

数字化技术融合下矿山精细化采矿技术研发与工程应用

刘亚晨

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

【摘要】：针对传统矿山采矿模式存在的资源回收率低、生产效率不足、安全风险突出、成本控制困难等问题，本文提出一套基于数字化技术的精细化采矿技术体系，该体系通过多源数据采集与三维地质精确建模、数字化采矿设计优化、智能化装备与监测系统集成，实现整个采矿过程的精准化和智能化管控。同时，以某锂矿工程为例验证精细化采矿技术的应用效果，结果表明，该技术体系能够提升矿山开采效率将近 40%，同时降低采矿成本和事故发生率，提高资源回收率，从而促进项目经济效益、安全效益、生态效益的同步提升。

【关键词】：数字化技术；精细化采矿；三维地质建模；智能化装备；矿山监测

DOI:10.12417/2811-0536.26.08.050

引言

精细化采矿技术作为数字化与矿业工程深度融合的核心成果，其主要通过融合各种先进技术，实现对采矿作业的精准化设计、智能化执行与动态化调控。锂矿作为典型的复杂地质条件矿山，存在地质构造复杂、矿体形态不规则、品位分布不均等技术难题，传统剥采技术效率低、成本高、资源回收率不足，亟须先进的精细化采矿技术破解发展瓶颈。基于此，本文基于工程实践系统分析数字化技术融合下矿山精细化采矿技术体系的研发与应用，为同类矿山的技术升级提供参考。

1 研究背景

大数据、人工智能、物联网等数字技术的快速迭代升级，全面推动了全球产业的数字化转型。在矿业方面，大型矿产企业都在积极进行数字化矿山的建设，以推动矿业开采效率和经济效益的提升。但是传统露天矿山开采存在较多的问题和缺陷。一是地质勘察精度不足，在以往矿山开采时多是通过少量钻孔数据配合技术人员的经验进行矿体形态的推演，所以所划定的矿体边界偏差较大。这就会影响矿山资源的回收效率。二是采矿设计并没有结合采矿工作的开展进行动态调整，这就导致在矿山开采过程中，可能会因为地质条件变化等，导致原采矿计划参数不匹配具体情况，影响开采的效率和效益。三是生产管控手段滞后，在当下相当一部分矿山管理多是通过人工来进行现场排查，并且设备的作业精度也相对不足，矿山开采的效能和安全管控水平难以满足当下的开采发展要求。非洲津巴布韦某锂矿矿山的矿体埋深较浅，所以采取露天开采工艺，但是该区域的地质构造复杂，矿石品位的分布不够均匀，难以满足选矿厂的生产需求，必须进一步提升原料供给的稳定性。而该矿山原先采用传统剥采工艺，通过固定台阶高度和爆破参数来进行开

采,所以爆破作业效率较低,矿石贫化率较高;并且在该开采模式下,矿山边坡的稳定性也相对较差,传统人工监测无法实时捕捉边坡形变隐患。为提升该锂矿的开采效能和经济效益,必须构建更加数字化和精细化的采矿技术体系。

2 基于数字化技术的矿山精细化采矿技术体系

2.1 总体技术架构

数字化技术融合下的矿山精细化采矿技术体系以“感知—建模—设计—控制—反馈”为核心闭环,构建全流程、全要素的精细化管控架构(图1)。该技术体系是通过各类传感器和采矿设备仪器来获取感知层数据,然后再通过统一数据平台的清洗处理,形成高精度三维地质模型,这样在矿山采矿过程中,就可以利用数字化软件对采矿方案进行模拟优化,形成最佳采矿技术方案^[1]。与此同时,在采矿生产中,基于智能化装备和监控系统,能够实时进行各项采矿技术参数和设备参数的实时监测和控制,随时根据反馈得到的生产数据和监测结果,进行生产方案调整,以确保矿山开采的精细化、自动化、高效化和安全化^[2]。

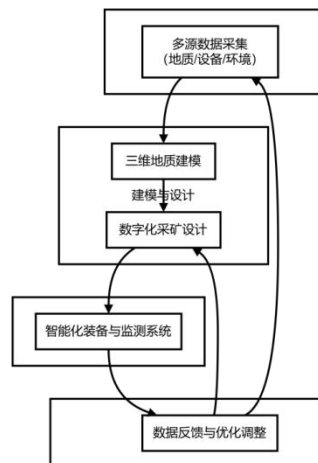


图 1 矿山精细化采矿技术体系示意图

2.2 矿山数据采集与三维地质精确建模

矿山数据采集是精细化采矿的前置基础，技术团队搭建地面勘探、井下探测、实时监测协同联动的多元数据采集体系。地面勘测环节运用地质雷达、高精度遥感、工程钻孔等技术，获取矿区地形地貌、地质构造、矿体展布等基础地质数据；井下探测依托井下钻孔施工、巷道地质编录等手段，补充矿体深部赋存特征数据；实时监测借助矿区布设的各类传感器，采集边坡位移、地下水位、设备运行参数等动态数据。采集完成的各类数据按照统一标准格式存储至矿山数据管理系统，为后续建模工作提供数据支撑^[3]。三维地质建模依托 3DMine 专业矿业软件，整合多源采集数据构建高精度动态矿山三维地质模型。模型运用地质统计学方法完成矿体品位空间插值分析，直观呈现矿体形态与品位分布特征；结合地质雷达探测数据与钻孔数据，精准圈定断层、破碎带等不良地质体，明确其空间展布范围与产状特征。模型搭载动态更新模块，新增勘探数据与生产数据可实时修正模型参数，保障模型与现场实际地质条件高度契合。该模型为采矿设计优化、现场施工指导、边坡安全评估提供精准数据支撑，破解传统地质认知模糊的行业痛点。

2.3 基于数字化的采矿设计优化

高精度三维地质模型为采矿设计提供核心依据，技术团队借助数字化采矿设计软件完成采矿方案的模拟推演、比选优化，达成设计环节的精细化与科学化。设计优化围绕三大核心模块展开：

一是剥采方案优化贴合矿体形态与品位分布特征，选用台阶式剥采工艺，科学划定剥采台阶的高度与宽度参数。软件模拟 8—12m 台阶高度、60-70° 台阶坡面角的多组方案，对比分析剥采效率与生产成本，确定最优参数组合。复杂地质区域推行分区分段剥采策略，主动避让断层、破碎带等不良地质体，降低现场施工安全风险。

二是结合三维地质模型优化爆破参数，模拟不同孔径、孔深、装药量、起爆顺序的爆破效果，完成参数迭代优化。坚硬岩层适当提升装药量与钻孔孔径，破碎岩层采用小药量、多分段的爆破方式，降低爆破扰动对边坡稳定性的影响。参数优化提升爆破块度均匀性，减少二次破碎作业的成本投入^[4]。

三是优化采掘和运输计划。结合选矿厂的生产需求搭建剥采进度与选矿生产的协同管控机制，软件模拟不同采掘强度、运输路径的原料供给效率，确定采掘工作面数量、设备配置与运输路线方案，运用最短

路径算法优化运输路线，缩减设备运输里程与能耗损耗，提升物料运输流转效率。

2.4 智能化采矿设备与监测系统的集成应用

智能化采矿设备与监测系统的集成应用是实现整个采矿生产过程自动化的关键所在^[5]。首先，通过引入各种自动化采矿设备，如自动化钻机、远程遥控铲运机等先进装备，可以实现整个作业过程的自动控制，提高作业效率，并降低作业安全风险。其次，通过各类监测设备和仪器能够形成全方位的监测体系，例如通过设置边坡位移传感器、地下水水位传感器、振动传感器等仪器，能够实时监测边坡稳定性、地下水动态、爆破振动等关键指标，当监测数据超出阈值时，自动发出声光预警；而对于各类重要设备也可以利用传感器监测设备的运行参数，实时评估设备运行状态，预测设备故障，尽可能降低设备故障风险。除此之外，在生产过程中，也可以通过互联网整合采掘、运输、破碎等环节的数据，实时统计矿石产量、品位等指标，为生产调度提供数据支撑。监测系统采集的数据会实时上传至矿山数字化管理平台之中。为矿山的可视化监控和智能调度奠定良好基础。

3 精细化采矿技术在锂矿项目的工程应用与实践

3.1 项目概况

非洲津巴布韦某锂矿采用露天开采模式，每年能够开采达 200 万吨的锂辉石精矿，但该矿区的地质构造复杂，存在多条断层和破碎带且交错发育，这就导致在该矿区内的矿石品位分布也存在显著差异。前文已经系统分析该矿区在开采中存在的问题，如地质勘查认知不足、剥采方案设计不合理、安全管控模式滞后等问题，严重影响该矿区的开采效益和开采安全。为提升该矿区的经济效益，确保开采安全，该矿区采用了基于数字化技术的精细化采矿技术体系，围绕地质勘察、采矿方案制定和采矿技术应用三方面分别进行了现有技术方案的升级优化，有效促进了开采效率和经济效益的提升。具体技术的实施过程和经验如下。

3.2 精细化采矿技术的具体实施

(1) 精细化采矿技术在地质指引中的应用：三维地质模型作为现场施工的核心技术依据，为矿山全阶段施工提供精准地质指引。矿体勘探阶段，技术人员依托模型呈现的矿体边界和品位分布特征，优化钻孔布设方案，精准锁定矿体延伸范围，提升矿体边界界定精度，解决传统勘探地质认知模糊的问题；剥离施工阶段，模型精准标识断层、破碎带等不良地质体空间位置，现场采用避让式开采工艺，科学规划剥离作

业时序,减少无效剥离工程量与施工安全隐患;采矿作业阶段,结合模型品位分布规律划分差异化开采区域,推行分区域开采工艺,科学排布开采顺序,保障入选矿石品位稳定达标,为选矿厂连续生产提供优质原料供给。

(2)精细化采矿技术在采矿方案优化中的应用:技术团队严格执行数字化优化后的采矿方案,有序推进现场生产作业。剥采方案实施环节,结合矿体品位分布与地质条件,动态调整台阶高度与坡面角参数,平衡开采效率与边坡稳定性,降低边坡垮塌安全风险;在爆破作业环节,依托三维地质模型的岩石力学参数,动态优化爆破参数,根据岩层硬度差异调整装药结构与起爆顺序,提升爆破块度均匀性,缩减二次破碎作业量。项目搭建剥采进度与选矿生产的联动管控机制,通过矿山数字化管理平台实现生产数据实时共享,依据选矿生产需求动态调整剥采强度,保障原料供给连续稳定。运输环节借助数字化软件优化运输路径,缩短矿石运输里程,降低运输能耗与时间成本,提升矿山整体生产流转效率。

(3)精细化采矿技术在采矿监测中的应用:智能化监测系统全面投入运行,构建覆盖全流程、全区域的生产管控体系。安全监测系统覆盖矿区关键风险区域,实时监测边坡稳定性、地下水动态等核心安全指标,数据异常时立即发出预警指令,技术人员快速采取防控处置措施,防范安全事故发生;设备监测系统实时采集采矿设备运行状态数据,精准评估设备健康状况,实现设备故障提前预判与预防性维保,提升设备出勤率,减少故障停机对生产进度的影响;生产监测系统整合采掘、运输各环节生产数据,实时统计矿石产量与品位指标,针对品位波动及时调整开采调度策略,保障入选矿石品位稳定,维持选矿厂高效生产运行。

3.3 技术融合过程中的难点与解决方案

精细化采矿技术在矿山现场应用成效显著,实施

过程中仍面临三类现实难点。多元数据整合难度较大,不同勘探设备、监测传感器的数据格式不统一,数据碎片化问题突出,无法直接用于三维建模与方案优化。项目搭建统一的数据融合平台,对不同格式数据开展标准化处理与清洗筛选,形成高质量有效数据,夯实数据整合基础。三维模型更新存在滞后性,矿区复杂地质条件导致开采过程中不断出现新地质问题,模型与现场实际地质条件脱节。项目建立模型动态更新机制,定期将新发现的地质信息录入模型并修正参数,每月开展一次补充勘探,将新增钻孔数据同步更新至模型,保障模型精准反映最新矿体形态与品位分布。智能化设备兼容存在障碍,新增智能化设备与传统采矿设备在数据传输、指令控制方面存在适配问题。项目逐步推进传统设备智能化改造,加装传感器与数据传输模块,在数字化管理平台增设设备兼容接口,实现各类设备的集中统一管控。

3.4 应用效果分析

在应用上述精细化采矿技术后,锂矿的采矿效率和资源回收率分别提升了30%和8%,而安全事故发生率则降低了80%。项目实施期间未发生安全事故,矿山的经济效益和安全效益都得到了显著提升。

4 结语

数字技术融合的矿山精细化采矿技术体系,构建感知、建模、设计、控制、反馈的闭环管控架构,实现地质认知精准化、采矿设计科学化、生产执行智能化、安全管控实时化,有效破解复杂地质条件下露天锂矿开采的技术瓶颈。该锂矿工程实践验证,精细化采矿技术体系可显著提升采矿效率、资源回收率与矿山安全水平,降低生产运营成本,为矿山高质量发展提供技术支撑。后续矿山建设需持续深化数字技术与矿业工程的融合应用,推进绿色矿山建设与数字化技术协同发展,实现采矿作业的低碳化与绿色化转型。

参考文献:

- [1] 何世荣.数字化转型赋能矿山高质量发展[J].中国水泥,2024,(11):27-32.
- [2] 单波.数字化矿山系统及智能化在矿井中的运用[J].中国高新科技,2023,(11):49-51.
- [3] 刘伟.数字化矿山系统及智能化在矿井中的应用[J].产业创新研究,2022,(20):88-90.
- [4] 王鹏飞.基于矿山数字化开采技术要点探究[J].矿业装备,2022,(05):182-183.
- [5] 李辉,高维亚.面向数据挖掘的数字化矿山建设全域模型[J].能源与节能,2022,(07):204-206.