

天井钻机远程智能控制系统在切割天井施工中的应用*

韩锋伟¹, 颜武刚², 代建龙²

(1.山西紫金矿业有限公司, 山西忻州市 034300;

2.湖南创远高新机械有限责任公司, 湖南长沙 410205)

摘要:切割天井施工作为阶段空场嗣后充填采矿法中的关键工序之一,其施工质量直接关系后续爆破形成切割槽的效果,最终影响回采时大规模崩矿质量。针对传统人工视距操作天井钻机施工切割天井存在智能化程度低、安全风险高、职业伤害大等问题,结合山西紫金斑岩矿体开采现状和赋存条件,对现有切割天井施工方式进行了优化,实现切割天井施工智能化。提出了作业参数动态寻优控制技术,采用“爬山法”实现参数动态寻优,通过基于5G通信技术的远程智能控制系统实现自主高效连续钻进。工业应用结果表明:搭载远程智能控制系统的天井钻机在有破碎带的复杂岩层中也可以保持高精度的导孔、扩孔作业,导孔、扩孔平均进尺分别达1.75 m/h和1.375 m/h,偏斜率仅0.68%,可为其他场景中井筒的无人化施工提供参考。

关键词:天井钻机;远程智能控制系统;切割天井;动态寻优;智能导扩孔

中图分类号:TD421

文献标识码:A

文章编号:1005-2763(2025)10-0190-09

Application of Raise Boring Machine with Remote Intelligent Control System in Slot Raise

HAN Fengwei¹, YAN Wugang², DAI Jianlong²

(1.Shanxi Zijin Mining Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi 034300, China;

2.Hunan Chuangyuan High-Tech Machinery Co., Ltd., Changsha, Hunan 410205, China)

Abstract: As one of the key processes in the stage open stope with subsequent filling mining method, the quality of the slot raise construction directly affects the effect of the subsequent blasting to form the cutting groove, and ultimately affects the quality of large-scale caving mining. In view of the problems of low intelligence, high safety risk and large occupational injury in the construction of traditional artificial sight distance operation raise boring machine, combined with the mining status and occurrence conditions of porphyry ore body in Shanxi Zijin, the existing construction mode of slot raise was optimized to realize the intelligent construction of slot raise. A dynamic optimization control technology for operation parameters was proposed, which used the mountain climbing method to achieve dynamic parameter optimization, and achieved autonomous and efficient continuous drilling through a remote intelligent control system based on 5G communication technology. The industrial application results show that the raise boring machine with remote intelligent control system can also maintain high-precision hole drilling and hole expansion operations in complex rock formations with fractured zones, with an average pilot hole footage of 1.75 m/h and an average reaming footage of 1.375 m/h, and a deviation rate of only 0.68%. The study can provide a reference for unmanned construction of wellbores in other scenarios.

Key words: Raise boring machine, Remote intelligent control system, Slot raise, Dynamic optimization, Intelligent pilot and reaming

0 引言

随着科技的进步和社会经济的发展,为满足国家对矿产资源不断增长的需求,以智能化、无人化为

发展方向^[1-4],通过智能化技术与装备提升矿山开采效率和产能是实现矿山企业智能化发展的必由之路^[5-7]。

切割天井施工是阶段空场嗣后充填采矿法的关

* 收稿日期:2025-04-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907405);湖南省重点研发计划项目(2024JK2028)

作者简介:韩锋伟(1990—),男,陕西咸阳人,工程师,主要从事采矿工程与矿山智能化技术研究。E-mail:737391849@qq.com

通信作者:颜武刚(1985—),男,湖南长沙人,硕士,高级工程师,主要从事智能矿山装备研究。E-mail:yanwugang1985@163.com

键工序之一。作为回采的初始自由面和爆破补偿空间,切割天井施工质量直接影响后续爆破形成切割槽的效果,最终影响回采时大规模崩矿质量。生产实践表明,高质量的切割天井可以显著提升回采过程中的矿石回采率,降低大块率和贫化率^[8-9]。

针对传统吊罐法、爬罐法等人工钻爆法施工切割天井存在成井质量差、安全风险高等问题,为了提升成井质量、实现自动化和本质安全,国内许多学者开展了大量研究。胡正祥等^[10]通过反井钻机成井联合下向大直径深孔分次爆破扩槽技术实现切割天井施工的机械化;王永松等^[11]将天井钻机应用于切割天井施工,应用结果表明,天井钻机施工具有安全高效、井壁光滑质量好、偏斜率低、机械化程度高等优势;吴国昌^[12]在大直径深孔嗣后充填采矿法中采用天井钻机一次性实现 50 m 切割天井机械化施工成井;何斌全等^[13]在大直径深孔侧向崩矿嗣后充填采矿法中采用天井钻机施工切割天井,实现安全、高效的侧向爆破拉槽;罗佳等^[14]在对切割槽形成技术的研究中指出,天井钻机成井法是目前最先进的切割天井施工方法,安全性好、效率高。

以上研究主要聚焦传统的天井钻机机械化施工切割天井,而关于天井钻机智能化施工切割天井等方面的研究较少。

本文针对山西紫金斑岩矿体的赋存条件,提出智能化施工切割天井的思路,并通过采场应用验证其可行性,旨在为阶段空场嗣后充填采矿法中实现切割天井智能化施工提供关键技术装备支持。

1 开采技术条件及现状

山西紫金斑岩型金矿体资源储量丰富,长期以来主要采用分层充填采矿法、浅孔留矿法以及削壁充填法开采,存在自动化程度低、采场生产能力小、综合作业成本高等问题,现有生产规模仅 20×10^4 t/a,无法满足企业进一步发展的需要。

待开采的斑岩型主矿体赋存标高为 970~600 m,形态呈东西轴略长的囊状体,倾角为 $68^\circ \sim 72^\circ$,平均 70° 。矿体中间厚大连续,东西长 245~291 m,平均 268 m;南北长 245~296 m,平均 271 m,金品位 0~36.4 g/t,平均 2.18 g/t,品位变化系数为 85.69%,分布较均匀。现有矿区工业场地、办公楼及居民区位于矿体正上方,地表不允许塌陷,且矿体位于义兴寨河床下方。该矿体为急倾斜厚大矿体,矿岩稳固性较好,为了提升产能、保证安全并通过智

能采矿装备实现开采过程的“智能化、无人化”,选用大直径深孔阶段空场嗣后充填法进行开采。

大直径深孔阶段空场嗣后充填法的核心流程分为“采矿—空场—充填”三个阶段。首先将矿体划分为若干阶段,自上而下逐段开采,采出矿石后形成临时空区,随后通过充填管道系统向空区注入充填料,以支撑围岩并为后续开采提供稳定的作业环境。该方法兼具空场法的高效性与充填法的安全性,可有效控制地压、减少地表沉降,实现矿石的高效开采。

山西紫金斑岩型金矿体 770 m 中段 4 盘区被划分为若干个矿房和矿柱,采用两步骤回采,矿房和矿柱沿走向布置,长 50 m,宽度均为 15 m,高度为中段高度(50 m)。矿房布置 2 个凿岩硐室,凿岩硐室之间预留 3 m 宽的安全间柱,安全间柱沿硐室长轴方向以长条形布置在矿房正中央。切割天井布置在矿房端部,采用智能天井钻机施工直径为 1.5 m 的切割天井,保证偏斜率小于 1%。采切工程完成后,以切割天井为自由面拉开切割槽,后退式侧向崩矿回采矿房。

黄金是重要的全球性战略资源,提高黄金生产的能力,对增强国家抵抗金融风险的能力和维持国家经济安全、金融安全具有重要价值。因此,优化开采工艺,建设智能化矿山,积极开发该斑岩型金矿不但对企业发展有着经济现实意义,还对保障国家黄金储备稳定增长和维持国家经济安全具有重要意义。

2 切割天井施工工艺

由于作业硐室矿岩稳固性较好,为了降低生产成本,提高作业效率,切割天井施工前先将浮石清理干净,再按硐室布置要求浇筑 100 mm 厚、C30 强度等级的混凝土基础,并将混凝土地面找平,待混凝土基础硬化后用 16 根 $\Phi 36$ mm 锚杆将基础钢梁进行固定。

由于切割天井的偏斜率直接影响后续侧向爆破拉槽的质量,在基础准备完成后,为了保证导扩孔过程中天井钻机机身的稳定性,从而保障切割天井的偏斜率不大于 1%,在将天井钻机移动至作业地点调平后,立机定位时,一方面需将主机靴板用螺栓与基础钢梁固定,另一方面应将上顶撑油缸与硐室顶部完全顶紧(如图 1 所示)。立机定位完成后再进行导扩孔作业,详细施工流程如图 2、图 3 所示。

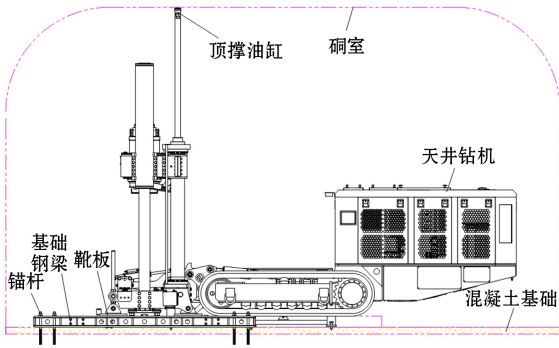


图 1 天井钻机施工硐室布置示意

Fig.1 Schematic diagram of the layout of raise boring machine construction chamber

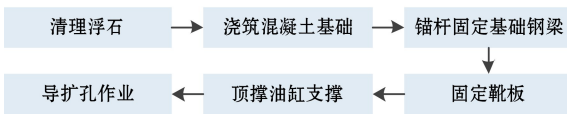


图 2 天井钻机施工流程

Fig.2 Construction process of raise boring machine

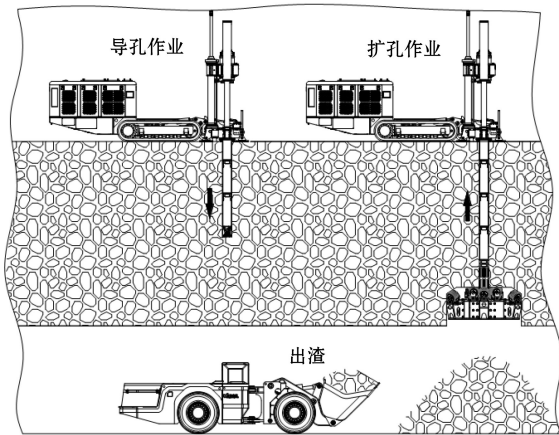


图 3 天井钻机导扩孔作业

Fig.3 Pilot and reaming operation of raise boring machine

(3) 高效性原则。系统的运行效率主要包括处理能力、处理速度、响应时间等,在满足其他各项功能需求的前提下,应尽可能提高系统运行效率。

(4) 稳定性原则。系统采用成熟可靠的工业级硬件,保证在面对高温、潮湿、振动、粉尘等恶劣工作条件下能稳定可靠运行,满足智能化施工作业的要求。

(5) 合法合规原则。严格贯彻国家、行业和地方颁布的有关方针、政策、法律、法规、规范和标准。

(6) 友好性原则。系统具有人性化的人机交互界面,用户界面标准,统一集成,使用简单,减少使用的复杂程度,提高使用效率。

(7) 可扩展性原则。系统预留相关智能化功能扩展模块及接口,可与外部相关系统扩展集成,满足采掘、铲装、运输作业和其他生产、管理环节集成的需求。

3.2 天井钻机智能作业过程分析

为了实现切割天井施工的全流程智能化,需对作业过程进行分析。天井钻机智能作业主要包括:钻杆输送(存储)、钻杆抓取、钻杆转运、钻杆接卸、自主作业五个关键环节(如图 4 所示),各个环节的自动化解方案如下。

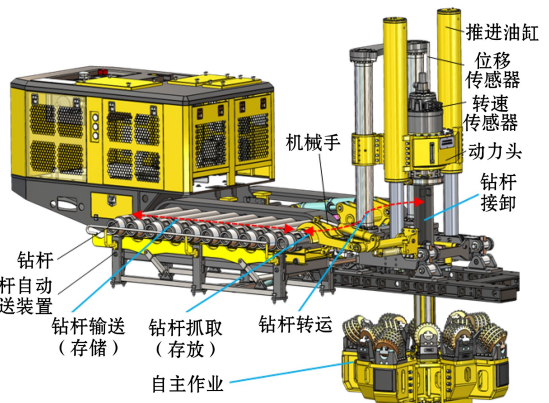


图 4 智能天井钻机作业过程

Fig.4 Operation process of intelligent raise boring machine

3 天井钻机与远程智能控制系统研究

3.1 智能天井钻机的设计要求

为了解决矿山井下天井施工作业面临的高温、岩爆、潮湿等问题,研发了一套远程智能控制系统,实现远程遥控、紧急状态下的应急接管和自主作业,并具备作业记录和故障诊断等功能。为保障上述功能的稳定可靠运行,提出了七大设计原则。

(1) 安全性原则。设备运行过程中,在出现任何异常情况时都能保证人员、设备的安全。

(2) 易用性原则。系统必须具有良好的可管理和易维护的特点,设备应符合人机工程学的设计要求,实现易学、好用。

(1) 钻杆输送(存储)。通过钻杆自动输送装置替代人工搬运钻杆,单次存储 10 根钻杆,满足单班无人化施工的需求^[15]。

(2) 钻杆抓取及转运。通过液压机械手卡爪抓取钻杆后再通过转臂和起落两个组合动作自动完成钻杆的转运和对中^[16]。

(3) 钻杆接卸。通过动力头回转转速传感器和推进油缸位移传感器实时采集运动数据,再通过闭环控制完成自动接卸杆^[17]。

(4) 自主作业。通过智能控制系统及其模块,实现自动开孔、作业模式选择、参数动态寻优、智能防卡钻等功能。

3.3 导扩孔智能作业研究

3.3.1 导孔智能作业

导孔作业主要包括:钻杆输送、钻杆抓取、钻杆转运、钻杆连接、导孔自主作业五个关键环节。导孔作业时为了提高进尺效率,动力头回转转速较高,应根据岩石硬度和稳固性实时调整孔底轴压,防止卡钻、埋钻事故的发生。

导孔智能作业控制逻辑如图 5 所示。

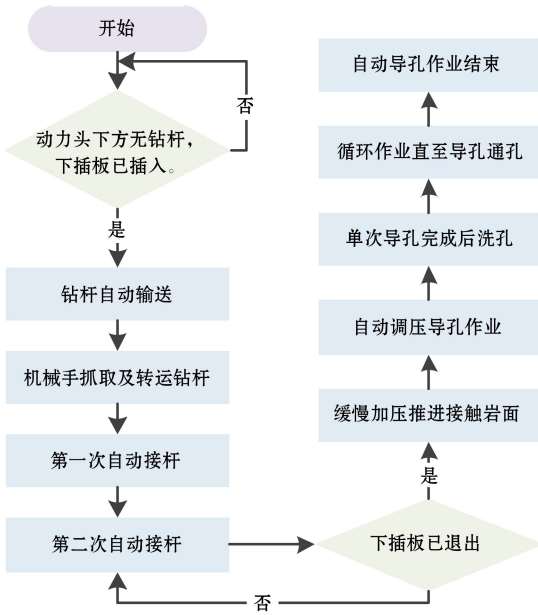


图 5 导孔智能作业控制逻辑

Fig.5 The control logic of pilot hole intelligent operation

导孔智能作业前,天井钻机已经完成调平、定位和立机,推进油缸反提到底使动力头处于最顶端位置,动力头下方没有连接钻杆,下插板已插入第一根钻杆两侧的凹槽,如图 6 所示。

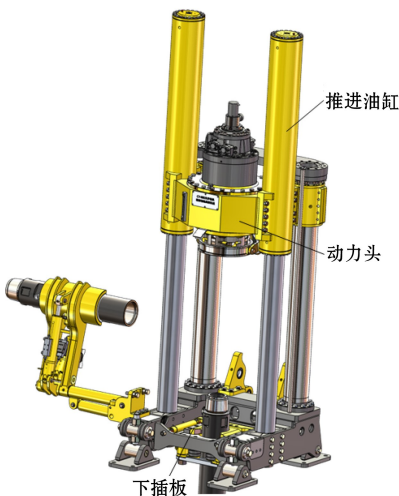


图 6 导孔智能作业准备

Fig.6 Preparation for pilot hole intelligent operation

准备工作完成后,点击“导孔智能作业”选项,系统自动进入自主导孔模式,首先自动完成动力头与机械手抓取钻杆的连接,然后再自动完成与底座中第一根钻杆的连接(如图 7 所示),自动接杆完成后进入智能导孔作业状态,按上述步骤循环作业,直至通孔。



图 7 自动接杆

Fig.7 Automatic connection of drill pipe

3.3.2 扩孔智能作业

扩孔智能作业控制逻辑如图 8 所示。

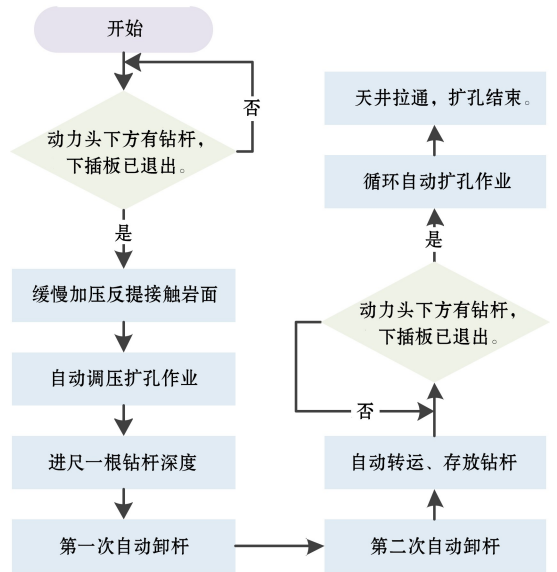


图 8 扩孔智能作业控制逻辑

Fig.8 The control logic of reaming intelligent operation

导孔通孔后,在下方硐室拆卸牙轮钻头并安装扩孔刀盘进行反扩作业。扩孔作业主要包括扩孔自主作业、钻杆拆卸、钻杆抓取、钻杆转运、钻杆存放五个关键环节。扩孔作业自下而上反向进行,扩孔智能作业前,由于硐室顶部凹凸不平,需要低反提力、

慢转速逐步将岩面刷平整。当刀盘已正常进入扩孔作业状态后,在确保动力头下方钻杆已正常连接,下插板已退出钻杆两侧的凹槽时,点击“扩孔智能作业”选项,系统自动进入自主扩孔模式。当反扩进尺一根钻杆深度时,进入自动卸杆,先自动卸开动力头与下方钻杆并卡入上卸杆机构,再自动卸开与底座中钻杆的连接(见图 9),通过机械手的卡爪、转臂和起落组合动作完成钻杆的抓取、转运和放置,最后通过自动输送装置完成钻杆的存放,如此循环直至拉通整条天井(见图 10)。

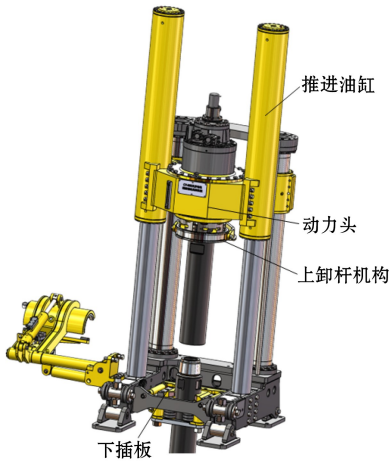


图 9 自动卸杆

Fig.9 Automatic unloading of drill pipe

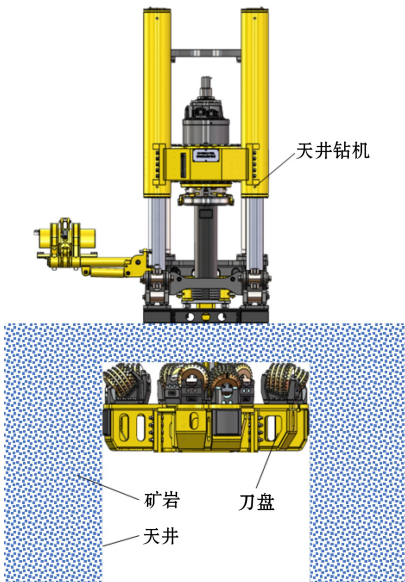


图 10 扩孔完成

Fig.10 Completion of reaming

3.3.3 作业参数动态寻优控制技术研究

由于同一条天井在不同深度的地质条件存在较大差异,如果始终以恒定的推进或反提压力进行导

扩孔作业将严重影响进尺效率和钻具的使用寿命,进而增加开采成本。若遇到破碎带等复杂多变的地质条件,则可能造成卡钻甚至埋钻事故。导孔作业时,若轴压太小则将加速牙轮钻头磨损,缩短其使用寿命;而轴压过大则可能将牙轮钻头压溃。扩孔作业时,若反提力太小则将加速刀盘滚刀磨损,缩短其使用寿命;而反提压力过大甚至超过滚刀的单刀载荷,则可能损坏滚刀,造成施工周期延长、生产成本增加。

在不同地质条件下,跟随岩层变化实时动态调整作业参数是解决上述问题的关键。为此,本文提出了作业参数动态寻优控制技术,并采用“爬山法”对推进或反提压力进行动态寻优,从而得到在不同深度、不同物理特性岩层时的最优作业参数,实现最佳的导扩孔钻进效率。

采用“爬山法”进行动态寻优时,根据矿地质质条件设定一个初始压力值 P (后续每次以上次停机时保存的最优值作为初始设定值),然后每作业 Δt 时间后判断钻进速度是否提高。如果钻进速度提高,则继续按步长 ΔP 增加推进或反提压力再运行 Δt 时长;如果钻进速度降低则按步长 ΔP 减小推进或反提压力再运行 Δt 时长,直至增加或减小步长 ΔP 时钻进速度均减小,则认为当前是局部最优参数,动态寻优结束。“爬山法”动态寻优控制逻辑如图 11 所示。

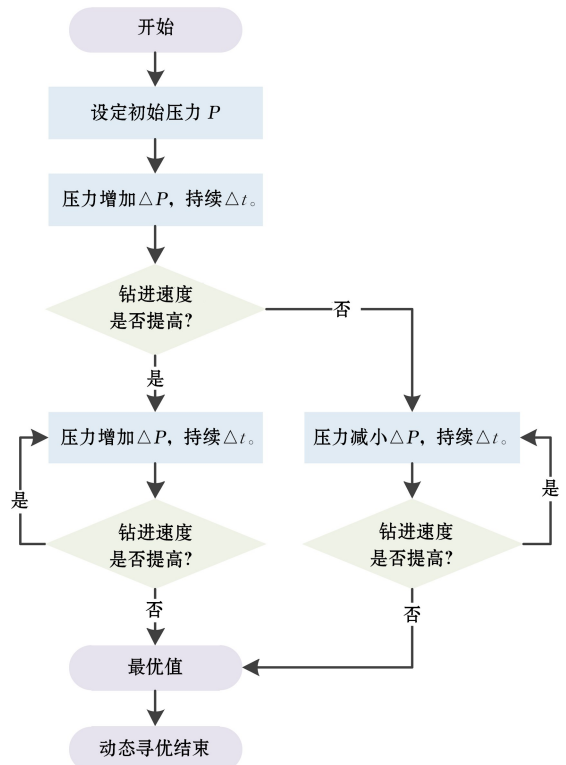


图 11 动态寻优控制逻辑

Fig.11 Control logic of dynamic optimization

3.4 远程智能控制系统研究

3.4.1 远程智能控制系统原理

远程智能控制系统是一种基于 5G 通信技术构建的分布式控制架构,旨在实现车载端与座舱端的高效协同作业。其核心原理围绕实时通信、模块化控制及分层安全策略展开,具体可分为以下三个部分。

(1) 系统架构与通信机制。系统由远程智能控制座舱、车载控制系统及 5G 通信系统构成。座舱端部署于地表集控中心,集成工业触摸平板、遥控手柄及主工控机,负责指令生成与人机交互;车载端位于地下作业硐室,配备车载控制器、环境感知模块及视频监控设备,实时感知和采集钻机姿态、作业参数及环境数据。两端通过 5G-CPE(客户终端设备)与交换机互联,形成低延迟、高可靠的双向通信链路(如图 12、图 13 所示)。

(2) 模块化功能设计。座舱端操作信号经主工控机编码后,通过防火墙与交换机下发至车载控制器,驱动行走、作业等执行机构。车载端传感器(如高温感应报警、姿态感知组件等)将实时数据上传至座舱端,通过参数轨迹显示与视频监控界面呈现,辅助操作员精准决策。采用双网口设计,确保通信中断时系统可切换至备用链路,维持基础控制功能。

(3) 安全与容错机制。系统通过硬件隔离(如防火墙)与软件协议(如急停信号优先处理)保障安全性。例如,车载控制器对异常指令(如网络延迟导致的冲突命令)自动过滤,并触发本地保护程序,避免设备误动作。

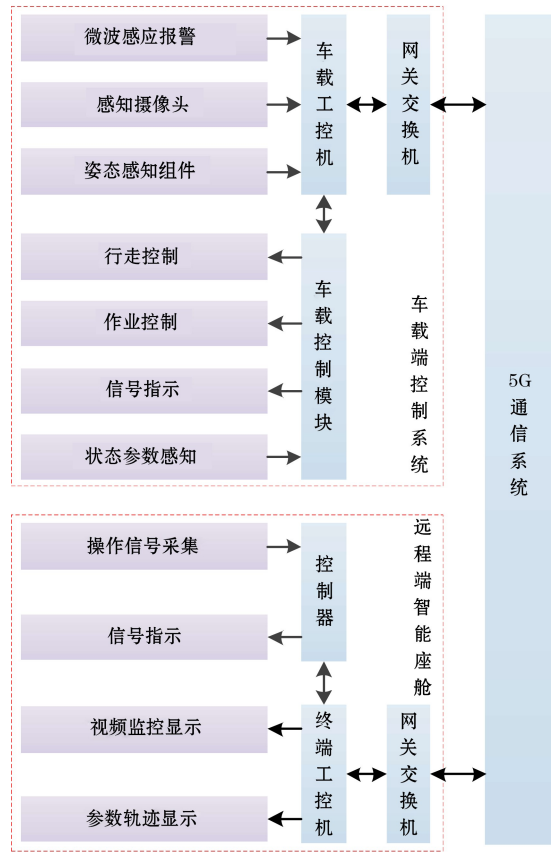


图 13 远程智能遥控系统框架

Fig.13 Framework of remote intelligent remote control system

该系统通过 5G 网络实现“感知—决策—执行”闭环,其优势在于模块化架构适配复杂工业场景,而分层通信与安全设计确保了远程控制的实时性与可靠性。这一框架为天井钻机的智能化作业提供了可扩展的技术基础。

3.4.2 远程智能控制系统功能模块

远程智能控制系统通过传感装置和视频设备感知现场环境和采集设备作业参数,并进行作业逻辑、工艺流程的判断和处理,实现天井钻机远程监测和自主作业,主要功能模块如下。

(1) 控制模块。

该模块具有视距遥控和远程遥控两种操作模式,两种模式可以快速切换。远程智能控制座舱位于地表集控中心,通过 5G 网络与天井钻机设备进行信息交互,控制指令经座舱中央控制器采集后通过网络协议下发至车载控制器并执行相应动作。

(2) 监测模块。

该模块通过场景摄像头多角度、全方位监测天井钻机实时运行状态与周边环境状态。摄像头具备红外自动感光功能、雨刮清洗功能,以保障高粉尘、

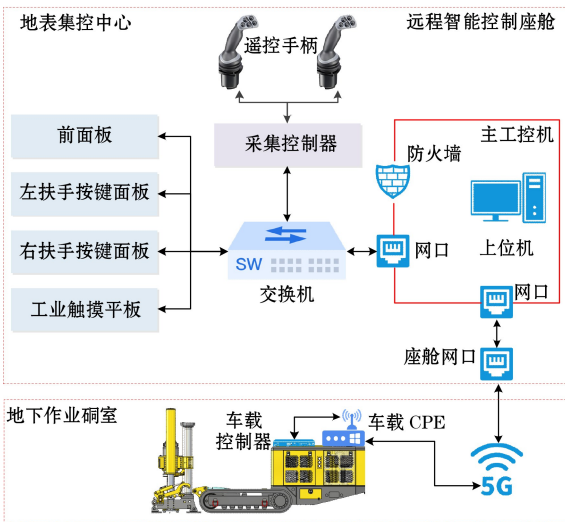


图 12 远程智能遥控系统模型

Fig.12 Model of remote intelligent remote control system

低光照条件下的环境数据准确性,并具有远程调节焦距和现场拾音的功能,使地表远程操作人员更好地感知现场环境,实现精准操作和定位。

(3) 安全保护模块。

安全保护模块通过一系列精细化的控制和保护策略,确保设备在紧急情况下的安全停运,降低对人员和设备的潜在风险,安全保护控制策略如图 14 所示。

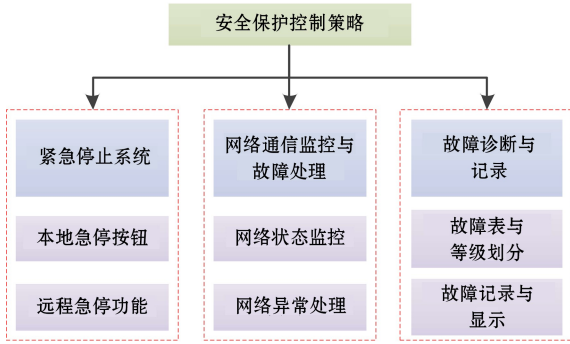


图 14 安全保护控制策略

Fig.14 Security protection control strategy

本地急停按钮被按下后,立即停止设备的启动并终止正在进行的任何操作。此时,无论是远程还是本地,都无法对设备执行任何操作,同时远程和本地的界面都会显示急停按钮已被按下的状态,确保操作员能够迅速识别当前的安全状态。

远程操作模式下,若远程急停被触发,远程操作界面将失去对设备的控制权,正在运行的设备将自动停止,并且远程界面将不再接受任何操作指令。

远程操作模式下,当网络出现断网、拥堵等异常情况时,若设备处于自动作业模式,其作业流程将继续执行,以保证生产的连续性;若设备处于远程操作模式,当前正在执行的动作将自动中断,避免因网络延迟或中断导致误操作带来的安全风险。

当设备出现故障时,系统根据预设的故障等级和相应的停机程序,迅速切断与故障相关的设备电源或控制信号,防止故障扩大。同时,人机交互界面将实时显示并记录相关故障信息,为后续的故障排查和维修提供便利。

(4) 故障诊断与记录模块。

系统能够对各类传感器故障、车辆系统故障、通信故障(车载端/远程座舱端各环节通信)、程序模块运行异常等进行实时故障诊断,实时监测传感器、通信及程序异常,通过声光报警与文字提示定位故障;作业数据全程记录,支持回溯分析。

4 智能天井钻机在切割天井施工中的应用

为验证天井钻机与远程智能控制系统在切割天

井施工中的有效性,在山西紫金斑岩型金矿体 770 m 中段 4 盘区采场开展了 CY-R80V 智能天井钻机的工业应用研究。通过在采场布置场景摄像头实时监测天井钻机作业状态,采用车载端的压力、位移、角度等传感装置实时采集天井钻机作业数据,由 5G 网络将视频、控制信号、作业数据等信息低延时地传输至地表集控中心的智能控制座舱。在立机定位完成时,从钻杆输送、钻杆抓取、钻杆转运、钻杆接卸、自主作业、远程智能控制等环节进行了切割天井智能导扩孔作业测试验证,过程如图 15 所示,智能扩孔完成后成井效果如图 16 所示。

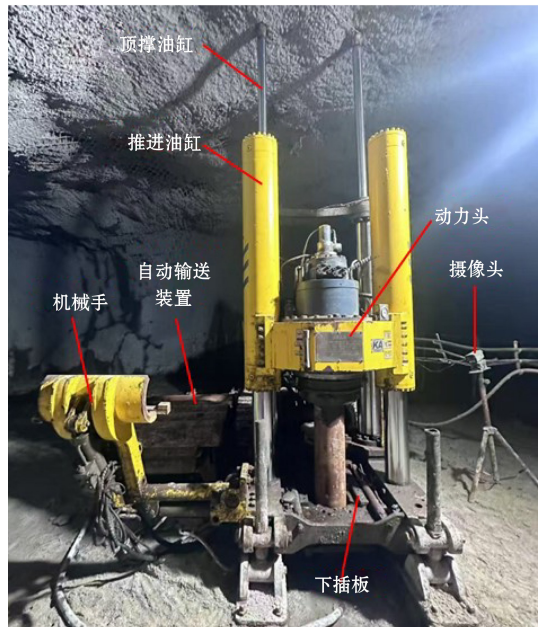


图 15 智能导扩孔作业测试

Fig.15 Test of intelligent pilot and reaming operation



图 16 切割天井成井效果

Fig.16 Completion effect of slot raise

应用结果表明,搭载远程智能控制系统的天井钻机可实现不间断连续作业,作业人员在地表集控中心即可完成交接班,天井钻机出勤率大幅提升,辅

助作业时间大幅降低。在普氏硬度系数 f 为 8, 并存在破碎带等复杂多变地质条件下, 智能导孔作业进尺速度最快可达 14 m/班(8 h/班), 平均进尺为 1.75 m/h, 智能扩孔作业进尺速度最快可达 11 m/班(8 h/班), 平均进尺为 1.375 m/h, 切割天井偏斜率为 0.68%。切割天井的智能化综合作业效率与质量满足后退式侧向崩矿回采工艺及 6 000 t/d 供矿能力的要求。

5 结论

本文基于切割天井导扩孔智能作业过程, 设计了远程智能控制系统, 以山西紫金斑岩型金矿体为试验对象, 为阶段空场嗣后充填采矿法中切割天井的智能化施工提供了关键技术装备支撑。

(1) 从钻杆输送(存储)、钻杆抓取、钻杆转运、钻杆接卸、自主作业五个关键环节对天井钻机智能导扩孔作业过程进行了详细分析, 提出了作业参数动态寻优控制技术, 通过采用“爬山法”实现了在破碎带复杂岩层中自主高效连续钻进。

(2) 自动输送装置与机械手配合可稳定实现智能导扩孔作业过程中自动接卸钻杆; 通过基于 5G 通信技术的远程智能控制系统可实现视距遥控和远程接管的快速切换, 检测模块、故障诊断模块、安全保护模块等均能及时响应, 满足实际工程应用的要求。

(3) 现场应用表明: 智能导孔和扩孔作业平均进尺分别可达 1.75 m/h 和 1.375 m/h, 切割天井偏斜率为 0.68%, 切割天井的智能化综合作业效率与质量满足后退式侧向崩矿回采工艺及 6 000 t/d 供矿能力的要求。

参考文献(References):

- [1] 胡乃联, 李国清. 我国金属矿山智能化现状与问题探讨[J]. 金属矿山, 2024(1): 7-19.
HU Nailian, LI Guoqing. Discussion on the status and issues of intelligence for metal mines in China[J]. Metal Mine, 2024(1): 7-19.
- [2] 刘志强, 陈湘生, 蔡美峰, 等. 我国大直径钻井技术装备发展的挑战与思考[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 132-139.
LIU Zhiqiang, CHEN Xiangsheng, CAI Meifeng, et al. Challenges and thoughts on the development of large-diameter drilling technology and equipment[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(2): 132-139.
- [3] 李国清, 王浩, 侯杰, 等. 地下金属矿山智能化技术进展[J]. 金属矿山, 2021(11): 1-12.
LI Guoqing, WANG Hao, HOU Jie, et al. Progress of intelligent technology in underground metal mines[J]. Metal Mine, 2021(11): 1-12.
- [4] 吴爱祥, 王勇, 张敏哲, 等. 金属矿山地下开采关键技术新进展与展望[J]. 金属矿山, 2021(1): 1-13.
WU Aixiang, WANG Yong, ZHANG Minzhe, et al. New development and prospect of key technology in underground mining of metal mines[J]. Metal Mine, 2021(1): 1-13.
- [5] 战凯, 吕潇, 金枫, 等. 地下金属矿智能开采技术与装备现状及“十四五”的思考[J]. 智能矿山, 2021, 2(1): 11-15.
ZHAN Kai, LYU Xiao, JIN Feng, et al. Current status of intelligent mining technology and equipment for underground metal mines and reflections on the 14th Five Year Plan[J]. Journal of Intelligent Mine, 2021, 2(1): 11-15.
- [6] 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]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3409-3421.
- [7] 王永明. 金属矿山数字化及智能化建设关键技术研究[J]. 矿业装备, 2025(1): 62-64.
WANG Yongming. Research on key technologies of digital and intelligent construction of metal mines[J]. Mining Equipment, 2025(1): 62-64.
- [8] 秦国玉, 龚臻, 谭宝会, 等. 软破岩石崩落法采场大高跨切割槽形成技术研究与应[J]. 金属矿山, 2025(1): 37-47.
QIN Guoyu, GONG Zhen, TAN Baohui, et al. Research and application on forming technology of high and large-span cutting grooves in sublevel caving stope under broken rock mass and orebody[J]. Metal Mine, 2025(1): 37-47.
- [9] 郭鸿德, 万串串, 刘立顺, 等. 充填体下高分段中深孔采场一次成槽技术研究与应[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(4): 59-66+80.
GUO Hongde, WAN Chuanchuan, LIU Lishun, et al. Research and application of one step slotting technology for high sublevel medium-deep hole stoping under backfill[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024, 76(4): 59-66+80.
- [10] 胡正祥, 曾庆田. 反井钻机成井联合下向大直径深孔分次爆破扩槽技术应用[J]. 云南冶金, 2021, 50(6): 15-19.
HU Zhengxiang, ZENG Qingtian. Application of groove enlargement technology on joint downward large diameter deep hole subdivision blasting by raise boring machine[J]. Yunnan Metallurgy, 2021, 50(6): 15-19.
- [11] 王永松, 黄小燕, 谢光天, 等. 天井钻机在切割井施工中的应用[J]. 矿业装备, 2023(11): 189-191.
WANG Yongsong, HUANG Xiaoyan, XIE Guangtian, et al. Application of raise boring machine in slot raise construction[J]. Mining Equipment, 2023(11): 189-191.
- [12] 吴国昌. 紫金山金铜矿大直径深孔嗣后充填采矿法[J]. 现代矿业, 2015, 31(12): 8-11.
WU Guochang. Large diameter deep hole subsequent filling mining method in Zijinshan Gold and Copper Mine[J]. Modern Mining, 2015, 31(12): 8-11.

- [13] 何斌全,万孝衡,兰晓平,等.柿竹园钨多金属矿切割槽快速形成技术应用实践[J].采矿技术,2023,23(4):6-9.
HE Binqun, WAN Xiaoheng, LAN Xiaoping, et al. Application practice of cutting groove rapid formation technology in Shizhuyuan tungsten polymetallic mine[J]. Mining Technology,2023,23(4):6-9.
- [14] 罗佳,柳小胜,宋嘉栋,等.地下采矿切割槽形成技术研究[J].有色金属(矿山部分),2015,67(6):14-19.
LUO Jia, LIU Xiaosheng, SONG Jiadong, et al. Study on cutting groove forming technology of underground mining[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2015,67(6):14-19.
- [15] 唐安平,尹千才,谭崎文,等.一种钻杆自动输送装置及钻孔设备:202210859919.0[P].2022-07-22.
TANG Anping, YIN Qiancai, TAN Qiwen, et al. An automatic drill pipe conveying device and drilling equipment: 202210859919.0[P].2022-07-22.
- [16] 唐安平,唐世浩,谭崎文,等.一种机械手及天井钻机:202222771038.1[P].2022-10-20.
TANG Anping, TANG Shihao, TAN Qiwen, et al. A manipulator and raise boring machine:202222771038.1[P]. 2022-10-20.
- [17] 代建龙,刘友林,尹千才,等.天井钻机控制方法、装置、存储介质及天井钻机:202310614399.1[P].2023-05-29.
DAI Jianlong, LIU Youlin, YIN Qiancai, et al. Control method, device, storage medium and raise boring machine: 202310614399.1[P]. 2023-05-29.