铜坑矿业关键工序时空协同多装备无人作业系统开发与应用*

张永玺[1,2],郭伟[1],王雷[3],黄立[1],周科平[1,2],杨承业[2],吴乐文[3],成锡良[1]

(1.湖南斯福迈智能科技有限责任公司, 湖南 长沙 410083;
2.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083;
3.广西华锡有色金属股份有限公司, 广西 南宁 530201)

摘要:针对我国地下金属矿山资源中小型矿山多、矿体复杂、安全管控难的问题,提出了一套智能化开采系统解决方案。以铜坑矿复杂破碎矿体为背景,采用分段空场嗣后充填工艺,构建了基于"时空协同"理念的智能化系统。该系统通过全域无线定位网络,实现了凿岩、装药、铲运等关键工序的无人化、少人化作业和多装备跨时空协同调度,创新性地将矿石流与装备流深度融合。在铜坑矿的实际应用中,系统稳定运行一年,建成了3套标准化智能采矿工艺、1套多工序多装备协同支撑系统,1套完整智能装备链和1套调度平台等,安全释放隐患区资源,累计完成穿孔超4 000 m、出矿8万t,显著提升了作业效率和安全性。研究成果为复杂矿体智能化开采提供了可复制的技术路径,对推动矿山无人化作业和装备智能化提供了参考。

关键词:地下金属矿山;无人少人化作业;装备智能化;智能矿山;时空协同

中图分类号:TD853;TD67 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0015-12

Development and Application of Unmanned Operation System of Multi-Equipment for Tongkeng Mine Based on Spatio-Temporal Coordination of Key Processes

ZHANG Yongxi[1,2], *GUO Wei*[1], *WANG Lei*[3], *HUANG Li*[1], *ZHOU Keping*[1,2], *YANG Chengye*[2], *WU Lewen*[3], *CHENG Xiliang*[1]

(1.Hunan SFM Intelligent Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410083, China;
2.School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
3.Guangxi Huaxi Nonferrous Metals Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530201, China)

Abstract: A set of intelligent mining system solutions has been proposed to address the problems of numerous small and medium-sized mines, complex ore bodies, and difficult safety control in China's underground metal mining resources. Taking the complex and fragmented ore body of Tongkeng Mine as the research background, an intelligent system based on the concept of "spatio-temporal coordination" was constructed based on segmented airfield subsequent filling method. In this system, a global wireless positioning network was adopted to achieve unmanned and less-manned operations for key processes such as rock drilling, loading, and shovel transportation, as well as cross temporal and spatial collaborative scheduling of multi-equipment. Ore flow and equipment flow were innovatively integrated in depth. In the practical application of Tongkeng Mine, the system has run stably for one year, and has built three sets of standardized intelligent mining processes, one set of multi process and multi equipment collaborative support system, one complete intelligent equipment chain, and one scheduling platform. It has safely released resources in hidden danger areas, completed over 4 000 meters of perforation, and extracted 80 000 tons of ore, significantly improving operational efficiency and safety. The research results can provide a replicable technological path for intelligent mining of complex ore bodies, and provide a reference for promoting unmanned mining operations and intelligent equipment in mines.

Key words: Underground metal mine, Unmanned and less-manned operation, Equipment intelligence, Intelligent Mining, Spatio-temporal coordination

---

* **收稿日期**:2024-12-29
基金项目:广西重点研发计划项目(2023AB01130);湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2020GK2087)
作者简介:张永玺(1985—),男,山东淄博人,博士,高级工程师,主要从事智能矿山技术研究。E-mail:zhangyongxi@2008.sina.com
通信作者:周科平(1964—),男,湖南长沙人,博士,教授,长期从事深部金属矿山连续采矿技术与装备研究。E-mail:asdkook@126.com

0 引言

近年来,无人化、少人化开采已成为地下金属矿山转型升级的核心方向[1-2]。随着我国地下金属矿山资源开采逐步向深部延伸,矿体赋存条件日趋复杂,有价难采资源的综合利用和高效回收已成为保障资源安全的关键课题。采用装备智能化技术和安全高效的采矿工艺及组织有效的生产管理,是推动矿山企业实现生产业态升级,释放复杂难采资源开发潜力的重要途径和手段[3-5]。

近年来,智能采矿装备与调度系统技术取得了显著进展。例如,张永玺等[6]在紫金山金铜矿部署多装备协同系统,实现了凿岩、装药、铲运等工序的智能联动与任务分配,显著提升了装备利用率与安全响应能力。张元清等[7]研究了基于智能减阻策略的地下 LHD 自动铲装控制方法,有效解决了碎石堆料自动识别与自适应路径修正问题。戴春雷[8]探讨了我国矿山智能化研究的进展及大模型的应用前景,指出矿山大模型的研究需要关注数据积累、理论研究、现场应用和安全监管等多方面的合作。在工艺优化方面,王薪荣等[9]围绕分段空场嗣后充填采矿工艺,系统分析了采场结构参数、采准切割工艺、凿岩爆破技术和充填等采矿工艺技术,提出采矿设备大型化、自动化、高效化,采矿技术数字化、智能化的绿色矿山已经成为新一代矿山发展的方向。此外,在安全调度与数据互联领域,汪爽等[10]采用 UWB 定位技术,开展了新型井下人员定位系统的总体方案设计及关键模块研究,并在成庄煤矿进行应用测试,显著提高了定位系统的准确性及智能化程度。

华锡集团公司下属铜坑矿 92# 矿体经过多年开采,已形成大量的房间矿柱和破碎盘区矿柱组成的矿柱群,总计矿量超过 1 000 万 t,并伴随较大规模的采空区。随着开采深度增加,盘区间柱资源的回采矿石量在矿山总年产量中的占比逐年提高,矿山也形成了自上而下多中段同时回采的复杂开采局面[11]。然而,受采空区地压和上覆岩层冒落等影响,盘区间柱的工程地质条件复杂,地压显现明显,存在间柱回采率低、采矿成本高、安全风险大等挑战[12-15]。因此,如何实现铜坑矿 92# 矿体矿柱资源的安全回采,是铜坑矿亟需解决的关键技术难题。

本文以铜坑矿业 92# 矿体为工程背景,针对盘区间柱资源智能化安全高效开采需求,“关键工序时空协同”理念开展多装备无人作业系统开发与示范研究。结合分段空场嗣后充填工艺,通过合理配置关键工序装备、补齐专用智能化装备、全面升级工序装备无人化、少人化作业能力等方案,实现了工艺与装备链能力紧密配合,构建具备全域定位、红区联动、安全调度、数据融合能力的系统化平台,实现了凿岩、装药、铲运、破碎全流程工序无人少人时空协同作业应用。本研究不仅解决了复杂破碎矿体无人少人开采的难题,还提前释放了铜坑矿业产能,实现了有价资源安全、绿色、高效开采,探索了一条行之有效的技术路线[16-20]。

1 破碎矿体规模化安全开采工艺

针对铜坑矿 92# 矿体以矿柱群为主的开采特点,本文在分段空场嗣后充填法的基础上进行工艺创新,建立了采矿-装备深度协同的开采体系。具体实施路径包括以下 4 个方面。

(1) 采场优化设计。基于隐患资源赋存特征,通过数值模拟与工程验证,确定了合理的采场结构参数、回采顺序及采准工程布置方案。

(2) 安全控制技术。集成应用多源信息地压监测、智能预警及气囊挡墙支护等技术,构建了矿柱回采全过程安全防控体系。

(3) 智能装备协同。采用 SFMY50 智能凿岩台车(视距遥控/远程操作)、遥控装药台车、无人驾驶铲运机(4 m^3)及固定式破碎锤等装备,实现了凿岩—装药—出矿—破碎全流程远程作业。

(4) 作业环境标准化。通过采场结构、巷道断面及运输路线的标准化设计,优化爆破方案,为智能化装备提供了高效作业环境。

该体系既保持了原分段空场法的技术优势,又通过工艺-装备协同创新,解决了破碎矿体规模化安全回采的技术难题。

1.1 分段空场嗣后充填法

针对铜坑矿智能开采需求,结合深井矿山绿色智能化开采路径,采用分段充填智能开采方案,实现凿岩、出矿无人化,装药爆破等少人化作业环境[21]。分段充填采矿方法见图 1。智能开采主要工艺参数如下:

(1) 每个采场宽度约为 6.0 m,高度为 3.5 m,单段退让长度为 15 m;

(2) 主运输巷道净宽约 2.8 m,可满足智能装备单轨或双轨通过的需求;

(3) 平均出矿效率达 53.7 t/h,凿岩推进效率约为 4.0 m/h;

(4) 延时爆破采用毫秒级时差(典型为 50~250 ms),提升爆破成形质量;

(5) 采空区充填强度设计满足后续作业设备通过的稳定性要求。

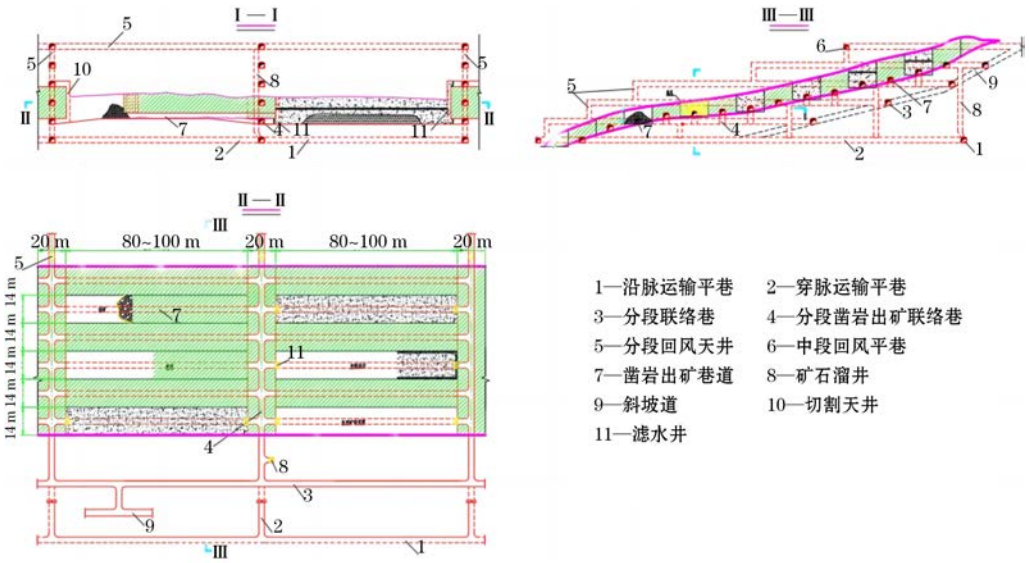


图 1 分段空场嗣后充填法

Fig.1 Sublevel open stoping with subsequent filling method

该工艺通过后退式回采,将凿岩、装药、出矿工序时间有效延长,最大程度地实现单工序连续作业,有效缩短了工序更迭时间,为多采场协同作业争取了循环时间,保障了智能装备连续高效作业。

1.1.1 凿岩

针对铜坑矿业现有巷道条件,规范化升级巷道建设标准,定制开发履带式 SFMY50 全液压智能凿岩台车,实现了无人化凿岩。配套开发远程遥控与自主作业功能。台车支持自动导航、寻孔、定位和钻孔,结合智能化爆破设计软件,可一键操作并自动调整凿岩参数及防卡钎,全面实现凿岩作业的高效无人化。

凿岩设计分段高度为 15 m,平均采场跨度为 10 m,凿岩巷道尺寸为 4.0 m×3.8 m。采用钻杆直径为 76 mm,炮孔直径为 80 mm,钻凿上向扇形中深孔,孔深 3.0～12.3 m,孔底距为 1.5～2.2 m,排距为 2.0 m,以切割槽为补偿空间爆破,侧向崩矿,后退式回采。布孔方案见图 2。

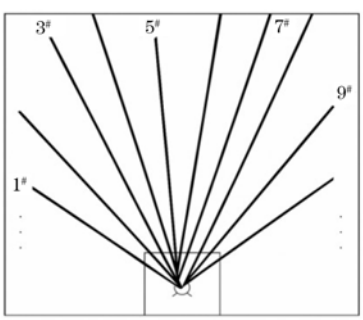


图 2 布孔方案

Fig.2 Hole layout plan

1.1.2 装药爆破

引进 BCJRJ 型装药台车,根据凿岩设计和凿岩成孔数据共享,通过对该装备进行厂内智能化配套,加装远程遥控模块,使其可一键或分段装药,实时显示并自动控制装药参数,实现隐患区装药的自动化、少人化。操作人员远离采场作业,在装药过程中同时向孔内装入数码雷管起爆药包,待装药完成后进行孔口堵塞,通过起爆线和数码雷管进行爆破作业。

1.1.3 出矿

结合铜坑矿现有装备配置情况和巷道运输能力,采用基于 FL10 铲运机升级改造的遥控铲运机出矿,通过远程遥控实现采场铲装作业无人化。矿石经出矿进路、出矿巷卸至采区溜井,只需在采场铲装和溜井卸矿环节进行远程遥控,保障作业效率。

1.1.4 通风

新鲜风流由东副井和斜坡道到分段联络巷,经分段凿岩出矿联络道、凿岩出矿巷道进入采场,冲洗工作面后,污风由采场空区上方充填回风巷道,经回风天井进入上中段回风巷,由回风井排出地表。在粉尘浓度较大的出矿点及通风状况不佳的地段可添加局扇辅助通风。

1.1.5 充填

采用全尾砂胶结充填,将通往采空区的各通道口用密闭墙封闭,然后,从采场上部架设充填管路,向采空区充填,一步采场采用灰砂比为 1∶4 的尾砂

胶结充填,二步采场采用灰砂比为 1∶10 的尾砂胶结充填,若分段上方仍有回采作业,二步采场用灰砂比为 1∶4 的砂浆做浇面处理,以保证上分段凿岩出矿作业。

2 基于采矿工艺的关键工序装备链配置

结合工艺要求和关键工艺参数,对实现铜坑矿破损盘区矿柱和隐患资源安全有序开采的关键工序装备进行了工作能力配套选型和基于无人、少人应用目标的定向升级与开发,最大程度地满足复杂破碎矿体回采过程中的无人、少人安全要求,减少生产作业人员在危险环境下的暴露时间,同时实现工序能力有效衔接,为多装备协同安全智能开采奠定数据交互基础,确保多装备多工序空间时间协同连续高效。

2.1 凿岩装备能力与智能化配置

凿岩作业是实现高效回采的关键工序环节,根据本文场景采矿设计要求,合理选择凿岩穿孔装备,有效配置凿岩装备自动化水平,是本系统装备链系统能力配置的重要内容。基于此,本系统通过能力匹配和优化选型,自主研发了具备远程遥控能力和自动作业能力的智能化小型采矿台车 SFMY50。

该装备具有采矿设计要求的单中心/多中心扇形孔穿孔能力,现场无人条件下的自动作业能力,以及快速接入多装备协同平台、高带宽多通道数据传输能力和作业数据实时反馈能力,可支持关键凿岩装备过程参数和凿岩作业过程数据的交互反馈,自动化作业程度高、作业效率和可靠性高。凿岩装备关键能力配置见表 1。

表 1 凿岩装备关键能力配置

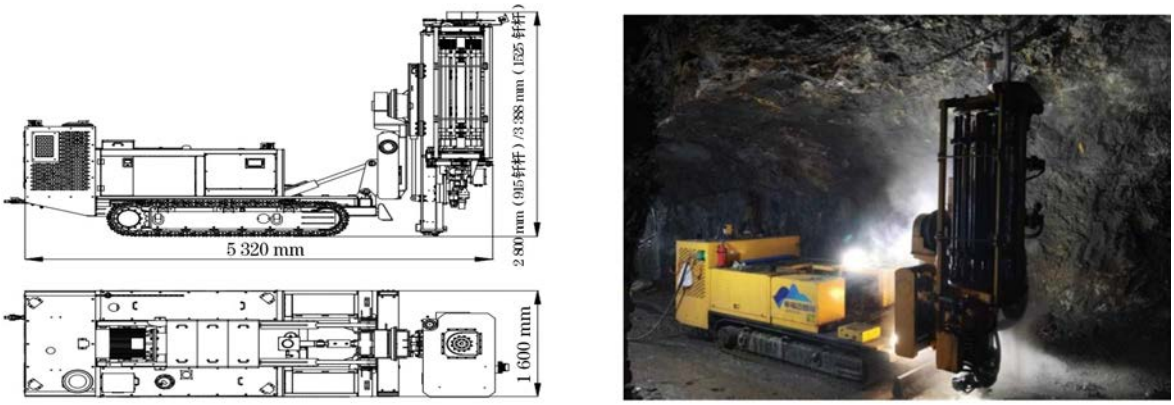
Table 1 Key capability configuration of rock drilling equipment

参数类型	配置名称	参数/能力	备注说明
钻孔参数	钻孔直径	64～90 mm	根据爆破设计选配
	钻孔深度	0～25 m	钻深控制精度 1 mm 连续存储
	钻杆库	15+1 根	可选配
	钻杆长度	800～1 525 mm	可选配
推进参数	推进力	0～15 000 N	连续可调
	最大推进速度	390 mm/s	自适应匹配
凿岩参数	冲击功率	18 kW	连续可调
行走参数	最大牵引力	80 kN	连续可调
	行走方式	履带,液压马达驱动	连续可调
	最小拐弯半径	原地转向	连续可调
整机参数	控制方式	电液比例控制	全电附负载反馈
	长×宽×高	4 510 mm×1 600 mm×2 134 mm	最大全配置模式
	电动/柴动功率	55/36.8 kW	柴动行走电动作业
	最小工作断面	2.8 m×2.8 m	最大全配置模式
自动化配置	布孔精度	±10 mm/0.1°	远程遥控与自动布孔
	自动钻进	＜40 s/m	岩石硬度 f=10～16
	自动接卸杆	＜30 s/次	全自动接卸杆
	钻进参数数字化	视频与作业数据分录传输	中央服务器切片存储
	整机数字化	全状态采集	全作业过程数字化

该装备除具备表 1 中所列基本智能化功能外,还具备作业数据开放和与本系统多装备交互共平台的特点,可实时与本系统的其他工序装备、安全管控系统调度交互,确保凿岩作业安全、高效,并为后续工序提供真实有效的成孔参数信息。SFMY50 凿岩台车装备如图 3 所示。

2.2 装药台车能力与智能化协同

装药作业是矿山开采过程中衔接凿岩与爆破的重要环节,其作业效率与安全性直接影响爆破效果及后续运输作业的顺畅性。本系统在凿岩装备智能化配置的基础上,引入了具备无线遥控对孔技术的 BCJRJ 装药台车,进一步优化了装备链的整体能力配置。



(a) 外形结构 (b) 运行状态

图 3 SFMY50 掘进台车外观结构与运行状态

Fig.3 Appearance structure and operation status diagram of SFMY50 tunneling jumbo

BCJRJ 装药台车集成压力、温度、断料等多重安全联锁装置,通过 SFM 升级改造远程遥控和比例控制功能,实现一键式装药或分段装药操作,可根据炮孔直径与装药长度智能匹配退管速度,确保炸药装填的耦合性与均匀性。装药台车性能参数见表 2。其自动化配置包括:全自动送管/退管、视频辅助远程遥控寻孔、装药参数数字化、全状态采集的整机数字化。同时,该装药台车具备自动送管与收管能力,可实时监控并调节装药速度与送管长度等参数,装药效率可达 5 t/h,是传统人工装药效率的 4～6 倍。

该装备在装药效率与安全性能方面表现突出,可助力实现精细爆破与爆破设计优化,其高效的装药能力与控制系统作业交互,为本系统多装备协同后续铲运机的快速作业提供了关键支撑。

表 2 装药台车性能参数

Table 2 Performance parameters of charging jumbo

装药速度/(kg/min)	送管速度/(mm/s)	返药率/%	料箱最大装药量/kg	工作压力/MPa	设备外形尺寸(长×宽×高)/mm	自动化配置			
						送管/退管	寻孔	装药参数数字化	整机数字化
25～80	0～500	≤3	2 000	≤2.5	7 200×2 000×2 600	全自动	视频辅助远程遥控	视频与作业数据分录传输	全状态采集

2.3 铲运机智能化能力与协同优化

铲运作业是爆破后实现高效矿石运输的关键工序。合理选择铲运装备并有效配置其智能化水平,是本系统装备链能力配置的重要内容。根据本系统对铲运装备主要参数(见表 3)和铲运作业过程数据交互反馈的要求,结合能力匹配与技术优化,升级改造了 FL10 铲运机,通过智能化实现采场铲装作业无人化。整车控制系统采用 CAN-bus 总线通信技术,电液比例先导控制和变量液压系统、Fet 电子技师、视距遥控系统、车载显示屏等,并具有故障提示报警和自诊断功能。

该铲运机经过系统性升级改造,集成了多层级智能安全监测手段,包括门禁侵入感知、激光远距离扫描、定位与人机防碰撞系统、毫米波巷道距离检测以及视频监控辅助驾驶等。通过这些技术,铲运机实现了远程遥控及无人驾驶功能。装备搭载了 SFM 远程遥控/无人驾驶控制软件,核心技术涵盖基于轮廓模型的铲运机深度融合 SLAM 无人驾驶算法,以及极简 SLAM 路径目标规划算法,确保铲运机能够高效、精准地完成从采场到溜井的自动驾驶任务。

SFM 铲运机无人驾驶系统具备精确定位技术与高效数据交互共平台能力,并实现与装药台车和破碎设备的时空协同。针对本文特殊矿体场景,该装备能够结合矿岩位置与装载需求,自动规划最优行驶路径,有效减少空载行驶时间,提产增效。该系统高度智能化运行模式可提升多工序间的协同衔接效率,同时通过精准的自动化控制,降低因操作失误引发的安全风险,确保运输作业环节的安全与高效。

铲运机出矿作业采用“远程遥控+自动驾驶”融合模式,以提升作业安全性与系统作业连续性。其

作业系统由远程控制台与多屏监控界面构成,具备铲运装备路径控制、任务调度、运行状态实时监控与图像回传等功能。主控台尺寸为 1 200 mm×750 mm,三联高清监视器支持全路径任务执行画面实时展示,系统遥控响应延迟不超过 150 ms,支持手动/自动切换与故障应急接管机制。

为保障铲运作业路径连续与运行稳定,制定了路径控制策略和分段控制策略。图 4 展示了典型矿区路径控制策略:铲运机从出矿点至接矿点的运行路径总长约为 420 m,途中包含 3 段巷道坡段,最大坡度不超过 9%,最小转弯半径约为 4.2 m。系统采用分段控制策略:装矿段与出矿段采用远程遥控操作,中段巷道由自动驾驶系统执行连续运输任务,运行速度稳定在 1.5~2.0 m/s。整体策略可保障无人化铲运作业在狭窄矿区环境下运行稳定、响应灵敏、路径切换平稳。

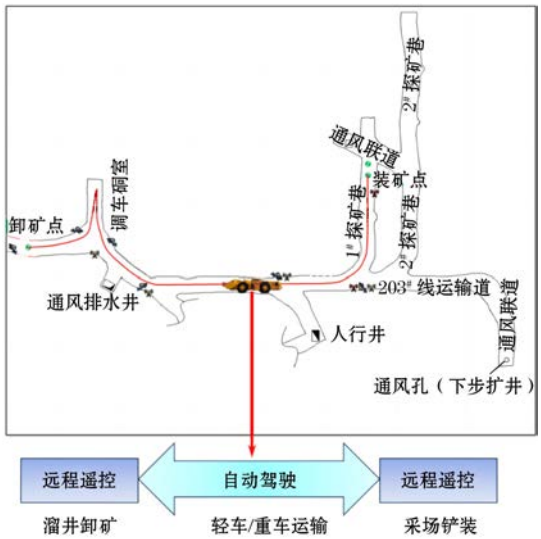


图 4 铲运机遥控出矿路径策略

Fig.4 Remote-controlled ore extraction path strategy of scraper

表 3 铲运机主要参数

Table 3 Main parameters of scraper

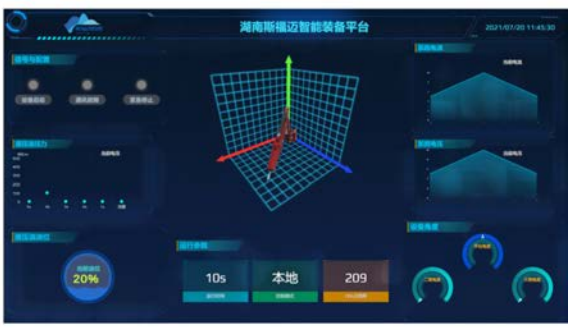
额定载重/kg	满载质量/kg	总长(铲斗平放/铲斗端平)/mm	总宽/mm	总高/mm	标准斗容(SAE 堆装)/m^3	控制配置
10 000	31 200	10 474/9 868	2 650	2 385	5.5	SFM 远程遥控/无人驾驶根据作业可调配

2.4 破碎锤智能化改进与协同保障

本系统对 PSC300 固定式液压破碎锤进行了标准化智能升级(如图 5 所示)。增强其作业环境下的适应性与协同效率。通过新增的远程控制模块,实现液压系统与动力系统的数字化信号对接,同时结合姿态传感器和本地/远程切换功能,设备能够根据作业环境的变化实时调整,展现出更高的响应速度与适应能力。



(a) 破碎锤智能化改进与感知系统



(b) 远程遥控操作界面展示

图 5 破碎锤标准化智能升级

Fig.5 Standardized intelligent upgrade of hydraulic breaker

2.5 辅助通信定位系统

鉴于跨时空多装备数据交互、关联工序装备数据交互与调度、独立作业区有效安全管理是解决铜坑矿破碎盘区柱与隐患压覆资源开采中存在的作业区域隔离、工序时空错位、多装备动态协同难题的重要手段。本文构建了独立的辅助通信定位系统,作为实现跨时空智能调度与数据联动的关键支撑平台。该系统集成了 5G/WiFi 融合通信基站与 UWB 定位模块,在井下生产作业区实现厘米级空间定位与秒级通信响应,确保关键装备与作业人员的高精度实时追踪。系统构建过程包括以下 4 大关键技术。

(1) 融合定位网络架构设计:基于 5G 高带宽、低延时与 WiFi 高覆盖能力优势,融合部署混合型定位基站,通过 RSSI 指纹、TDOA 联合算法实现空间定位补偿。

(2) 红区管控与调度优化:依托定位身份识别与权限管理机制,系统构建了红区作业区域的智能门禁与调度联动体系,实现对高风险作业区域的物理隔离、人员管控与动态调度响应。当系统识别到非授权人员进入、作业冲突或异常行为时,红区门禁设备将自动触发预警并上传至调度平台,系统即时生成响应指令,联动调度系统执行作业中止、路径阻断或设备联锁控制等安全策略。通过动态化权限校验与风险事件联动响应机制,构建了红区作业状态与调度控制的实时闭环,显著提升了井下作业的安全冗余水平与调度决策的时效性与准确性。

(3) 人员-装备-环境数据交互机制:构建多通道数据总线,支持定位数据、视频数据、传感器数据的并行采集与事件触发上传。

(4) 全域音视频监控集成:接入高清视频流平台,实现关键节点作业实时可视化监管与应急响应联动。

如图 6 所示,辅助通信定位系统在实现全流程工序动态感知与跨时空装备联动基础构建方面发挥了核心作用,为多装备安全协同调度提供了关键支撑与技术保障。

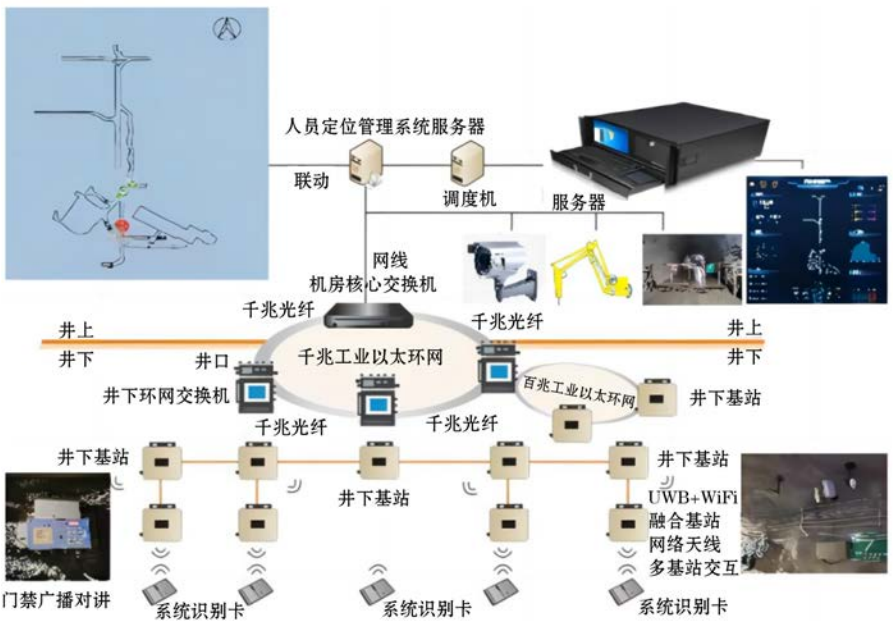


图 6 辅助通信定位系统

Fig.6 Auxiliary communication and positioning system

2.6 数据库系统

针对铜坑矿业复杂作业环境下多源异构信息高速生成、跨区域实时调度和多装备间数据交互频繁等难题,本文设计了一套多源异构融合数据库系统,作为智能化生产调度系统的核心数据支撑中台。

(1) 统一数据接入层。通过多协议采集模块(支持 CANNET、MQTT、TCP/IP 等)实时采集装备运行状态、人员定位、环境参数、安全预警等各类数据。

(2) 分级分类数据存储机制。依据数据时效性与业务紧急性构建热数据(如实时定位、报警信号)、温数据(任务轨迹、作业日志)与冷数据(视频归档、运维记录)分级存储体系(见图 7),提升访问效率与成本效益。

(3) 数据联动通道设计。构建跨工序、跨设备的数据共享通道,采用时序数据库与关系数据库结合方式,实现装备调度指令与反馈信息的实时闭环交互。

(4) 数据安全与溯源机制。引入权限隔离、访问审计、时间戳签名等策略,保障数据的一致性与完整性。

(5) 可视化智能分析平台。在系统上层部署数据中台与 BI 平台,支持设备利用率、作业效率、人员路径、风险事件等多维可视化分析与智能决策辅助。

3 时空协同多装备无人作业系统构建

3.1 系统总体架构(MEC 架构)

结合采矿工艺要求和数据系统关键技术,针对数据孤岛、系统封闭以及信息难以融合的问题,各生产过程及业务流程设计规划均以“矿石流”为主线建设铜坑矿关键工序时空协同多装备共平台设计,打通了“资源储量—采矿—运输—破碎—提升—选矿”整个生产过程各环节的信息壁垒,实现总体生产环节的高效互通互联。基于“矿石流”的系统 MEC 总体架构主要包括边缘应用层、网络及业务能力层、虚拟化层及基础设施层等,系统总体架构如图 7 所示。

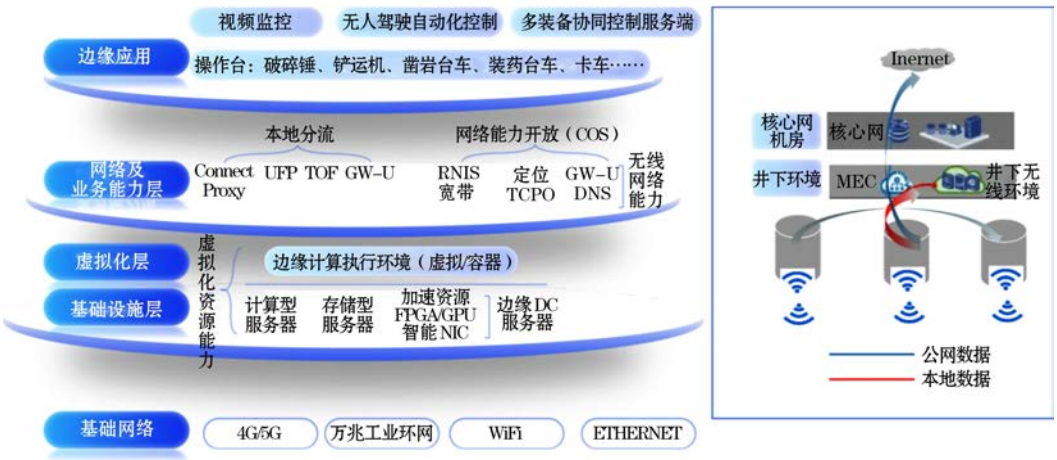


图 7 系统总体架构

Fig.7 System overall architecture

3.2 系统功能架构

本系统功能架构围绕矿山生产“矿石流”主线，采用高度集成设计，紧密结合复杂采矿条件、回采工艺与智能装备协同作业的需求，采用 N-N 多端接入结构设计，通过多装备协同控制技术、井下高精度定位与智能导航技术，实现了地下金属矿的无人化与智能化开采。通过对红区门禁和全域视频监控的部署，基于 WiFi/5G 和 UWB 精确定位的通信定位系统保障，采用远程遥控和无人驾驶等技术，实现铲装、运输、破碎的多工序多装备智能协同调度。借助数据驱动的数字孪生平台，通过实时生产数据驱动，实现多装备生产全系统的智能化管理和综合展示。系统功能架构如图 8 所示。

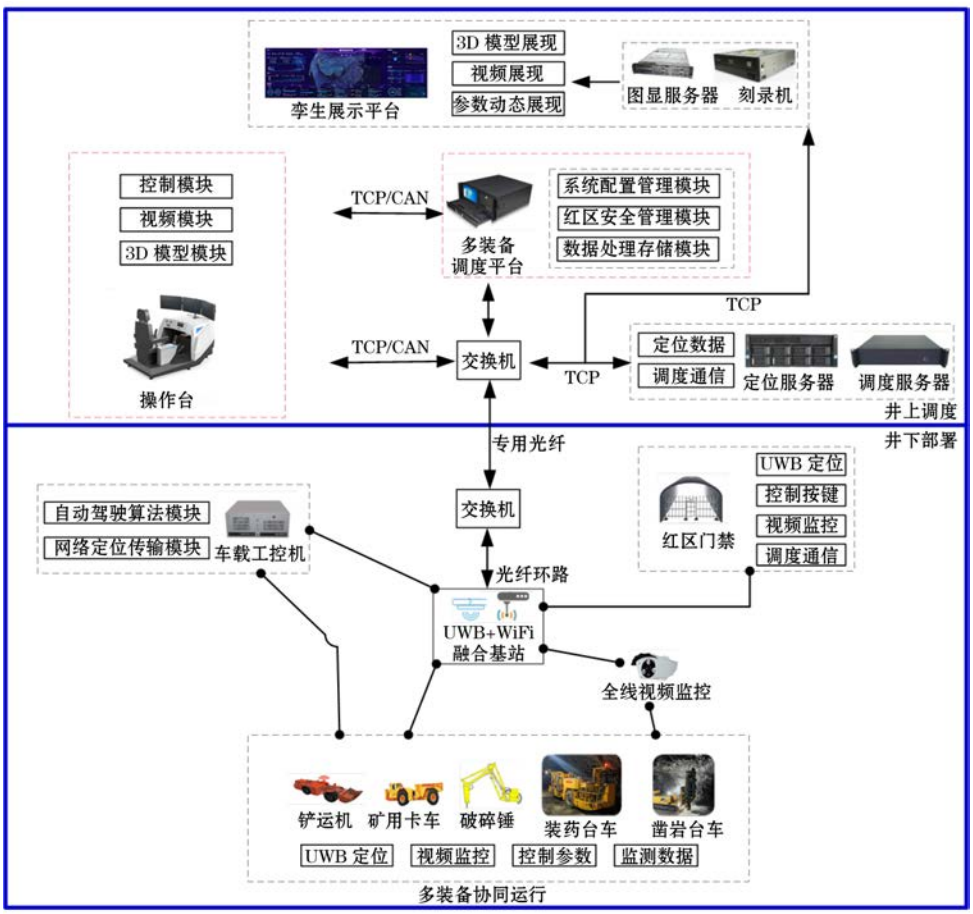


图 8 系统功能架构

Fig.8 System functional architecture

3.3 系统运行管理机制

系统运行管理机制通过集成多装备数据交互、工序间协同调度与安全管理,形成了一套高效、全面的智能化生产框架,提出了独立系统运行管理机制如图9所示,实现了设备与工序数据的实时交互与联动。

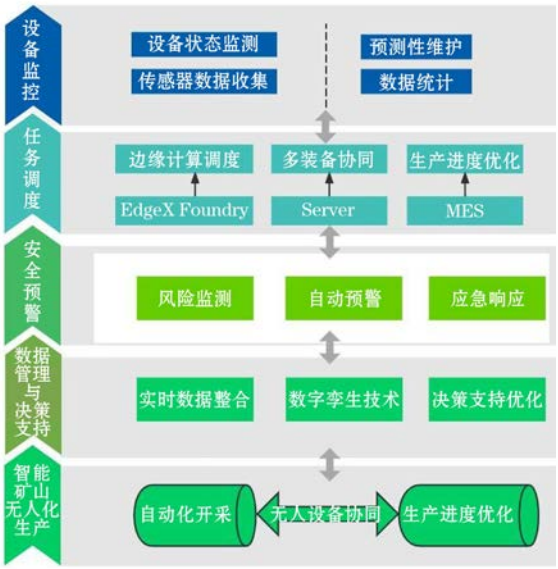


图9 系统运行管理机制

Fig.9 System operation management mechanism

通过全覆盖的通信基站,结合定位技术与数据传输网络,系统可对生产作业区域进行全面监控。配套建设的红区门禁系统、音视频监控和人员装备权限管理模块,保障了作业区域内设备、人员及环境数据的安全交互。同时,利用边缘计算与智能任务调度机制,优化了作业过程和设备运行,提高了生产效率与安全性。安全预警模块通过多源数据融合,及时识别潜在风险并启动应急响应,确保作业人员与设备的安全。数据管理与决策支持系统则整合了实时生产数据与数字孪生技术,为生产优化与资源配置提供精确依据。

3.4 多装备系统接入与工序协同

3.4.1 部署环境

井上部署架构包含以下核心模块:总控室中央指挥系统、操作平台软硬件集成单元、数字孪生可视化平台、主服务器集群系统以及网络通信中枢设备,各子系统通过标准化工业协议实现数据互联,形成分级式智能管控体系,井上部署架构如图10所示。

井下部署环境根据井下开采工艺的实际需求,辅助工序包括风、水、电线缆的敷设,基站的安装,网络通信和定位调试,安全红区管控系统安装以及主要生产工序装备,如远程遥控凿岩工序、远程遥控装药工序、远程遥控/无人驾驶铲运机装/卸矿工序、破碎锤远程遥控工序等。

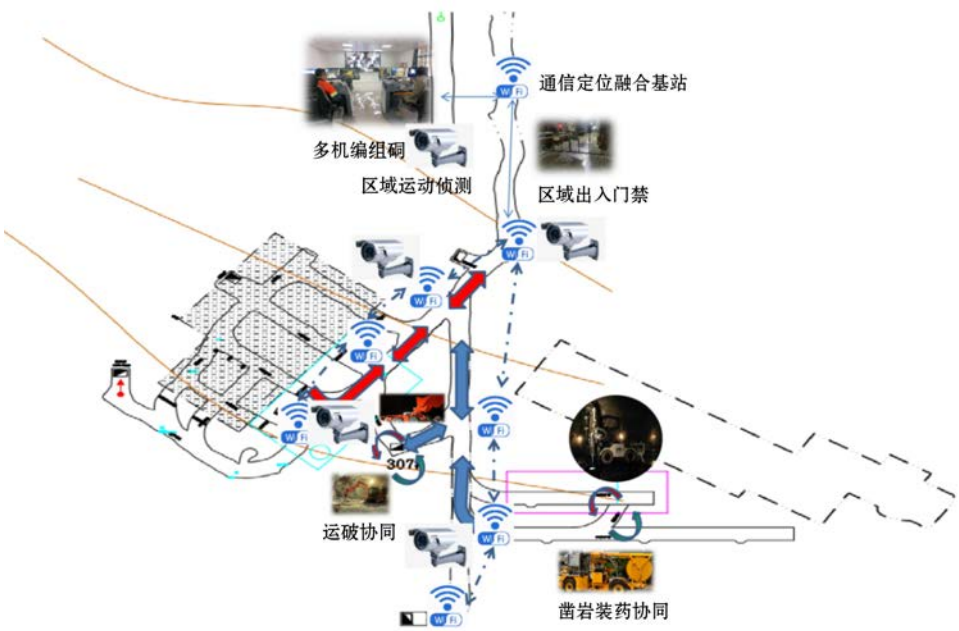


图10 井上部署架构

Fig.10 Deployment architecture diagram for shaft surface

3.4.2 场景业务流程

地下金属矿多装备智能开采系统总体业务流程紧密结合复杂条件下采矿方法、回采工艺与智能装备的协同见图11。围绕“矿石流”生产主线,包括以下主要环节。

(1) 隐患区资源赋存条件“透明化”和开采工艺

配套。根据生产任务的部署,在确定采场的资源赋存空间位置,创新设计与智能装备配套的协同采矿方法。

(2) 凿岩工序远程控制作业。根据采场爆破设计,在确定采场凿岩设计任务后,通过远程遥控凿岩台车进行采场的凿岩作业,将凿岩成孔效果评价后共享至装药环节。

(3) 装药工序远程控制作业。根据凿岩工序数据,在确定采场装药爆破任务后,通过远程遥控装药台车进行采场炮孔的装药作业,爆破后评价爆破效果,并推动生产任务至出矿工序。

(4) 出矿工序远程控制作业。在确定采场爆破完成后,通过远程遥控铲运机进行矿石的铲装,利用无人驾驶功能确保铲运机自动往返铲装点与溜井,完成铲矿-倒矿循环作业。

(5) 运矿卡车远程控制/无人驾驶。针对需要卡车运矿的场景,通过运矿卡车无人驾驶功能及远程遥控切换控制,完成卡车运矿-卸矿的循环作业。

(6) 破碎锤远程控制作业。远程控制破碎锤进行溜井处的矿石破碎作业。

(7) 多装备协同作业。对于多采场、多装备同时作业的场景,系统通过多装备调度平台进行不同装备之间的数据融合,数据传输至孪生展示平台为矿山作业人员提供管理决策,下达操作指令后多装备调度平台会自动识别并分发不同装备的作业任务,同时井下红区安全管控及监控系统能确保多装备协同作业模式下的作业区域安全。



图 11 多装备智能开采系统工艺业务流程

Fig.11 Process workflow diagram of multi-equipment intelligent mining system

4 系统应用情况

本研究构建的地下金属矿多装备智能开采系统已在广西华锡集团铜坑矿 92# 矿体成功部署并完成火烧灰区示范采场建设,系统现已正式投入生产,进入规模化推广与应用阶段。该系统以“分段空场嗣后充填工艺+多工序装备智能协同+时空动态调度”为核心理念,构建了智能化采矿作业的系统性解决方案,具体包括:建立 3 套标准化智能采矿工艺,形成适应多中段复杂作业场景的工艺体系;构建 1 套多工序多装备协同与支撑系统,实现凿岩、装药、铲运、破碎等关键工序闭环联动;部署 1 套由智能凿岩台车、智能装药车、无人驾驶铲运机及智能破碎机组成的完整智能装备链;开发并上线 1 套多装备协同调度平台,支撑路径规划、任务指令下发与设备运行状态反馈;同时制定 1 套生产管理规范及作业标准,实现井下作业班组无人化,现场仅保留维保和安全值守人员,构建了本质安全运行的新型组织模式。

系统自部署以来已连续稳定运行超过 1 年,取得了显著的技术和经济成效。在作业产能方面,系统已完成试验采场出矿、隐患区回采作业,累计穿孔进尺超 4 000 m,出矿总量达 8 万 t;在作业效率方

面,显著缩短了平均作业周期,提升了生产节奏与单元作业效率;在装备利用率方面,关键设备的平均利用率明显提高,整体运行水平优于传统作业模式;在人员配置方面,现场作业人员得到大幅精简,作业组织更加集约高效;在安全管控方面,系统运行期间未发生任何安全事故,作业本质安全水平显著提升;此外,依托装备远程控制与集中调度管理,系统整体运维成本得到有效压降,展现出良好的经济适应性与运维可控性。

上述成果充分表明,相比传统井下作业模式,本系统在作业效率、设备利用率、安全保障能力与运维成本控制方面均展现出显著优势,验证了"多装备协同+智能调度+无人少人化作业"技术路线在复杂破碎矿体开采中的系统稳定性、经济适用性和技术先进性。

5 结论

本研究针对复杂破碎矿体赋存条件下的地下金属矿山智能化开采需求,提出并实践了一套以"时空协同"为核心理念的智能开采系统。广西华锡集团铜坑矿的应用实践验证了该系统在无人/少人化作业与装备智能协同方面的有效性与可行性。

(1) 提出了面向复杂矿体的智能化采矿系统架构。该系统在分段空场嗣后充填法的基础上进行工艺创新,以凿岩、装药、铲运、破碎等关键工序装备为核心,构建了基于 WiFi/5G 的数字孪生平台,实现了采矿工艺与装备作业流程的时空协同与动态调度。

(2) 实现了多装备跨时空协同作业的数据共享与任务联动。通过搭建覆盖全域的无线定位网络与红区交互机制,系统打通了矿石流与装备流之间的数据壁垒,实现了全过程、多节点的装备信息共享与协同控制,提升了系统响应能力与作业效率。

(3) 系统部署具有显著的技术经济成效。在铜坑矿示范应用中,系统连续稳定运行超过 1 年,完成 3 套标准化智能采矿工艺、1 套多工序多装备协同支撑系统、1 套完整智能装备链和 1 套调度平台,累计穿孔超过 4 000 m,出矿总量超过 8 万 t,隐患区压覆资源得以安全高效回采,实现了作业效率的持续提升、现场人员配置的显著精简与设备利用率的大幅提高。

(4) 本研究成果为地下矿山在复杂地质环境下实现无人化、少人化安全高效作业提供了系统性、模块化、可复制的技术路径,验证了装备智能化配置与工艺组织协同集成在提升矿山本质安全水平中的关键价值,为矿山行业智能化转型与安全生产提供了理论支撑和工程示范。

参考文献(References):

[1] 关开荣,赵文琦.智能机器人在深井爆破中的应用及发展趋势[J].矿业研究与开发,2024,44(12):228-235.
GUAN Kairong, ZHAO Wenqi. Application and development trends of intelligent robots in deep well blasting [J]. Mining Research and Development,2024,44(12):228-235.

[2] 古德生,李夕兵.现代金属矿床开采科学技术[M].北京:冶金工业出版社,2006.
GU Desheng, LI Xibing. Modern mining science and technology for metal mineral resources [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2006.

[3] 王运敏.金属矿采矿工业面临的机遇和挑战及技术对策[J].现代矿业,2011,27(1):1-14.
WANG Yunmin. Opportunities and challenges to metal mine mining industry and the technical countermeasures [J]. Modern Mining,2011,27(1):1-14.

[4] 蔡美峰,谭文辉,吴星辉,等.金属矿山深部智能开采现状及其发展策略[J].中国有色金属学报,2021,31(11):3409-3421.
CAI Meifeng, TAN Wenhui, WU Xinghui, et al. Current situation and development strategy of deep intelligent mining in metal mines [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(11):3409-3421.

[5] 吴爱祥,王洪江,尹升华,等.深层金属矿原位流态化开采构想[J].矿业科学学报,2021,6(3):255-260.
WU Aixiang, WANG Hongjiang, YIN Shenghua, et al. Conception of in-situ fluidization mining for deep metal mines [J]. Journal of Mining Science and Technology,2021, 6(3):255-260.

[6] 张永玺,项江波,周科平,等.紫金山金铜矿地下采场多装备协同智能开采系统研究及应用[J].金属矿山,2024(1):55-63.
ZHANG Yongxi, XIANG Jiangbo, ZHOU Keping, et al. Research and application of multi-equipment collaborative intelligent mining system in Zijinshan Gold and Copper Mine uUnderground mining site [J]. Metal Mine,2024(1):55-63.

[7] 张元清,张元生,吕潇,等.基于智能减阻策略的地下铲运机自动铲装控制研究[J].矿业研究与开发,2024,44(1):183-189.
ZHANG Yuanqing, ZHANG Yuansheng, LYU Xiao, et al. Research on automatic shoveling control of underground scraper based on intelligent drag-reduction strategy [J]. Mining Research and Development,2024,44(1):183-189.

[8] 戴春雷.我国矿山智能化研究进展及大模型应用前景[J].工矿自动化,2024,50(增刊2):1-11+22.
DAI Chunlei. Progress of intelligent mine research and the prospects for mine large model applications in China [J]. Journal of Mine Automation,2024,50 (Suppl.2):1-11+22.

[9] 王薪荣,徐曾和,许洪亮.空场嗣后充填采矿法工艺技术探讨[J].中国矿业,2017,26(8):99-103.
WANG Xinrong, XU Zenghe, XU Hongliang. Discussion on mining technologies for open stoping with subsequent filling [J]. China Mining Magazine,2017,26(8):99-103.

[10] 汪爽.基于UWB定位技术的井下人员定位系统设计研究[J].矿业装备,2023(12):191-193.
WANG Shuang. Design and research of underground personnel positioning system based on UWB technology [J]. Mining Equipment,2023(12):191-193.

[11] 万串串,陈何,罗先伟,等.铜坑矿92#矿柱群Ⅱ采区大规模高效回采技术研究[J].金属矿山,2013(4):29-31+35.
WAN Chuanchuan, CHEN He, LUO Xianwei, et al. Study on large-scale mining technology of mining area Ⅱ in 92# pillar group in Tongkeng Mine [J]. Metal Mine,2013(0):29-31+35.

[12] 梁阿拉坦巴根.关于金属矿深部矿体开采方案及应对风险措施[J].世界有色金属,2022(1):27-29.
LIANG Alatanbageng. Mining scheme and risk countermeasures for deep ore body of metal mine [J]. World Nonferrous Metals,2022(1):27-29.

[13] 王运敏,刘海林,孙国权.CMS实测地下矿采空区建模及稳定性分析研究[J].金属矿山,2009(8):5-9.
WANG Yunmin, LIU Hailin, SUN Guoquan. Modeling and stability analysis of the mined-out area in underground mine by CMS[J]. Metal Mine,2009(8):5-9.

[14] 陈何,孙忠铭,余阳先,等.高应力条件下矿柱群安全开采技术研究[J].矿冶,2010,19(03):1-3.
CHEN He, SUN Zhongming, YU Yangxian, et al. Pillar group mining technology under high stress conditions [J]. Mining & Metallurgy,2010,19(3):1-3.

[15] 林官德.铜坑矿采空区调查与稳定性分析[D].长沙:中南大学,2021.
LIN Guande. Survey and stability analysis of goaf in Tongkeng Mine [D]. Changsha: Central South University,2021.

[16] 华明国,李安红,刘扬,等.煤层瓦斯抽采信息化APP智能系统开发与应用研究[J].矿业研究与开发,2024,44(9):186-193.
HUA Mingguo, LI Anhong, LIU Yang, et al. Development and application of APP intelligent system of coal seam gas extraction information [J]. Mining Research and Development,2024,44(9):186-193.

[17] 王浩,穹茂全,龚韩君,等.面向多装备短间隔接续的地下黄金矿调度优化研究[J].黄金科学技术,2025,33(2):369-386.
WANG Hao, WAN Maoquan, GONG Hanjun, et al. Research on scheduling optimization of underground gold mines for multi-equipment and short interval continuity [J]. Gold Science and Technology,2025,33(2):369-386.

[18] 郑向党,于小海,王秀东,等.金川二矿区矿山智能化采矿的研究与探索[J].现代矿业,2021,37(11):237-238+251.
ZHENG Xiangdang, YU Xiaohai, WANG Xiudong, et al. Research and exploration of intelligent mining in Jinchuan No.2 mining area [J]. Modern Mining,2021,37(11):237-238+251.

[19] 陈公领.物联网的矿山装备数字化运维研究与应用分析[J].世界有色金属,2023(19):1-3.
CHEN Gongling. Research and application analysis on digital operation and maintenance of mining equipment based on the internet of things [J]. World Nonferrous Metals,2023(19):1-3.

[20] 郑玉荣,靳军宝,吴新年,等.智能矿山关键技术研发与应用进展[J].黄金科学技术,2025,33(2):404-416.
ZHENG Yurong, JIN Junbao, WU Xinnian, et al. Research and application progress of key technologies in smart mine [J]. Gold Science and Technology,2025,33(2):404-416.

[21] 杨小聪,尹升华.超大型深井铁矿高效绿色开采技术与智能装备研究现状与展望[J].工程科学学报,2024,46(12):2147-2158.
YANG Xiaocong, YIN Shenghua. Research status and prospects of efficient green mining technology and intelligent equipment for ultra large deep iron mines [J]. Chinese Journal of Engineering,2024,46(12):2147-2158.