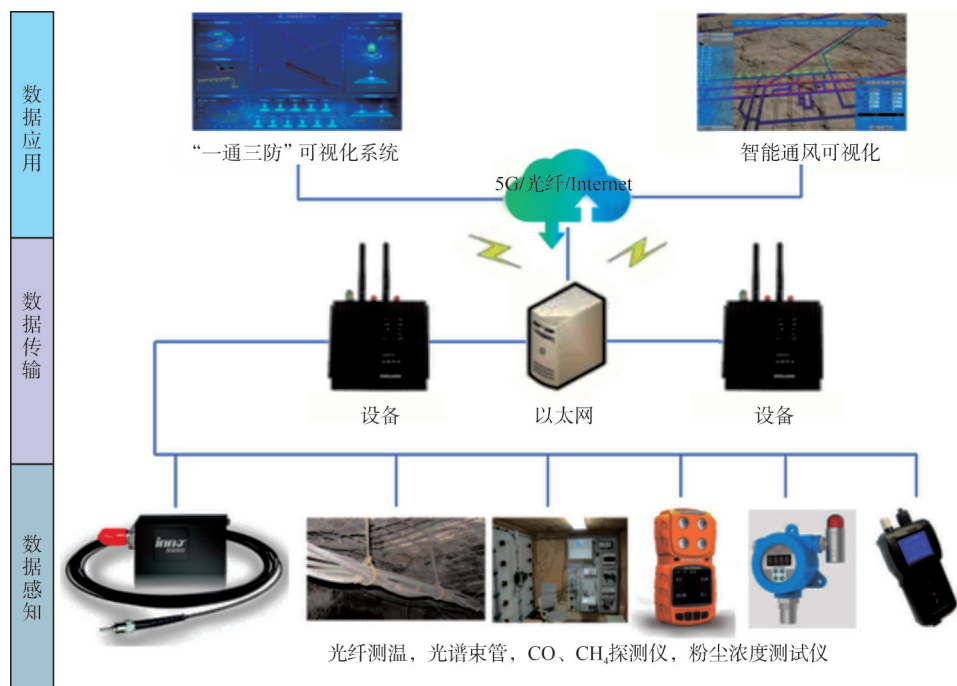


图4 矿井通风安全智能防控系统架构

Fig. 4 Intelligent prevention and control system framework for mine ventilation safety

3 金属矿山安全智能化发展展望

3.1 面临的挑战

1) 关键技术瓶颈与设备智能化水平。目前,在露天开采无人化、深部智能化开采等核心技术仍有较大上升空间。例如:凿岩台车定位精度不足导致超挖问题,深井开采中岩体力学行为与灾害防控技术尚未完全突破。部分矿山机械仍依赖进口,国产设备在可靠性、自适应控制等方面存在不足。地下矿山的智能铲运机、钻爆设备覆盖率低,难以实现全流程无人化。

2) 数据整合与标准化难题。信息孤岛现象普遍存在,不同系统数据格式不统一,难以实现多源数据融合。智能监测系统因数据接口不兼容导致预警延迟。金属矿山智能化缺乏统一的建设标准与评价体系,部分企业盲目投入导致资源浪费。

3) 深部开采与复杂环境适应性。深部灾害防控仍面临难题,深井开采面临高地压、高温、高湿环境,现有智能通风与降温技术难以满足需求,深部采动地压的实时监测与调控仍是技术难点。极端地质条件限制下硬岩地层智能化掘进技术在复杂地质条件中

稳定性不足。

3.2 发展趋势

1) 核心技术的自主创新与装备升级。重点研发深部岩体力学模型、高精度导航定位(如5G+北斗)、智能凿岩装备,攻克“深部厚大矿体超大规模连续开采”等关键技术。推广无人驾驶矿卡、遥控铲装设备、智能钻爆系统,实现“采-运-选”全链条自动化。

2) 数据驱动的协同管控与标准化建设。通过物联网、边缘计算与AI算法整合多源数据,实现通风、设备等系统的联动控制。制定智能化矿山建设指南、数据接口标准及安全评估规范。

3) 深部与极端环境适应性技术。研发多级动态通风系统与直冷降温技术,应对深部高温。基于多灾源耦合模型,构建闭环应急响应体系。通过国家专项支持智能矿山示范项目,推动技术落地。加强高校、科研院所与企业合作,建立智能化技术孵化平台。

4 结语

金属矿山安全智能化是应对深部开采、复杂地质条件及多灾源耦合风险的重要发展方向。本文系统

梳理了当前金属矿山安全风险的关键问题及智能化技术的应用现状。指出地质条件复杂性、设备安全隐患与火灾爆炸风险仍是制约矿山安全生产的核心因素,而智能化技术通过多维度感知、动态预警与智能决策显著提升了风险防控能力。AI驱动的多源数据融合模型(如BiLSTM、EEMD-CNN-LSTM)实现了地质灾害精准预测;设备智能运维体系通过预测性维护与远程操控降低了机械故障率;分布式监测网络与多灾源协同预警平台构建了火灾爆炸闭环防控体系。然而,金属矿山智能化仍面临关键技术瓶颈(如部分高精度装备依赖进口、深部岩体力学模型不完善)、数据孤岛现象突出及深部极端环境适应性差等挑战。

未来,金属矿山安全智能化发展需聚焦以下方向:一是突破核心技术自主创新,重点研发深部岩体力学-开采耦合模型、高精度导航定位(5G+北斗)及智能装备国产化,实现“采-运-选”全流程无人化;二是推动数据标准化与协同管控,依托边缘计算与物联网构建多系统联动平台,消除信息孤岛;三是强化深部环境适应性技术研发,发展智能通风-降温集成系统与多灾源耦合预警模型,提升高地压、高温环境的实时调控能力。此外,需加强跨学科融合与政策支持,通过示范工程推动技术落地,构建“感知-分析-决策-执行”一体化的智能安全生态,最终实现金属矿山安全治理从被动应对向主动防控的本质转变。

[参 考 文 献]

- [1] 黄丹,史秀志,王斌,等.地下矿山安全监管与控制的IoT技术及其在凡口铅锌矿的应用[J].安全与环境学报,2013,13(4):164-168.
- [2] 张坤锋,梁芳.SBAS-InSAR技术支持下的矿山地表形变监测研究[J].流体测量与控制,2024,5(4):15-18.
- [3] 何玉龙,王栋毅,李海龙.BMS微震监测系统深部岩体稳定性监测中的应用[J].黄金,2024,45(4):5-8,17.
- [4] WANG J Q, PRABHAT B, SHAKIL M. Review of machine learning and deep learning application in mine microseismic event classification [J]. Mining of Mineral Deposits, 2021, 15(1): 19-26.
- [5] 牟延波,江科,吴伟强,等.基于BiLSTM模型的边坡形变预测方法[J].采矿技术,2024,24(3):202-207.
- [6] 刘航源,陈伟涛,李远耀,等.基于EEMD-CNN-LSTM的新型综合模型在滑坡位移预测中的应用[J].地质力学学报,2024,30(4):633-646.
- [7] 杨铁男,胡建华,周坦,等.基于改进DCNN法的微震信号自动识别模型及应用[J].黄金科学技术,2023,31(5):794-802.
- [8] TAO Y B, CHEN Q S, XIAO C C, et al. Artificial intelligence models for predicting ground vibrations in deep underground mines to ensure the safety of their surroundings [J]. Applied Sciences, 2024, 14(11): 4771.
- [9] 杨星雨,王宁.基于SCA-GBDT的边坡稳定性预测混合模型[J].黄金,2025,46(3):59-65.
- [10] VINAY L S, BHATTACHARJEE R M, GHOSH N, et al. Machine learning approach for the prediction of mining-induced stress in underground mines to mitigate ground control disasters and accidents [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2023, 9(1): 159.
- [11] 张荣遨.基于GWO-Elman神经网络底板突水预测研究[D].青岛:山东科技大学,2020.
- [12] 董东林,陈昱吟,倪林根,等.基于WOA-ELM算法的矿井突水水源快速判别模型[J].煤炭学报,2021,46(3):984-993.
- [13] 杜沅泽.矿井水害应急疏散优化方法及系统研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2021.
- [14] 李炜,刘耕,葛云峰,等.基于深度学习的钻孔图像岩体结构面识别[J].应用基础与工程科学学报,2024,32(3):702-720.
- [15] 周家兴.基于深度学习的深部复杂地应力场反演算法研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(4):1040.
- [16] HAMRIN H. Guide to underground mining: Methods and applications [M]. Nacka: Atlas Copco, 1980.
- [17] 李涛,孙琰,侯建硕,等.人工智能在矿山设备预测性维护中的应用研究[J].黄金,2025,46(1):1-5,19.
- [18] 薛维兵,张瑞.矿山机电系统中智能控制技术的应用研究[J].科技资讯,2024,22(10):69-71.
- [19] 孙庆宏,姚刚,郎曼廷.矿山智能化技术在机械工程自动化中的应用研究[J].世界有色金属,2024(20):35-37.
- [20] 孙延波,孙琳琳.黄金矿山机械智能化发展趋势研究[J].冶金与材料,2025,45(2):16-18.
- [21] 吴孟龙.非煤地下矿山多灾源致灾演化机理及风险协同管控研究[D].武汉:武汉科技大学,2024.
- [22] FLORES-CASTAÑEDA R O, OLAYA-COTERA S, LÓPEZ-PORRAS M, et al. Technological advances and trends in the mining industry: A systematic review [J]. Mineral Economics, 2024, 38(2): 1-16.
- [23] 李东发,臧燕杰,师吉林.矿井火灾智能预警系统[J].工矿自动化,2022,48(增刊1):112-115,120.
- [24] CACCIUTTOLO C, GUZMÁN V, CATRIÑIR P, et al. Low-cost sensors technologies for monitoring sustainability and safety issues in mining activities: Advances, gaps, and future directions in the digitalization for smart mining [J]. Sensors, 2023, 23(15): 6846.
- [25] 左阳.煤矿避灾线路智能化探索[J].煤炭技术,2019,38(8):119-120.
- [26] 谭波,朱红青,王海燕.矿井火灾智能防控架构与关键技术思考[J].安全,2022,43(4):1-7,9,89.
- [27] 刘彦武.基于智能通风的火灾和瓦斯突出灾变管控系统探讨[J].山西焦煤科技,2021,45(8):47-52.
- [28] 高懿伟,郭志国,张俊,等.我国金属矿山热动力灾害防治技术研究现状与展望[J].金属矿山,2022(12):196-204.
- [29] 田长顺,饶运章,许威,等.金属硫化矿尘爆炸反应过程机理分析[J].有色金属科学与工程,2020,11(6):78-84.
- [30] 苏港,饶运章,田长顺,等.基于爆炸参数的硫化矿尘云爆炸风险评估[J].有色金属科学与工程,2023,14(1):118-124.
- [31] 徐圆圆,李孜军,徐宇,等.基于氧化还原分析的硫化矿尘爆炸压力预测[J].中国安全生产科学技术,2022,18(7):122-127.
- [32] 丁云峰,郭永兴,陈先锋,等.粉尘质量浓度的光纤光栅传感测量技术[J].爆炸与冲击,2019,39(1):86-91.
- [33] 安学东,马腾,王光明,等.伊新煤业矿井智能通风关键技术研究[J].陕西煤炭,2025,44(4):148-154.
- [34] 陈生凯,明平田,申宁.青海某金矿安全监管视频AI智能系统

建设[J].黄金,2025,46(1):20-23.

[35] 马翔宇.煤矿智能通风系统建设研究[J].西部探矿工程,2025,37(1):85-87.

[36] 钱国栋,张学超,李瑁.白坪煤矿智能化通风系统改造及应用[J].矿山机械,2024,52(11):59-64.

[37] 何文华.煤矿井下智能通风系统构建研究[J].矿业装备,2024(9):191-193.

[38] 宋龙龙.矿用智能化通风控制系统的设计及应用研究[J].西部探矿工程,2024,36(11):174-176.

[39] 寇子明,高贵军,薛羽宁,等.矿井智能通风系统关键技术及其应用研究[J].煤炭工程,2024,56(10):71-81.

[40] 岳建红.煤矿通风系统优化与节能减排分析[J].中国轮胎资源综合利用,2025(3):95-97.

[41] 孟丹.煤矿井下通风设备的节能与智能化控制技术研究[J].矿业装备,2024(10):146-148.

[42] 杨磊.智能通风建设技术在综采工作面应用探究[J].煤矿现代化,2024,33(5):154-158.

[43] 王一飞.矿井智能通风系统的设计及应用[J].自动化应用,2024,65(14):7-10.

Current status and prospects of intelligent and safe development in metal mines

Wang Xinyang^{1,2}, Wei Pengpeng^{1,2}, Cui Tiejun^{1,2}

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang Ligong University;

2. Liaoning Institute of Modern Safety Engineering Industry, Shenyang Ligong University)

Abstract: The intelligent mine represents a new direction in the integration of traditional mining with cutting-edge technologies, aiming to establish a full-chain digitalized system driven by the core technology of artificial intelligence and machine learning. In China, the green construction of metal mines is advancing in coordination with intelligent technologies. However, the safety of mining operations still faces severe challenges due to the coupling of multiple risk factors. This paper reviews the research progress on intelligent safety in metal mines, focusing on 3 major aspects: complex geological conditions, equipment-related safety risks, and potential risks of multi-hazard sources. It discusses the current state of safety in metal mining and the specific applications of intelligent technologies in addressing key risk factors. Moreover, the paper identifies the major challenges faced by intelligent mining, including technical bottlenecks and equipment intelligence levels, difficulties in data integration and standardization, and poor adaptability to deep mining and complex environments. In response, the study prospects the development of intelligent and safe technologies in metal mines, focusing on independent innovation in core technologies and equipment upgrades, data-driven collaborative control and standardization, and enhanced adaptability to extreme conditions in deep mining.

Keywords: metal mine; intelligentization; safety risk; accident and disaster; mechanical injury; fire and explosion