doi:10. 3969/j. issn. 1671-4172. 2024. 04. 004

智能化上向水平分层充填法在某萤石矿的应用

颜武刚,代建龙,王 锋,未 崴,李智勇,刘友林,尹千才
(湖南创远高新机械有限责任公司,长沙 410205)

摘 要:目的:针对国内某萤石矿采用普通上向水平分层尾砂胶结充填采矿法开采存在机械化程度低、生产效率低、实时在井人数多、生产管理难度大及安全风险高等问题,结合矿体开采技术条件,进行采矿方法的优化。**方法:**通过对采场结构参数、采准切割工程、回采工艺过程的研究,最终确定了自动化、智能化上向水平分层尾砂胶结充填采矿法,以智能采掘装备替代人工进行开采作业,实现少人甚至无人。**结果:**生产实践表明:该方法安全、可靠,凿岩、撬毛、铲装和充填环节均实现了 5G 远程可视化遥控作业,在控顶高度合适的条件下实现了自动定位和自主凿岩作业,作业人员可减少 50%以上,取得了良好的经济社会效益。**结论:**随着我国矿产资源逐步进入深部开采,采矿将面临高地压、高岩爆等恶劣高危作业环境,本文提出的智能化上向水平分层充填法对深地及难采矿体开采具有较好的借鉴参考意义和广泛的推广应用价值。

关键词:智能化;采掘装备;上向水平分层充填采矿法;自动喷射充填;5G 远程可视化
中图分类号:TD421 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-4172(2024)04-0021-07

Application of intelligent upward horizontal layered filling method in a fluorite mine

YAN Wugang, DAI Jianlong, WANG Feng, WEI Wei, LI Zhiyong, LIU Youlin, YIN Qiancai
(Hunan Chuangyuan High tech Machinery Co., Ltd., Changsha 410205, China)

Abstract: Purpose: In response to the problems of low mechanization, low production efficiency, large number of workers, difficult production management, and high safety risks in the ordinary upward horizontal layered tailings cemented filling mining method used in a domestic fluorite mine, combined with the mining technology conditions of the ore body, the mining method is optimized. **Method:** Through the study of the structural parameters of the mining site, mining preparation and cutting engineering, and the mining process, an automated and intelligent upward horizontal layered tailings cemented filling mining method was ultimately determined. Intelligent mining equipment was used to replace manual mining operations, achieving few or even no personnel. **Result:** Production practice shows that this method is safe and reliable, and 5G remote control operation is achieved in the drilling, pilling, shoveling, and filling processes. Automatic positioning and autonomous rock drilling operations are achieved under appropriate control height conditions, and the number of workers can be reduced by more than 50%, achieving good economic and social benefits. **Conclusion:** With the gradual entry of mineral resources into deep mining in China, mining will face harsh and high-risk working environments such as high ground pressure and high rock bursts. The intelligent upward horizontal layered filling method proposed in this article has good reference significance and wide promotion and application value for deep and difficult to mine ore body mining.

Key words: intelligence; mining equipment; upward horizontal layered filling method; automatic spray filling; 5G remote visualization

收稿日期:2024-03-18
基金项目:湖南省科技创新计划项目(2023GK2021);长沙市科技计划项目(kh2003027)
作者简介:颜武刚(1985—),男,高级工程师,硕士,主要从事智能矿山装备研究,E-mail:yanwugang1985@163. com。

某萤石矿是一个采、选综合配套的萤石矿山,生产规模 20 万 t/a,主要生产用于新能源、新材料等战略性新兴产业,以及冶金、化工、建材、光学工业等传统领域的萤石精粉。

根据地质条件和矿体赋存条件,在采矿方法优化前该矿山采准、切割、回采和充填方案如下:1)采准。阶段运输巷道、联络道等巷道掘进采用 YT-28 型气腿式凿岩机掘进施工;人行通风井、充填井采用普通法、吊罐法、爬罐法等人工半机械化的钻爆法方式施工。2)切割。采用 YT-28 型气腿式凿岩机拉底至采场边界。3)回采。采用 YT-28 型气腿式凿岩机人工钻凿水平浅孔压顶落矿,采场落矿后通过人工进入空区进行撬毛作业,最后由人工驾驶铲运机出矿。4)充填。人工在采场空区架设充填管道进行充填作业,受充填料浆自流能力的限制,为保证充填质量,充填过程中需要人工间歇性移动充填管道。

同时,为满足矿山 600 t/d 生产能力的要求,采用井下多采场开采,每天有至少 4 个生产采场同时作业,造成实时在井人数多、生产管理难度大及安全事故频发等问题,给企业的正常运营带来了很大的困难,因此,现有的普通上向水平分层尾砂胶结充填采矿法已不再适应矿山开采的要求,亟需寻找安全、高效的适合该矿山的新的采矿方法。

近年来,国家相关部委也出台了大量政策对地下矿山开采的环境保护和安全提出了严格的要求,2023 年 9 月党中央、国务院首次联合印发了矿山安全生产领域纲领性文件《关于进一步加强矿山安全生产工作的意见》,文件明确指出:“加快矿山升级改造。推动中小型矿山机械化升级改造和大型矿山自动化、智能化升级改造。”因此,采矿方法的优化和具有自主知识产权智能采掘装备的研发、应用对同类矿山具有重要的借鉴参考意义。

1 开采技术条件

矿山Ⅰ号主矿体的平面走向上透镜状、斜面倾向上脉状产出,平均品位 41.17%,矿体厚度 1～30.97 m、平均厚度 8.59 m,属薄-中厚-厚矿体,矿体倾角 32°～53°,平均 45°,属倾斜矿体,矿体顶板围岩岩质软弱,易冒落,矿体底板围岩岩石完整,致密坚硬,稳固性好。矿体位于下白垩统寿昌组地层,岩性为深灰、浅灰色长石细砂岩、粉砂岩。矿石矿物组分简单,主要为萤石和石英,此外有少量方解石、高岭土及黄铁矿等,矿石中含有少量围岩角砾。

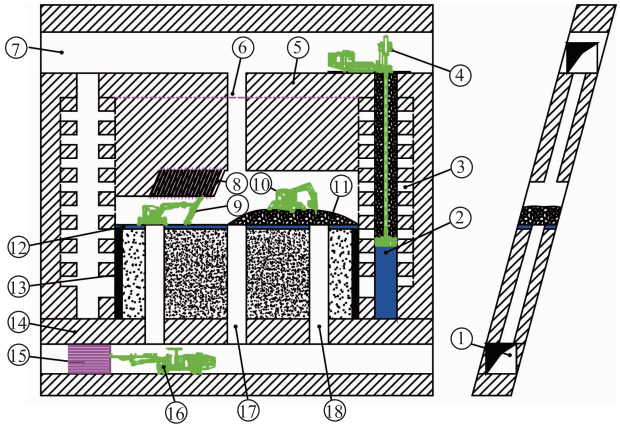
试验采场所在的－10 m 中段位于Ⅰ号矿体的中西部,矿体平均倾角 47°,赋存于 F1 断裂下盘,形态、产状受断裂构造控制,矿体比较稳固,底板围岩硅化强烈,稳固性很好。矿体顶板与断裂破碎带距离不等。在 2 线附近 20 m 水平范围内,矿体离破碎带很近,必须注意留置护壁层,矿体上下面积变化不大,上部 1 310 m^2,下部 1 127 m^2。

－10 m 水平,采场中部有一条大的夹石,夹石形态上自西向东、自下而上逐渐尖灭,夹石面积 200 m^2 左右,夹石品位 12.73%,平均水平厚度 6 m,开采时需要作为矿柱留置。采场内其它的夹石都很薄,厚度不到 1 m,开采时可以同时采下。

2 智能化上向水平分层充填开采方案

智能化上向水平分层尾砂胶结充填采矿法采用水平分层自下而上分层回采,每分层回采结束后及时对空区进行充填,以支撑采场空区两帮,并作为下一作业循环的平台[1-3]。凿岩、爆破、通风、撬毛支护、出矿、充填为一个采矿循环。

智能化上向水平分层充填法智能开采方案通过采用成套智能采掘及辅助装备、软件系统和物联集控平台并利用 5G、大数据、物联网等先进技术提升地下矿山智能化开采水平,有效降低矿井用人,实现机械化、自动化、智能化甚至无人化生产,如图 1 所示。



1-阶段运输巷道; 2-人行通风井; 3-联络道; 4-天井钻机; 5-顶柱; 6-充填井; 7-回风巷道; 8/15-炮孔; 9-凿岩台车; 10-撬毛台车; 11-崩落矿石; 12-垫层; 13-挡墙; 14-底柱; 16-掘进台车; 17-人行滤水井; 18-溜井

图 1 智能化上向水平分层充填开采方案

Fig. 1 Intelligent upward horizontal layered filling mining scheme

为了实现上向水平分层充填法的智能化开采,在采准、切割、回采阶段可分别采用以下智能装备和技术,采准切割工程主要包括阶段运输巷道、联络道、拉底巷道、人行通风井、充填井等掘进施工,其中:1)大断面巷道掘进可选用 CY-T313C 掏槽掘进台车;2)中小断面巷道掘进可选用 CY-T111～T211

掘进台车;3)溜井、通风井及充填井等掘进施工根据施工井径大小、施工工艺等因素可选用 CY-R60～R160V 天井钻机;回采工程主要包括上向垂直及扇形浅孔钻凿,可选用 CY-MT221 凿岩台车;落矿完成后,采用 CY-S22 撬毛机器人进行撬毛、大块破碎及平场作业,采用自动驾驶铲运机进行出矿,出矿完成后采用 CY-CT80 充填机器人进行充填作业,如表 1 所示。

表 1　智能采掘装备列表

Table 1　List of Intelligent Mining Equipment

序号	名称	型号规格	用途
1	天井钻机	CY-R60～R160V	竖/斜/切割井施工
2	掏槽掘进台车	CY-T313C	大断面巷道掘进
3	掘进台车	CY-T111～T211	中小断面巷道掘进
4	凿岩机器人	CY-MT221	浅孔钻凿
5	撬毛机器人	CY-S22	撬毛、破大块
6	充填机器人	CY-CT80	自动充填
7	自动驾驶铲运机		出矿

3　智能化上向水平分层充填法的应用

3.1　采场布置及结构参数

采场沿矿体走向布置采场,采场长 50 m,采场宽为矿体水平厚度,采场阶段高度 30 m,分层高度 3 m。顶板最大暴露面积控制在 250 m^2,矿块沿走向布置,设间柱及不规则点柱,要求采场跨度不超过 10 m,不留底柱,如表 2 所示。

表 2　采场布置及结构参数列表

Table 2　List of mining site layout and structural parameters

项目	参数	项目	参数
布置方式	按走向	底部结构	无
矿块长度	90 m	矿房长度	50 m
底柱高度	无	顶柱高度	无
间柱宽度	3 m	采场高度	4.5～5 m
采场宽度	矿体厚度	回采高度	3 m

3.2　采准切割工程

采准切割工程包括穿脉进路、底板侧沿脉平巷、拉底、矿石溜井、充填天井等。

穿脉进路:起接于中段或副中段底板侧脉外运输平巷,1/3 三心拱形断面(宽×高)2.6 m×2.8 m、3‰流水坡,揭穿矿体,每个采场布置 4 条,根据揭露矿体的水平厚度,控制各条进路的间距,即控制采场长度在 80～100 m 内。

底板侧沿脉平巷:在施工穿脉进路的同时,施工采场底板侧沿脉平巷,1/3 三心拱形断面(宽×高)2.6 m×2.8 m。

矿石溜井:每个采场布置 2 条矿石溜井,以 55°倾角由下往上施工、断面直径 2.0 m,布置于矿体底板侧的采场东西各半分的中间部,上口距采场回风平巷的垂距小于 5 m。随采场自下而上分层开采充填的推进,顺路开掘,同时在铲运车铲运前开通采场到矿石溜井的联络巷。联络巷,设计 1/3 三心拱形断面(宽×高)2.6 m×2.8 m、3‰流水坡,将采场充填离析的水引到矿石溜井下至运输平巷水沟排水系统。

充填天井:每个采场布置 2 条充填天井,矿体底板侧脉内布置,由下往上施工,断面直径 2.0 m,布置直径 Φ80 mm 的高压充填软管。内设行人爬梯、休息平台、照明设施,作采场通风行人共用。

拉底:在 4 条穿脉进路圈定的采场范围内,在底板侧沿脉平巷向矿体侧扩帮至矿体顶板及两端。形成拉底空间。

3.3　回采工艺

从拉底层开始向上逐步分层回采和充填。采用 CY-MT221 凿岩机器人[4-5]替代 YT-28 型气腿式凿岩机钻凿垂直及扇形浅孔落矿,炮孔直径 Φ45 mm、孔深 2.5 m、排距 0.8 m、孔距 1.2 m。凿岩参数见表 3。

表 3 凿岩参数列表

Table 3 List of rock drilling parameters

项目	参数	项目	参数
落矿方式	浅孔	炮孔直径/mm	45
孔距/m	1.2	排距/m	0.8
炮孔布置方式	垂直及扇形	炮孔深度/m	2.5

凿岩台车可通过搭载 IDOS3.0 自主作业智能控制系统实现自主凿岩,如图 2、3 所示;通过全站仪定位技术实现地下采矿装备在作业空间中的精确定位,如图 4 所示。为了实现穿孔装备在采场中一次定位完成群孔钻凿,通过搭建地下钻孔设备精准定位系统,对多多自由度臂架系统的运动学解算研究,实现机械臂高精度定位与控制[6],如图 5 所示。

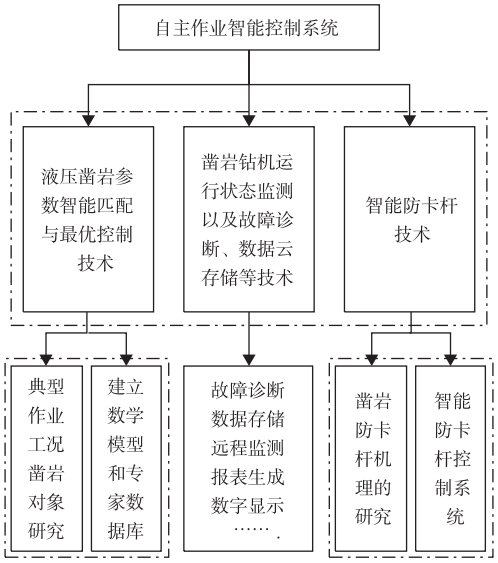


图 2 自主作业智能控制系统技术框架

Fig. 2 Technical framework of autonomous rock drilling intelligent control system

图 3 自主作业智能控制系统界面

Fig. 3 Autonomous rock drilling intelligent control system interface

落矿完成后,采用 CY-S22 撬毛机器人进行敲帮问顶,清理浮石、大块二次破碎及矿堆平场[7-8]。

图 4 全站仪定位技术示意图

Fig. 4 Schematic diagram of Electronic Total Station technology

图 5 精准定位系统

Fig. 5 Precision positioning system

采场内采用 1 m^3 电动铲运机将落下的矿石铲至溜矿井卸矿,运输巷道内采用 1 m^3 柴油铲运机铲运至溜井下放到−10 m 中段,经震动漏斗下放至矿石装入矿车,然后由蓄电池电机车运输到井底车场,再由竖井提升至地表矿仓,铲运机可通过远程智能遥控系统实现远程遥控或无人驾驶智能装卸运输[9],如图 6 所示。

图 6 铲运机远程智能遥控系统

Fig. 6 Remote intelligent remote control system of scraper

3.4　采场充填

1)充填准备。出矿完后,将凿岩机器人、撬毛机器人、铲运车等设备移至相邻采场,用大块废石垒筑挡墙(厚 1.0 m、高 1.5～2.0 m、在充填侧布设彩条布,防止充填体往挡墙外渗漏),架设充填管路,采场使用直径 Φ80 mm 的高压充填软管,从充填天井放下,最后通过卡箍与 CY-CT80 充填机器人的充填软管连接[10-11],如图 7、8 所示。胶结充填料输送流程为:地表搅拌站→搅拌桶出口→混凝土输送泵→充填钻孔→中段运输巷→采场充填井→充填机器人→采场。

图 7　充填机器人

Fig. 7　Filling robot

图 8　充填机器人控制系统界面

Fig. 8　Filling robot control system interface

2)采场充填。(1)第一分层的充填。为给顶底柱回采创造一个人工假底,在形成拉底空间后充填浇筑钢筋胶结底板(筋网 40 cm×40 cm、层距 200 mm、Φ12～14 mm 螺纹钢),用灰砂比 1∶4 的充填膏体,厚 80～100 cm,强度≥3.0 MPa。人工假底浇筑完成后,将凿岩机器人、撬毛机器人、铲运车等设备移动至采场内,直到采场开采结束后开出。(2)正常充填。以充填天井为中心,远程遥控充填机器人在采场中移动到合适位置后通过喷嘴将料浆喷出(如图 9 所示),一次或几次充填到设计高度,一次充填量 1 500～2 000 m^3、充填体灰砂比 1∶10,为减少粉矿的损失和矿石的贫化,表面 0.5 m 采用 1∶4 灰砂比浇面,胶结体强度 R28 天达到 0.2～1.7 MPa,R6 月≥3.0 MPa,充填体养护时间 5～7 d。(3)接顶充填。采场的最后一分层充填,要尽量充满,使其接近顶板,在第一次充填基本接顶后,24 h 后再回充第二次或采取压力灌浆完成接顶。

图 9　充填机器人充填作业

Fig. 9　Filling robot filling operation

4　现场工业试验

4.1　工业试验方案

在地面搭建远程集控中心,通过 5G 高速网络实现对井下装备的低时延远程精准遥控作业、应急接管和实时监测,减少采场作业人数,如图 10 所示。

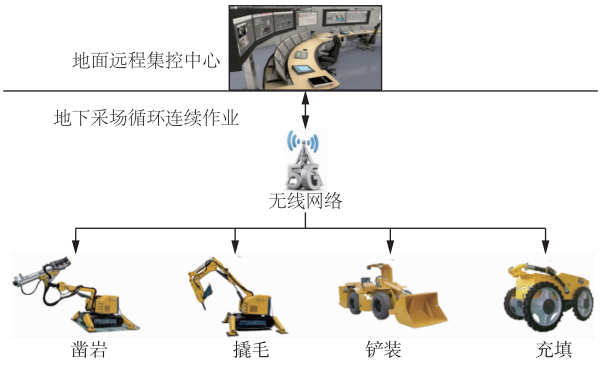


图 10　5G 远程可视化遥控作业示意图

Fig. 10　Schematic diagram of 5G remote visualization and remote control operation

4.1.1　采场准备

1)采场结构参数。选择－10 m 中段的 1、2、3 号采场作为试验采场,采场沿矿体走向呈“一字型”布置,总长约 200 m,考虑地压管理,每个采场均留有不规则矿柱,采场间的联络道尺寸(宽×高)不小于 3 m×3 m,以保证设备的正常转场。

2)采场的基础要求。采场需准备 4 个云台可变焦场景摄像头和 4 个照明灯,摄像头和照明灯需合理布置,确保能覆盖整个采场的视频画面和照明;电源电压 AC380V/50Hz,偏差不超过±7%;供水量不小

于 1.5 m^3/h,水压:0.8～1.2 MPa;采场布置 5G 基站,用于实现视频、图像等数据的高速、低延时传输。

4.1.2 试验方案

单次采矿步骤为:凿岩→装药→爆破落矿→通风→撬毛→铲装→充填,各个工序具体要求如下。

1)凿岩。(1)采用上向浅孔凿岩,中间垂直孔、顶底板扇形孔,孔深 2.5 m,孔距 0.8 m,排距 1.2 m,单次定位可钻凿 2 排(单排 5 个炮孔)共 10 个炮孔;(2)首先采顶板及上部矿石,再采底板部分矿石;(3)每次采矿前均需对顶板侧进行探孔,以保证有 1 m 左右厚的护顶层。

2)由人工完成装药进行爆破落矿,通风后使用撬毛机器人进行撬毛及大块破碎,再通过远程遥控或无人驾驶铲运机完成出矿。

3)充填。远程遥控充填机器人到合适的充填位置后进行充填作业,充填过程中根据充填效果实时调整充填机器人的位置,单次充填完成后需用清水彻底冲洗管路,防止充填料堵管。

根据采矿工艺,为了尽可能降低回采和充填之间的相互影响,提高设备的出勤率,1、2、3 号采场采用循环采矿方法,从 1 号采场开始依次向 3 号采场开采,3 号采场开采完成再进行 1 号采场开采,如此循环采矿,如图 11 所示。

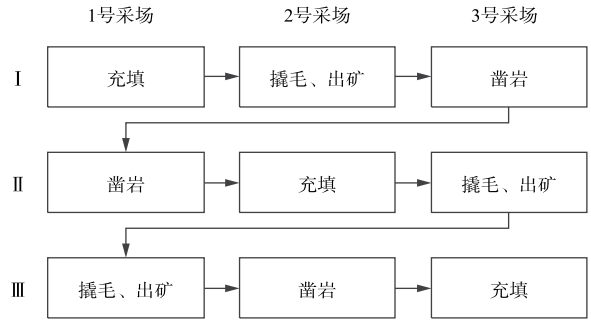


图 11 循环采矿方法示意图

Fig. 11 Schematic diagram of circular mining method

4.1.3 试验结果

通过反复测试、完善和再测试,在凿岩、撬毛、铲装和充填环节达到了“机械化换人、自动化减人”的效果,如图 12 所示。

1)地表集控中心通过 5G 通信远程遥控控制信号时延小于 150 ms,满足远程可视化遥控作业的需求。

2)凿岩机器人在控顶高度满足作业需求的条件下,可实现群孔自主凿岩作业。

3)通过多功能属具可以实现软岩刮削作业、硬岩冲击作业,并可兼做大块二次破碎、矿堆平场使用。

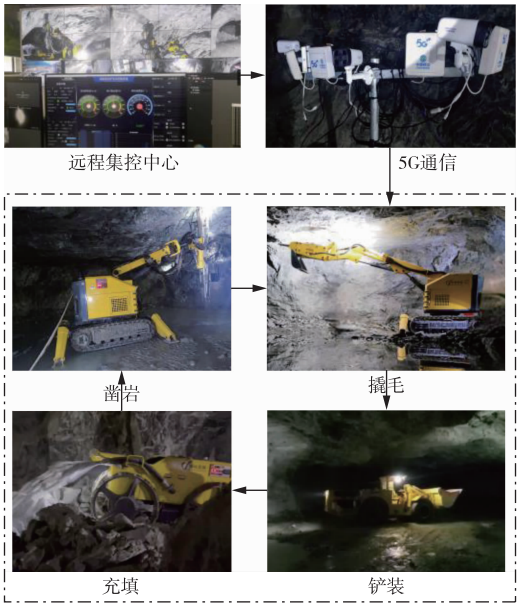


图 12 5G 远程可视化上向水平分层充填法

Fig. 12 5G remote visualization of Upward Horizontal Layered Filling Method

4)通过对矿方原有铲运机进行技术改造,搭载湖南创远底盘线控套件和自动驾驶套件(激光雷达、毫米波雷达、自动驾驶控制器)并配套远程集控座舱,能够实现远程遥控、路线学习和自动驾驶功能。

5)通过远程控制充填机器人调整喷射角度可覆盖全采场的充填作业。

4.1.4 技术指标对比分析

根据现场生产实践,智能化上向水平分层充填法通过对回采阶段凿岩、撬毛、铲装和充填四个环节改造前后的效率、安全性等方面进行对比分析,采场改造前后主要技术指标对比见表 4。

表 4 改造前后技术指标对比分析

Table 4 Comparative analysis of technical indicators before and after renovation

项目	改造前	改造后
凿岩	50～80 m/台班	＞175 m/台班
	人工凿岩	遥控＋自主凿岩
	人员数量≥2	1
	作业不安全	作业安全
撬毛	人工撬毛	遥控撬毛、破大块
	人员数量≥2	1
	作业不安全	作业安全
铲装	人工铲装	遥控
	/	约为人工效率的 60%
	作业不安全	作业安全
充填	人工拖管充填	自动喷射充填
	人员数量≥2	1
	作业不安全	作业安全

5　结论

1)通过在－10 m 阶段的 1、2、3 号采场的试验,实现了凿岩、撬毛、铲装和充填四个环节的机械化和自动化,其中在采场控顶高度适合的条件下,凿岩机器人可通过辅助定位实现单孔智能自主凿岩,一次定位可完成 10 孔钻凿。

2)智能化上向水平分层尾砂胶结充填连续采矿工艺简单安全,机动灵活,采场间相互影响不大,可实现连续循环作业,实现了凿岩、撬毛、铲装和充填环节的机械化和局部智能化,人员数量减少 50%以上,达到了预期目标。

3)受矿体赋存条件变化较大、边界不规则等因素的限制,顶底板斜孔的自动凿岩效率需进一步提升。

4)远程遥控或自动驾驶铲运机的铲装效率是制约全流程智能铲装运输的难点问题,需要进一步完善和提升。

5)通过在该萤石矿典型的应用场景可以看出,应用智能采掘设备,可以减少作业人数、降低安全风险,具有很好的借鉴参考意义。

参　考　文　献

[1] 田昌进,何茂才,孙德民. 上向水平分层胶结充填采矿法在某矿山的应用[J]. 有色冶金设计与研究,2011,32(1):1-3.
TIAN Changjin, HE Maocai, SUN Demin. Application of upward horizontal cemented cut-and-fill method in a certain mine[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2011, 32(1):1-3.

[2] 肖志奎. 充填采矿法在鸡笼山金矿床开采中的应用[J]. 采矿技术,2014,14(4):4-5.
XIAO Zhikui. Application of backfill mining method in the mining of Jilongshan gold deposit[J]. Mining Technology, 2014,14(4):4-5.

[3] 张兆辉,张友刚,万兵,等. 无矿柱上向水平分层充填法在石湖金矿的应用[J]. 矿业研究与开发,2013,33(5):1-4.
ZHANG Zhaohui, ZHANG Yougang, WAN Bing, et al. Application of non pillar upward horizontal slice stopping and filling in Shihu gold mine[J]. Mining Research & Development,2013,33(5):1-4.

[4] 方筱轩,陈建军,唐世浩,等. 一种多自由度的凿岩机械臂及凿岩机:中国,202011267662.7[P]. 2020-11-13.
FANG Xiaoxuan,CHEN Jianjun,TANG Shihao,et al. A multi degree of freedom rock drilling robot arm and rock drill:CN, 202011267662.7[P]. 2020-11-13.

[5] 方筱轩,陈建军,唐世浩,等. 一种双梁式凿岩机械臂及凿岩机:中国,202022632369.8[P]. 2020-11-13.
FANG Xiaoxuan, CHEN Jianjun, TANG Shihao, et al. A double beam rock drilling robot arm and rock drill: CN, 202022632369.8[P]. 2020-11-13.

[6] 颜武刚,代建龙. 数字液压控制阀组、方法、系统、机械手及控制方法:中国,202211434118.6[P]. 2022-11-16.
YAN Wugang, DAI Jianlong. Digital hydraulic control valve group, method, system, robotic arm and control method: CN, 202211434118.6[P]. 2022-11-16.

[7] 颜武刚,李清华,曾强. 一种撬毛装置:中国,202122492714.7[P]. 2021-10-15.
YAN Wugang, LI Qinghua, ZENG Qiang. A type of plucking device:CN,202122492714.7[P]. 2021-10-15.

[8] 颜武刚,王凯,代建龙. QM70 型多功能撬毛机器人的研制及应用[J]. 中国新技术新产品,2021(11):1-4.
YAN Wugang, WANG Kai, DAI Jianlong. Development and application of QM70 multi functional plucking robot[J]. New Technology & New Products of China,2021(11):1-4.

[9] 刘友林,代建龙,陈建军,等. 一种称重方法、系统、铲运车及计算机可读存储介质:中国,202210865623.X[P]. 2022-07-22.
LIU Youlin, DAI Jianlong, CHEN Jianjun, et al. A weighing method, system, forklift, and computer-readable storage medium:CN,202210865623.X[P]. 2022-07-22.

[10] 王锋,颜武刚,龙爱民. 矿用充填机器人的设计及应用[J]. 中国新技术新产品,2021(10):16-18.
WANG Feng, YAN Wugang, LONG Aimin. Design and application of mining filling robot[J]. New Technology & New Products of China,2021(10):16-18.

[11] 王毅,唐安平,王锋. 一种充填机器人:中国,202010974778.8[P]. 2020-09-16.
WANG Yi, TANG Anping, WANG Feng. A filling robot:CN, 202010974778.8[P]. 2020-09-16.