

自然崩落法放矿计划与管理系统研发与应用研究

周 成¹, 赵崇延¹, 李志钧¹, 张 爽^{2,3}, 肖天勇¹, 胡明川¹

(1. 云南迪庆有色金属有限责任公司, 云南 迪庆 674400;

2. 长沙迪迈科技股份有限公司, 湖南 长沙 410221;

3. 矿山透明地质与数字孪生技术国家矿山安全监察局重点实验室, 湖南 长沙 410011)

摘要: 自然崩落法作为厚大、破碎矿体高效回采的主要方法, 其放矿过程易受矿岩块度、品位空间变异与地质条件变化的影响, 导致矿石损失与贫化, 制约资源回收与经济效益的提升。为此, 研发了一套面向自然崩落法的放矿计划与管理系统, 旨在通过系统化计划编制、智能化控制决策与可视化生产管理, 全面提高放矿管理水平和经济效益。本系统采用“平台+插件”的软件体系架构与“视图层-核心层-数据层”的三层架构, 集成方案设计、放矿计划、生产管理三大核心功能, 并结合 PostgreSQL 数据库与空间数据扩展, 实现统一存储与高效访问。现场应用表明, 系统将日出矿品位稳定在约 0.32%, 日内品位波动控制在 $\pm 0.01\%$, 资源回收率提升约 0.5%; 按既定产量与金属价格估算, 因减少金属损失而实现的年直接经济价值约为 922.2 万元。研究结果表明, 该系统可为自然崩落法矿山提供高效的放矿决策支持, 具有良好的工程适用性与推广价值。

关键词: 自然崩落法; 放矿管理; 放矿计划; 生产管理; 资源价值模型; 数据库管理; 智能决策系统; 矿山信息化

中图分类号: TD67; TD853.36 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2026)02-0068-12

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2025.12.18

自然崩落法是一种依赖岩体自身重力作用实现矿石破碎与回收的地下采矿方法, 常用于具有一定厚度、结构松散或破碎的矿体。相较于其他采矿方法, 自然崩落法具有回采规模大、成本低、机械化程度高等优势^[1-3]。但在实际生产过程中, 由于矿岩块度的不确定性、矿岩混合的不均匀性, 以及矿体品位在空间上的显著变异性^[4-5], 导致放矿过程极易出现矿石损失和贫化, 直接影响资源回收率与经济效益。

放矿控制与管理是自然崩落法矿山采矿的关键环节之一^[6]。放矿过程的精准计划、动态调整与信息反馈, 直接关系矿山生产的稳定性和经济性。传统的放矿管理方法多依赖人工经验进行排产和控制, 效率低, 难以适应矿岩条件不断变化和突发情况频发的实际需求。随着数字矿山、智能采矿等理念的推进, 矿山企业亟需一种集“优化、控制、管理”为一体的智能化放矿系统, 以提升放矿管理的科学化与信息化水平。

近年来, 国内外学者围绕自然崩落法的放矿

优化与控制开展了多方面的研究, 包括基于随机介质理论的矿岩流动模拟、基于混合整数规划的放矿计划优化、基于资源价值模型的最佳放矿高度计算等, 均为放矿规律研究与排产计划制定提供了理论支撑。如朱忠华等结合随机介质理论与属性块体模型, 开发三维流动模拟方法, 分析不同放矿高度和块度条件下的品位分布与形态演化^[7]; 朱霆等研究普朗铜矿底部拉底形式, 优化断面参数, 提升了崩落效率并减少底部失稳事件^[8]; 黄明清等通过三维漏斗流动模拟, 分析了不同漏斗布置方案对矿石损贫率和品位稳定性的影响, 为优化结构参数提供了决策依据^[9]; 王连庆等利用 PFC2D 对自然崩落法矿体进行颗粒流模拟, 预测了矿体在首次底部拉底时及连续崩落时的半径参数, 并验证了模型在模拟力学机理和形态变化上的有效性^[10]。除上述研究外, 各类放矿控制系统也在实践中逐步应用, 包括 M3 管理系统、PC-BC 商业软件等^[11]。这些系统普遍存在集成度低、数据管理分散、扩展性不足等问题, 难以在

收稿日期: 2025-12-29; **修回日期:** 2026-01-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC2909500, 爆落矿岩散体时空运移数字孪生与运搬工艺智能化管控技术)

三维可视化环境下实现真正意义上的放矿优化控制与智能化管理,无法满足矿山企业对高效、灵活、可视化管理系统的实际需求^[12-14]。

因此,本研究从自然崩落法放矿生产的实际需求出发,围绕系统化计划编制、智能化控制决策、可视化生产管理三大目标,开展放矿计划与管理系统的研发,旨在全面提升自然崩落法放矿管理的数字化与智能化水平。

1 系统架构

为满足自然崩落法放矿计划与管理在复杂业务逻辑处理、多源数据融合及三维可视化表达等方面的需求,构建基于“视图层-核心层-数据层”的系统架构体系(图1)。该架构通过对系统功能进行分层解耦,实现界面展示、业务逻辑与数据存储的清晰分工。



图1 系统架构图

Fig. 1 System architecture diagram

1.1 视图层

视图层作为系统的人机交互层,主要负责放矿相关信息的可视化展示、用户操作的交互响应,以及业务指令的输入输出。该层以桌面图形界面为核心,采用 Qt 与 WinForms 实现系统主界面与功能模块的集成,并通过 Docking 窗口管理机制支持多视图、多窗口的灵活布局,提升复杂工程信息展示的可操作性。在可视化实现方面,视图层集成包括 OpenGL、DirectX 与 Vulkan 在内的多种三维图形渲染技术,以支撑矿体模型、放出矿柱、崩落面、放矿高度面等三维实体对象的高效绘制与交互式显示,并通过对三维场景的实时渲染与动态更新,直观反映放矿过程中的空间结构与状态变化。此外,视图层提供了包括鼠标拾取、属性查询、对象选择与剖切操作在内的多样化用户

操作支持,便于用户在三维环境中对放矿点、分层结构及相关属性开展精细化分析。视图层通过统一接口将用户操作请求传递至平台核心层,并接收处理结果进行实时反馈。

1.2 核心层

核心层作为系统的业务逻辑与功能调度中枢,负责放矿方案设计、计划编制、生产管理等核心业务的实现,为系统插件化扩展与服务管理提供运行环境。平台核心层通过插件注册与发现机制实现功能模块的解耦与动态加载,支持不同业务模块的按需启用与扩展。结合插件生命周期管理与动态加载机制,使系统在不影响整体运行的前提下具备良好的可维护性与扩展性。在公共技术支撑方面,平台核心层集成了参数管理、日志系统,以及权限与用户管理等公共服务模块,用于统

一管理系统运行参数、记录关键操作与计算过程。在模型处理方面,平台核心层内置几何与模型内核,用于管理放矿点、矿体模型及相关空间对象。该内核支持几何对象管理、三维实体拓扑关系维护及空间索引构建,为放矿方案设计、分层品位计算与空间分析提供底层支撑。

1.3 数据层

数据层主要承担放矿相关数据的存储、管理与高效访问任务,为平台核心层的业务计算与视图层的结果展示提供可靠的数据支撑。对于业务数据管理,系统采用 PostgreSQL 作为核心业务数据库,用于存储放矿方案、计划编制结果、生产记录等结构化数据,实现放矿全过程数据的集中化管理与持久化存储。对于空间数据,引入 PostgreGIS 构建空间数据库,用于存储矿体模型、放矿点空间结构及三维实体几何数据。结合空间索引与空间查询机制,支撑三维模型分析与空间关系计算需求。对于高频访问数据与缓存,采用 Redis 构建缓存与中间数据存储层,用于管理系统实时状态信息、高频访问数据及内存缓存内容,降低数据库访问压力并提升系统响应性能。

2 系统设计与原理

2.1 方案设计

在自然崩落法采矿过程中,合理的放矿方案设计是实现高效出矿与控制贫损的重要前提^[15-17]。为适应复杂地质条件和经济目标的动态变化,本系统在方案设计模块中引入了以资源价值为核心的优化模型,综合考虑矿岩分布、品位变化及经济参数,构建全过程优化机制。

系统根据矿体几何形态与地质边界条件,对目标开采区域进行空间离散处理,在确定放矿水平范围与边界条件的基础上,将放矿区域沿垂向划分为若干等厚分层单元,用以刻画自然崩落过程中矿岩自上而下迁移与混合的规律。设第 i 个分层内包含多种矿岩类型,根据质量占比和对应品位,可计算该分层的混合品位

$$\bar{g}_i = \sum_j w_{ij} g_{ij}, \quad \sum_j w_{ij} = 1 \quad (1)$$

式中: $\bar{g}_i$ —第 i 分层的混合品位,%; w_{ij} —第 i 分层中的 j 矿岩的质量占比,%; w_{ij} —第 i 分层中的 j 矿岩的品位,%。

在给定放矿高度(H)条件下,参与出矿的分

层数量随高度变化而动态调整。总体出矿品位由各分层品位按其出矿量加权计算求得,可反映放矿高度变化对矿石品位的综合影响。

在分层品位计算的基础上,进一步引入资源价值模型对不同放矿方案进行经济评价,包括不同高度下的可采矿量、金属量与潜在收益等。则在放矿高度 H 条件下的可回收金属量见式(2),对资源价值函数定义见式(3)。

$$M_H = \sum_{i=1}^{k_H} Q_i \cdot \bar{g}_i \cdot \eta, \quad (2)$$

$$V(H) = P \cdot M_H - C \cdot \sum_{i=1}^{k_H} Q_i. \quad (3)$$

式中: M_H —在放矿高度为 H 条件下的可回收金属量, t; Q_i —第 i 层的可采矿量, t; η —矿石回收率, %; P —金属价格, 元; C —单位采选成本, 元/t; k_H —分层数。

通过对比多组放矿水平划分与放矿点布置方案在给定经济参数下的收益表现,系统自动识别出最优放矿高度与放矿点布置方式,生成具备可行性与经济性的推荐方案,为计划编制模块提供关键输入数据。总体方案优化流程见图 2。

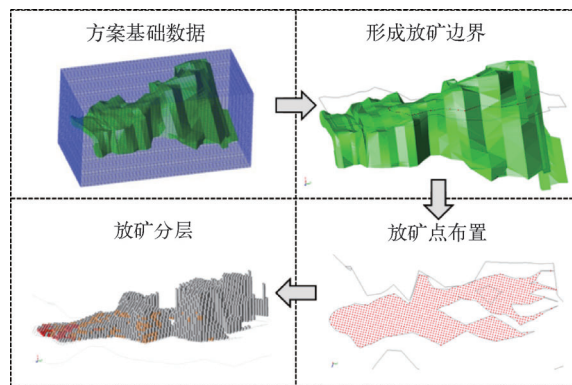


图 2 方案优化流程

Fig. 2 Solution optimization process

2.2 放矿计划

放矿计划编制是自然崩落法采矿过程中的核心环节^[18-19],其合理性直接关系到矿山资源回采的有序性与生产组织的协调性。为应对生产过程中多源约束条件与动态变化的复杂性,本系统在方案设计成果的基础上,构建了多尺度、可调控的放矿计划编制模块。该模块支持从月度计划到日常生产任务的分级排产操作,并具备动态调整与快速重构能力,以满足矿山生产过程对高时效性的要求。

放矿计划编制模块的整体逻辑见图3。系统以方案设计模块输出的优化方案数据为输入基础,导入放矿点空间分布、分层结构、最佳放矿高度及估算矿量与品位等关键参数,为计划生成提供空间与资源约束。结合生产现场约束条件,如穿脉结构、拉底推进度、矿运设备能力、通风与运输条件及生产计划目标,构建多源约束模型。目标周期内的综合出矿品位 G_t 可通过式(4)计算求得。

$$G_t = \frac{\sum_i q_{i,t} \cdot g_{i,t}}{\sum_i q_{i,t}}, \quad (4)$$

式中: $q_{i,t}$ —第 t 个计划周期内第 i 个放矿点的计划出矿量,t; $g_{i,t}$ —第 t 个计划周期内第 i 个放矿点的对应品位,%。

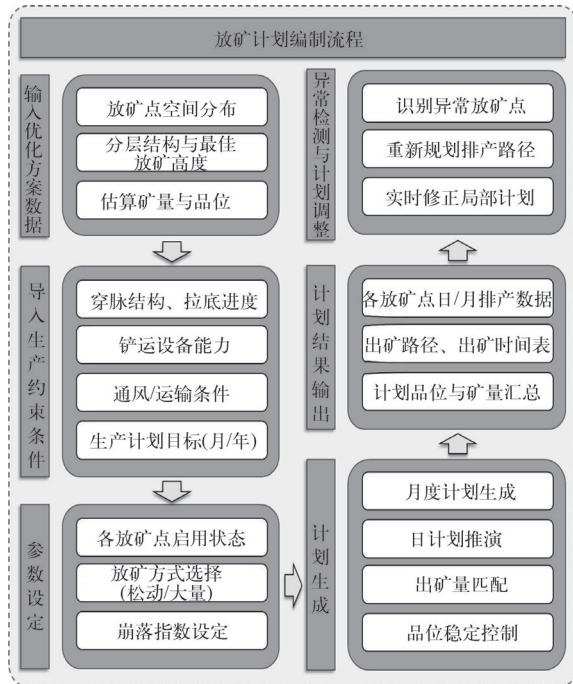


图3 放矿计划编制模块功能流程图

Fig. 3 Functional flowchart of the ore extraction planning module

在参数设定时,系统支持自定义放矿点启用状态、放矿方式及崩落指数等控制参数,然后据此自动生成计划方案,包括月度计划生成、日计划推演、出矿量匹配与品位稳定性控制等,实现从宏观到微观的分层排产过程。系统还集成异常检测与计划调整机制,当出现放矿点失效或地质条件变化等异常情况时,自动识别异常区域,重新规划排产路径,实时修正计划。

2.3 生产管理

生产管理模块面向自然崩落法采矿过程中放矿计划执行阶段的数据处理与状态反馈需求,其设计重点在于构建一套面向放矿过程的生产数据处理机制,实现生产信息从原始记录到分析表达的系统化转化^[20-21]。该模块主要围绕以下方面进行设计。

1)基于放矿点的生产数据组织与计算机制。系统以放矿点作为基本生产单元,对每日出矿量、累计出矿量及对应品位信息进行关联存储,并与放矿计划数据建立时间序列映射关系,最终基于放矿点分层品位模型与实际放矿高度信息,对不同时间段内的出矿量与金属量按式(5)进行自动核算。

$$M_{i,t} = \sum_{k=1}^n Q_{i,t}^{(k)} \cdot G_{i,t}^{(k)}, \quad (5)$$

式中: $Q_{i,t}^{(k)}$ —放矿点 i 在 t 时段的出矿量,t; $G_{i,t}^{(k)}$ —放矿点 i 在 t 时段的对应出矿品位,%; $M_{i,t}$ —放矿点 i 在 t 时段的对应金属量,t。

2)面向计划执行评估的统计分析方法。系统通过将实际生产数据与放矿计划结果进行对比,构建计划执行评估模型。该模型以时间维度(日、月)为主线,对放矿量完成率、品位偏差及累计出矿指标进行持续更新。通过引入采、供、存关系约束,在统计过程中同步反映矿石产出、运输与库存变化情况。

3)面向采动过程分析的三维模型构建机制。系统基于生产数据与地质模型的联合驱动方式,动态构建放/出矿柱、崩落面、存窿面及实际放矿高度面等关键实体模型。模型构建过程中,系统依照式(6)通过对累计放矿高度与放矿点状态持续更新。

$$H_{i,t} = H_{i,0} - \sum_{\tau=1}^t \frac{Q_{i,\tau}}{A_i \cdot \rho}, \quad (6)$$

式中: $H_{i,t}$ — t 时刻放矿点累计放矿高度,m; A_i —等效放矿截面积,m²; ρ —矿岩体密度,t/m³。

3 系统功能与应用

为满足自然崩落法采矿过程中放矿计划编制与生产执行监控的综合需求,本研究基于功能需求开发模块化、可扩展的信息化放矿管理系统。系统整体架构采用“平台+插件”的设计理念,通过功能解耦实现系统的高可扩展性与灵活性。系统由方案设计、计划编制和生产管理3个核心模

块构成,以 PostgreSQL 数据库作为底层支撑,实现数据的一体化存储与高效访问。

3.1 界面与主要功能

系统采用多模块集成式设计,由“开始”“方案

设计”“放矿计划”“生产管理”4 个功能单元组成(图 4)。其中,主界面中黄色块体为放/出矿柱三维模型,可根据实际需求叠加展示放矿点、穿脉结构、拉底线等关键工程要素。

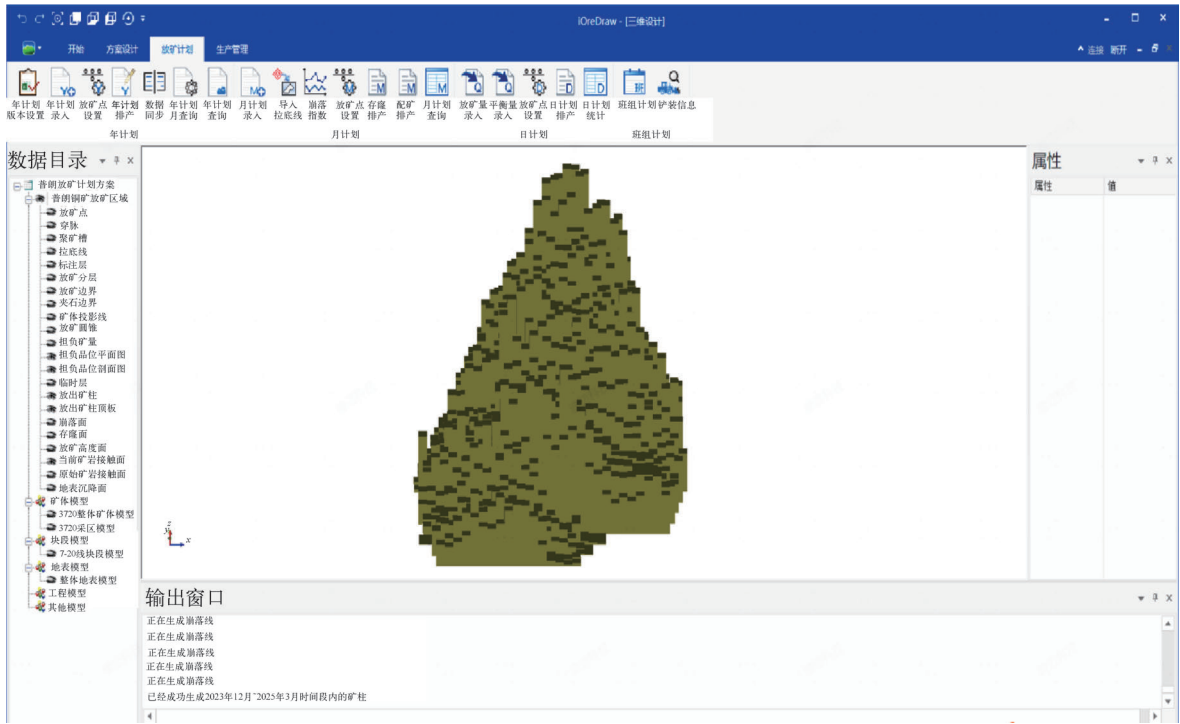


图 4 自然崩落法放矿管理软件系统主界面

Fig. 4 Main interface of the natural caving mining management software system

3.1.1 开始模块

开始模块承担系统初始化与基础环境配置功能,其功能工具面板见图 5。主要包括地质模型

与图形文件导入、方案创建与参数配置(如矿岩物理力学参数、经济参数和放矿参数等),并提供数据查询、视图控制、条件筛选与数据导出等功能。



图 5 开始模块功能面板

Fig. 5 Start module function panel

3.1.2 方案设计模块

方案设计模块是系统的核心计算单元,用于建立放矿空间模型与优化计算流程,模块功能面板见图 6。模块基于矿体几何模型与地质边界条件,自动识别开采单元,完成放矿点的布置与拓扑关系构建,并结合矿岩混合模型与资源价值评估算法,生成多种候选方案。

模块主要具备以下功能:1)自动确定最佳放矿高度与出矿边界。基于资源价值函数与矿岩混合模拟结果,自动识别最具经济价值的放矿高度区间,辅助确定最佳出矿水平与放矿边界。2)多方案对比与优选。支持多种放矿点布置与水平划分方案的并行生成,并通过统一评价指标(如单位金属产值、平均品位、单位成本)进行定量比较和综合

排序,筛选出效益最优方案。3)基于三维模型的数据集成。借助矿山三维地质数据库,方案设计模块可直接调用块段模型、矿体边界、断层线、穿脉位置等信息,实现几何模型与属性参数的统一处理。4)

支持复杂条件下的方案构建。面对渗水、冰碛物、高含泥等复杂现场环境,系统可通过设置放矿点属性标签与计划过滤规则,在设计阶段剔除高风险区域,结合实际情况提升方案的实用性。

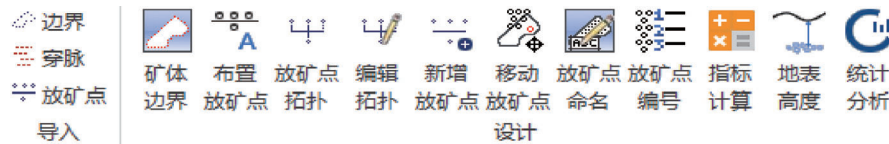


图 6 方案设计模块功能面板

Fig. 6 Solution design module function panel

生成的最优放矿方案将作为后续放矿计划编制模块的核心输入数据。系统自动提取方案中的放矿点、出矿区块、最佳高度、估算品位与矿量等关键参数,作为时间序列排产模型与铲运机调度模拟的基础条件。

3.1.3 放矿计划模块

放矿计划模块实现从中长期生产目标向具体

作业计划的分级分解与优化排产,功能面板见图 7。该模块以方案设计结果为输入,综合考虑设备能力、运输路线、拉底推进速度、通风条件及生产节奏约束等因素,通过多约束优化算法生成年、月、日多层次放矿计划。系统可根据实时数据对计划进行自适应调整,自动修正异常放矿点与动态重构排产路径。



图 7 放矿计划模块功能面板

Fig. 7 Function panel of the ore release plan module

系统支持对生产现场关键工程参数的导入与管理,包括穿脉结构、拉底线分布、运输路线、铲运机作业能力及通风条件等。这些信息作为放矿计划的边界约束条件,用于限定拉底推进节奏与各放矿点的可达性。系统在此基础上结合运输能力、作业半径及设备调度能力等因素,建立符合实际工况的放矿空间模型,为后续排产计算提供约束。

在计划生成过程中,用户可灵活设定放矿点启用状态与放矿方式,输入反映矿岩流动特性的崩落指数,并导入中长期产量计划。系统根据矿岩品位、矿量、分层结构及设备能力等综合信息,采用约束优化策略自动推演最优放矿顺序与出矿路径,生成满足年度生产目标的阶段性计划结果。

此外,系统支持对不同放矿点采用差异化控制策略,可在计划编制过程中选择“松动出矿”“大量出矿”等多种放矿方式,以适应不同区段的工程状态与生产需求。

3.1.4 生产管理模块

生产管理模块面向自然崩落法采矿过程中放矿计划执行阶段的生产监控、统计分析与结果表达需求,重点解决放矿生产数据类型多、时间跨度长、空间关联复杂等问题,其功能面板见图 8。

1)生产数据统计与报表分析功能。系统支持对放矿生产过程中矿量、品位及完成情况等关键指标进行自动计算与汇总分析。结合矿量计算、放矿口台账、采供存报表以及月计划、周计划、日计划完成情况统计等功能,实现对不同时间尺度生产数据的系统化管理。



图 8 生产管理模块功能面板

Fig. 8 Function panel of production management module

2) 二维图纸输出与图形分析功能。生产管理模块结合矿体空间结构与放矿数据,提供包括矿量高度剖面图、金属量高度剖面图、担负品位平面及剖面图在内的,多类型二维图纸输出与分析功能,直观反映放矿过程中的空间分布特征与品位变化规律。

3) 三维模型分析与可视化功能。系统基于地质模型与实际生产数据,支持构建并分析多种与放矿过程密切相关的三维实体模型,包括放/出矿柱、崩落面、存窿面、实际放矿高度面、矿岩接触面以及地表沉降面等。

通过将生产数据映射至三维空间,系统能够动态展示矿岩结构演化与采动过程特征,辅助技术人员从空间尺度综合分析放矿效果与潜在风险。

3.2 数据库系统

数据库是系统运行的核心支撑部分,承担着

放矿方案、计划数据、地质模型及生产记录等多源信息的统一管理。为满足采矿场景中高并发、复杂查询与动态更新的需求,本系统选用 PostgreSQL 作为底层数据库管理系统。PostgreSQL 具有优异的事务完整性控制、多版本并发控制以及空间数据处理能力,能够高效支撑复杂工程数据的结构化与空间化存储需求。

系统数据库采用“核心数据层—业务逻辑层—应用接口层”分层架构设计,确保数据管理的层次化与模块解耦。核心数据层负责放矿点信息、分层品位、放矿计划及设备状态等数据表的组织与索引;业务逻辑层可实现数据计算、模型映射及统计查询;应用接口层则提供与上层模块的动态交互与可视化调用。数据库管理与操作界面见图 9。

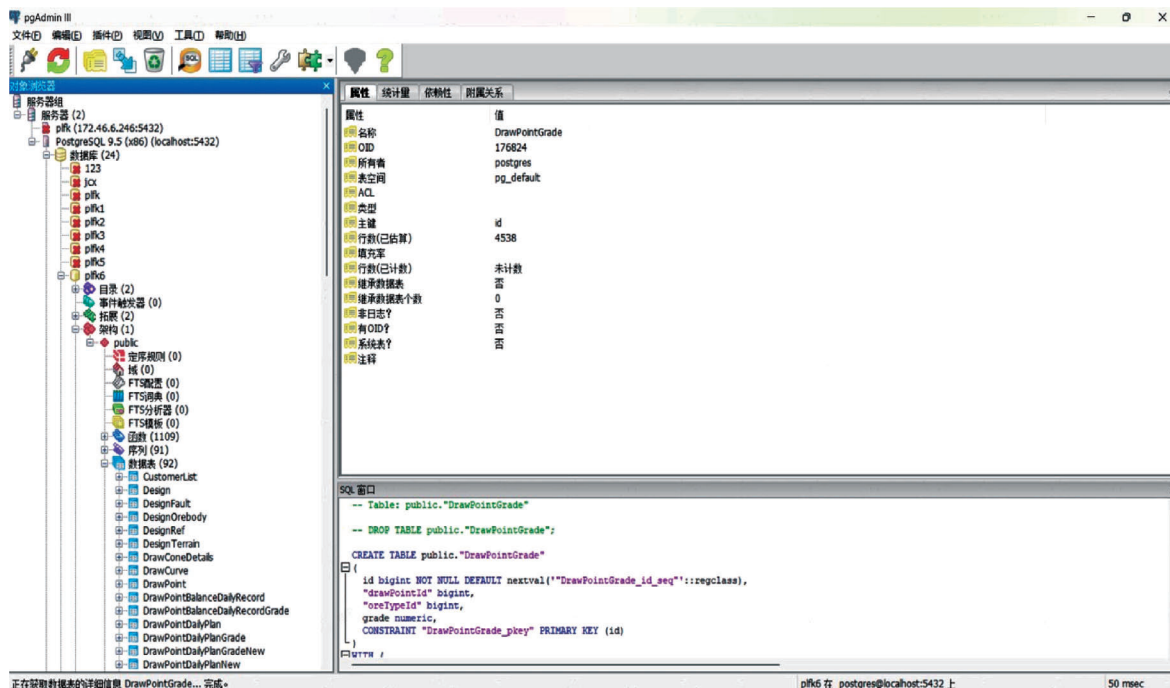


图 9 PostgreSQL 设计和管理接口

Fig. 9 PostgreSQL design and management interface

根据系统功能和数据模型特点,采用关系型数据库架构,涵盖多个功能性数据表。主要包括

设计方案数据表、放矿区域表、放矿点信息表、矿种数据表、拉底数据表、放矿点分层品位数据表、

放矿分层品位搜索模型表、日排产计划表、月度出矿计划表、每日出矿量表、放矿穿脉数据表、溜井数据表、设备数据表及系统设置表等。各数据表之间通过主键与外键建立关联,形成完整的数据逻辑体系,以支撑方案优化、计划编制及生产管理等核心功能。

表 1 和表 2 分别展示了部分设计方案数据与放矿点分层品位数据的结构定义。表中各属性依据系统功能需求和数据逻辑关系进行了规范化设计:主键(ID)用于唯一标识记录,并被定义为非空,确保数据完整性与可追溯性;外键字段(如 drawpointId、OreTypeId)用于建立不同数据表之间的关联关系,实现数据的层级映射与交互;数值型字段(如 grade、price、recoveryRatio)则用于存储与计算放矿过程中涉及的经济及技术参数。

表 1 设计方案数据表结构

Table 1 Data table structure of design scheme

列名	数据类型	是否允许为空	说明
ID	bigint	否	主键(递增 1)
name	string	是	方案名称
Cost	float	是	采选成本
Density	float	是	体重
LosenCoefficient	float	是	松散系数
AverageSpeed	float	是	平均下降速度
levelCount	bigint	是	放矿水平数量
sliceHeight	float	是	分层高度
advancingSpeed	float	是	拉底速度
price	float	是	价格
recoveryRatio	float	是	回收率
cost	float	是	采选成本

表 2 放矿点分层品位数据表结构

Table 2 Data table structure of drawpoint layered grade

列名	数据类型	是否允许为空	说明
ID	bigint	否	主键(递增 1)
drawpointId	int	是	放矿点 ID
sliceIndex	int	是	分层序号
coordX	float	否	中心点 X 坐标
coordY	float	是	中心点 Y 坐标
coordZ	float	是	中心点 Z 坐标
oreType	int	是	允许为 NULL
sliceID	bigint	是	矿岩类型(矿石或岩石)
OreTypeId	int	是	放矿分层 ID
grade	float	是	矿种 ID(矿种元素 Id)

在系统运行过程中,数据库通过统一数据总线实现与方案设计、放矿计划及生产管理模块的实时交互。用户通过界面完成数据库参数配置(图 10a)与连接(图 10b)后,系统自动完成数据解析、映射与加载,并基于地质模型生成空间化的三维放矿场景。数据读取与模型生成过程见图 10(c),其中黄色块体为三维块段模型,作为自然崩落法放矿方案设计与分层品位计算的基础数据。

此外,系统在数据库层面设计了完善的数据备份与容错机制,支持自动化日志记录、差异化备份及数据恢复操作,确保系统在长期运行中的数据安全性与稳定性。通过 PostgreSQL 的空间扩展功能(PostGIS),系统能够实现地理空间数据与矿山三维模型的联合查询与空间分析,为后续的放矿模拟、资源预测与地压风险评估提供可靠的数据基础。

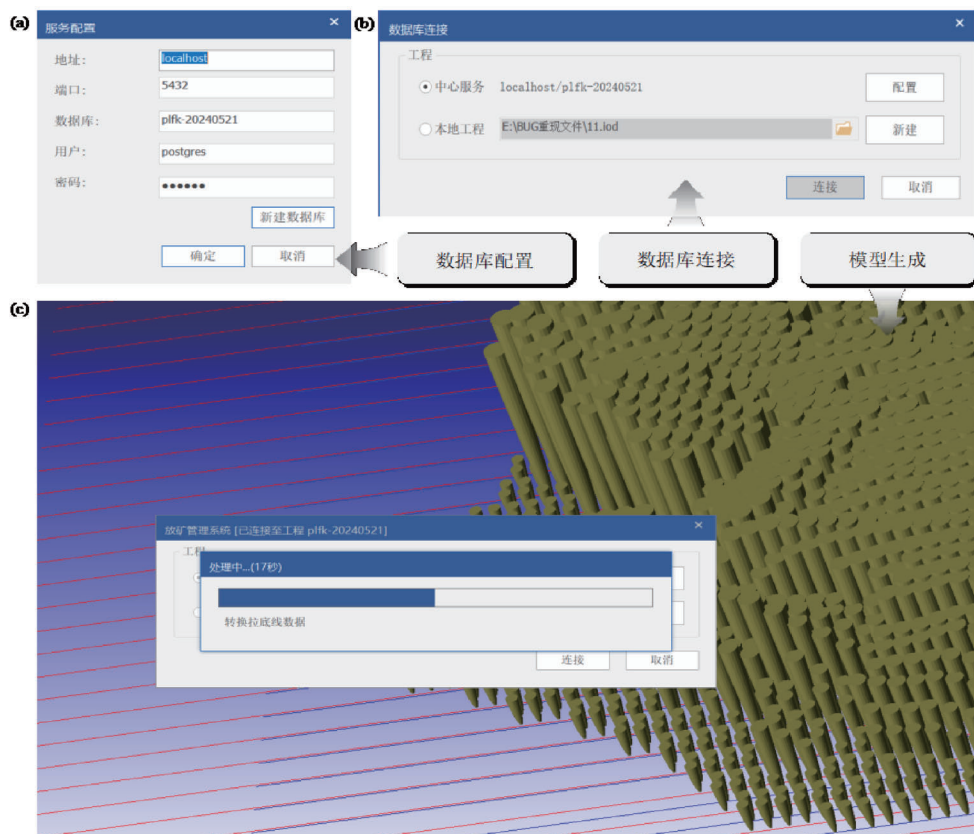
3.3 现场应用

为验证所研发的自然崩落法放矿计划与管理系统在实际生产条件下的应用效果与工程可行性,本研究于普朗铜矿开展现场应用与运行评估。通过将系统生成的放矿计划与传统经验式放矿方式进行对比分析,从出矿品位稳定性、资源回收效果及综合经济效益等方面评估应用成效。

3.3.1 应用背景

普朗铜矿位于青藏高原东南缘滇西北的高海拔山区,地形起伏大、气候寒冷湿润、冰碛物覆盖厚度大,属于典型的高寒复杂地质环境矿山。矿山采用自然崩落法进行开采,设计生产能力 1 250 万 t/a。首采区矿体崩落高度大、采动范围广,地表与井下采动响应显著。随着回采推进,首采区大部分塌陷区已与地面贯通(图 11)。其内冰碛层在强降雨条件下易沿漏斗孔向井下迁移,存在诱发井下突泥、泥石流等灾害的风险。同时,冰碛物及围岩碎屑混入正常矿石,会显著降低出矿品位,增加选矿负荷与处理成本,直接影响矿山生产的安全性与经济性。

截至 2023 年,普朗铜矿已开放矿口近 700 个,放矿系统规模大、放矿点多。其中,部分放矿点受高位卡斗、结构变形等因素影响,长期处于非正常放矿状态。上述生产特征使得传统经验驱动的放矿计划编制难以及时响应现场变化,容易造成放矿不均衡、局部过采或欠采,加剧品位波动与资源损失。



(a) 数据库参数配置; (b) 数据库连接; (c) 数据读取与模型生成过程。

图 10 从数据库读取数据生成模型

Fig. 10 Model generated from data read from the database



图 11 地表塌陷坑现场

Fig. 11 Surface collapse pit site

3.3.2 应用成果

现场应用结果表明,在系统辅助放矿控制条件下,矿山日常出矿品位稳定控制在 0.32% 左右,出矿品位日波动幅度显著减小,品位误差可控制在 0.01% 以内。

此外,系统通过对放矿高度、放矿顺序及放矿方式的综合优化,使矿石损失与贫化程度得到一定程度控制,资源回收率提高约 0.5%。在日出矿量约为 3.2×10^4 t 的生产条件下,按稳定出矿

品位 0.32% 计算,使用该系统后每日可减少铜金属损失约 0.512 t。按年工作 330 d 计,每年可减少铜金属损失约 168.96 t。依据应用期间铜价水平(约 5.458 万元/t),系统应用后每年减少的铜金属损失可创造经济价值约 922 万元。

在异常工况条件下,系统的智能调整能力得到了进一步验证。在普朗铜矿生产过程中,部分放矿点受高位卡斗、结构变形或局部渗水等因素影响,会导致阶段性停用或放矿效率下降情况。系统基于实时生产数据自动识别不可用或高风险放矿点,对放矿计划进行快速重构。通过调整相邻放矿点的放矿顺序与放矿强度,有效避免了单一区域集中放矿导致的局部贫化问题;通过对异常放矿点的临时剔除与后续补偿放矿安排,实现放矿任务在空间与时间上的重新分配,从而保障整体放矿过程的连续性与均衡性。

除直接经济收益外,系统的综合工程效益还表现在:1)稳定的出矿品位有助于降低选矿系统负荷波动,提升后续选矿流程运行的稳定性;2)系

统通过对异常放矿点和高风险区段的动态识别与计划调整,降低了放矿过程中泥石流、局部失稳等不利工程事件的发生概率,对提升矿山生产安全性与降低潜在安全成本具有积极意义。

4 结论

系统通过功能模块的层次划分,构建了“方案设计—放矿计划—生产管理”三大核心功能单元,形成数据驱动的闭环管理机制。其中,方案设计模块以资源价值模型为核心,对放矿高度与空间布置进行优化,为计划编制提供决策依据;放矿计划模块支持年、月、日多尺度排产与动态调整,支持在矿岩结构或生产条件变化时快速重构计划;生产管理模块实现从生产数据统计、报表分析到三维可视化表达的全过程监控与结果评估,显著提升放矿过程的科学性与透明度。

系统基于 PostgreSQL 平台实现放矿相关数据的集中式管理与高效访问,支持复杂查询、版本控制与数据备份等功能,确保系统在多用户协同与长期运行场景下的稳定性与可扩展性。

系统在实际矿山生产条件下运行稳定,可有效提升出矿品位控制水平与资源回收效率。系统应用后,日出矿品位稳定在 0.32% 左右,品位波动幅度控制在 $\pm 0.01\%$,资源回收率提高约 0.5%,在既定生产条件下可显著降低金属损失并带来可观的经济效益。同时,系统在异常放矿识别与风险预警方面表现出积极作用,有助于提升矿山生产安全性与运行稳定性。

未来的研究可进一步优化数据采集接口、拓展多源数据融合并结合智能算法以完善放矿预测等功能。通过持续优化与功能迭代,有望为自然崩落法采矿提供更加精准、高效与智能的技术支撑平台,推动采矿管理向智能决策方向发展。

参考文献:

- [1] 袁海平,曹平.我国自然崩落法发展现状与应用展望[J].金属矿山,2004(8):25-28.
YUAN Haiping, CAO Ping. Present status of block caving development and its application prospect in China[J]. Metal Mine, 2004(8):25-28.
- [2] 朱忠华,代碧波,陶干强,等.自然崩落采矿法研究及应用[J].金属矿山,2019(12):1-11.
ZHU Zhonghua, DAI Bibo, TAO Ganqiang, et al. Research and application overview of block caving method[J]. Metal Mine, 2019(12):1-11.
- [3] 黄明清,李兆岚,刘青灵,等.超大规模自然崩落法开采岩移非线性发展特征[J].中国安全科学学报,2025,35(7):67-74.
HUANG Mingqing, LI Zhaolan, LIU Qingling, et al. Nonlinear evolution of rock movement in ultra-large-scale block caving mining[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7):67-74.
- [4] 童建华.千米深井自然崩落法矿山块度预测及分布规律研究[J].黄金,2025,46(2):13-17.
TONG Jianhua. Study on block size prediction and distribution patterns in a kilometer-deep mine using the natural caving method[J]. Gold, 2025, 46(2):13-17.
- [5] 刘欢.罗卜岭铜钼矿可崩性评价与崩落块度控制方法研究[D].沈阳:东北大学,2021.
- [6] 李少辉,陈小伟,刘育明.自然崩落法放矿管理系统的研究与开发[J].现代矿业,2017,33(2):72-77.
LI Shaohui, CHEN Xiaowei, LIU Yuming. Research and development of ore drawing management system for natural caving method [J]. Modern Mining, 2017, 33(2):72-77.
- [7] 朱忠华,王李管,涂小腾,等.基于随机介质理论自然崩落法矿岩流动特性[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(6):869-874.
ZHU Zhonghua, WANG Liguan, TU Xiaoteng, et al. Flow characteristics of discrete ore rock of block caving based on stochastic medium theory[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(6):869-874.
- [8] 朱霆,何翔,王欢,等.自然崩落采矿法的拉底形式研究[J].采矿技术,2023,23(5):69-73.
ZHU Ting, HE Xiang, WANG Huan, et al. Study on the drawbell layout form of natural caving mining method[J]. Mining Technology, 2023, 23(5):69-73.
- [9] 黄明清,王贻明,高谦.自然崩落法漏斗放矿规律三维模拟[J].金属矿山,2018(3):151-155.
HUANG Mingqing, WANG Yiming, GAO Qian. Three-dimensional simulation of hopper ore drawing regularity in natural caving [J]. Metal Mine, 2018 (3):151-155.
- [10] 王连庆,高谦,王建国,等.自然崩落采矿法的颗粒流数值模拟[J].北京科技大学学报,2007(6):557-561.
WANG Lianqing, GAO Qian, WANG Jianguo, et al. Numerical simulation of natural caving method

- based on particle flow code in two dimensions[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007(6):557-561.
- [11] 陈小伟,刘育明,葛启发,等. PC-BC 软件在自然崩落法中的应用[J]. 中国矿山工程, 2015, 44(5): 18-20.
CHEN Xiaowei, LIU Yuming, GE Qifa, et al. Application of PC-BC software in block caving method[J]. China Mining Engineering, 2015, 44(5): 18-20.
- [12] 朱忠华,王李管,陶干强,等. 自然崩落法一体化放矿优化控制与智能化管理系统研制[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(6):83-91.
ZHU Zhonghua, WANG Liguan, TAO Ganqiang, et al. Research and development of integration system of block caving ore drawing optimization control and intelligent management[J]. Gold Science and Technology, 2017, 25(6):83-91.
- [13] 刘伟. 某露天铀钼矿资源储量可视化动态管理研究[J]. 铀矿冶, 2024, 43(4):44-51.
LIU Wei. Research on visual dynamic management of resource reserves of a open-pit uranium molybdenum mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2024, 43(4):44-51.
- [14] 王亚文,高莹超,白德威. 石头梅露天煤矿资源动态管理系统应用研究[J]. 铀矿冶, 2025, 44(1): 85-92.
WANG Yawen, GAO Yingchao, BAI Dewei. Research on the application of dynamic resource management system in Shitoumei open-pit coal mine[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2025, 44(1):85-92.
- [15] 冯兴隆,张建国,梁江波,等. 自然崩落法放矿方案优化设计及敏感性分析[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(4):80-83.
FENG Xinglong, ZHANG Jianguo, LIANG Jiangbo, et al. Optimization and sensitivity analysis on ore drawing scheme of block caving mining method[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(4):80-83.
- [16] 朱忠华,代碧波,陶干强,等. 自然崩落采矿法研究及应用[J]. 金属矿山, 2019, (12):1-11.
ZHU Zhonghua, DAI Bibo, TAO Ganqiang, et al. Research and Application Overview of Block Caving Method[J]. Metal Mine, 2019, (12):1-11.
- [17] 朱忠华,代碧波,陶干强,等. 自然崩落法放矿方案初步优化[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(8):75-81.
ZHU Zhonghua, DAI Bibo, TAO Ganqiang, et al. Preliminary optimization of ore drawing scheme of block caving[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(8):75-81.
- [18] 刘华武,王李管,冯兴隆,等. iOreDraw 放矿管理系统在普朗铜矿放矿计划编制中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(3):108-111.
LIU Huawu, WANG Liguan, FENG Xinglong, et al. Application of iOreDraw management system in making drawing program of the Pulang copper mine[J]. Mining Research and Development, 2017, 37(3):108-111.
- [19] 王荣立,张哲. 自然崩落采矿法放矿控制要素研究与管理软件开发应用[J]. 现代矿业, 2019, 35(1): 151-154.
WANG Rongli, ZHANG Zhe. Development and application of research and management system for mining control elements of natural caving mining method[J]. Modern Mining, 2019, 35(1):151-154.
- [20] 钱兵,毕林,陈鑫,等. 基于三维可视化技术的矿产资源储量动态管理方法研究及应用[J]. 铀矿冶, 2026, 45(1):48-57.
QIAN Bing, BI Lin, CHEN Xin, et al. Research and application of dynamic management method for mineral resources and reserves based on 3D visualization technology[J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2026, 45(1):48-57.
- [21] 李兴平,陈江川,何远富. 自然崩落法放矿控制管理系统开发[J]. 采矿技术, 2017, 17(3):16-18.
LI Xingping, CHEN Jiangchuan, HE Yuanfu. Development of a draw control management system for block caving mining method[J]. Mining Technology, 2017, 17(3):16-18.

Research and Application of Draw Control and Management System for Block Caving

ZHOU Cheng¹, ZHAO Chongyan¹, LI Zhijun¹, ZHANG Shuang^{2,3},
XIAO Tianyong¹, HU Mingchuan¹

(1. Yunnan Diqing Non-ferrous Metal Co., Ltd., Diqing 674400, China;

2. Changsha Dimine Co., Ltd., Changsha 410221, China;

3. Key Laboratory of Transparent Mine Geology and Digital Twin Technology, National Mine Safety Administration, Changsha 410011, China)

Abstract: The block caving is one of the most efficient mining methods for large, thick, and fragmented ore bodies. However, the draw control process is strongly affected by ore fragmentation, grade mixing, and variations in geological conditions, which often results in ore loss and dilution and consequently constrains resource recovery and economic performance. To address these issues, a draw planning and management system for block caving was developed with the aim of improving draw control efficiency and economic benefits through systematic planning, intelligent decision support, and visualized production management. The system was developed using a platform-plugin software architecture and a three-layer framework consisting of a presentation layer, a core application layer, and a data layer. It integrates three key functional modules, including scheme design, draw planning, and production management, and employs PostgreSQL with spatial data extensions to enable unified data storage and efficient access. Field application results show that the system stabilizes the daily ore grade at approximately 0.32%, with intraday grade fluctuations controlled within $\pm 0.01\%$, and increases the resource recovery rate by about 0.5%. Based on the designed production capacity and metal price, the annual reduction in metal loss is estimated to be approximately 92.22 million CNY. These results demonstrate that the proposed system provides effective decision support for block caving draw control and exhibits strong engineering applicability and promotion potential.

Key words: block caving; draw management; draw planning; production management; resource value model; database management; intelligent decision-making system; mine informatization