

基于目标规划的露天矿多元素配矿优化

王李管^{1,2}, 宋华强^{1,2}, 毕林^{1,2}, 陈鑫^{1,2}
(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学数字矿山研究中心, 湖南长沙 410083)

摘 要: 针对爆堆品位分布不均时,露天矿多元素多卸矿点配矿而造成配矿时间长、配矿结果粗略等问题,提出了基于目标规划的露天矿自动化配矿优化方法.将爆堆离散化为若干规则单元块,采用地质统计学方法,以岩粉取样数据为基础,实现对爆堆品位的精细化预测;考虑元素配矿优先级的同时,以品位偏差最小为目标函数,建立基于目标规划的露天矿配矿优化模型;用C++语言编程并调用LPSlove求解器求解,输出露天矿配矿优化方案并自动圈定爆堆采掘范围.该方法应用于内蒙古某大型多金属露天矿,配矿解算快速,其配矿结果在品位指标允许的误差范围之内,极大提高了配矿效率.

关 键 词: 多元素;配矿;精细化预测;目标规划;自动圈定

中图分类号: TD 804 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)07-1031-06

Optimization of Open Pit Multielement Ore Blending Based on Goal Programming

WANG Li-guan^{1,2}, SONG Hua-qiang^{1,2}, BI Lin^{1,2}, CHEN Xin^{1,2}
(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Center of Digital Mine Research, Central South University, Changsha 410083, China. Corresponding author: BI Lin, E-mail: mr.bilin@163.com)

Abstract: On account of long-time ore blending with multi elements & ore dropping points, and rough ore blending upon the uneven grade distribution of blast heaps, so an open pit automation ore blending method based on goal programming was put forward. Blasting heap was discretized into a number of cell block, then based on the sampling data of rock powder, the accurate prediction the grade of blasting heaps was realized by use of the geostatistics method. Considering the priority of ore blending and taking the minimum grade deviation as the objective function, the optimization model of the open pit ore blending based on goal programming was established. Using C++ language programming and solving the model by the LPSlove, then output the open pit ore blending optimization scheme and enclose the areas of mining area automatically. The method is applied to a large polymetallic open pit in Inner Mongolia, resulting in a quick ore blending computation time, a good ore blending result within the range of allowable error, and a high-efficiency of ore blending.

Key words: multielement; ore blending; accurate prediction; goal programming; automatic enclosing

配矿又称矿石质量均衡,为了达到选厂品位要求,对品位高低不同的矿石,按比例进行相互搭配,尽量使之均匀混合^[1].传统配矿模式主要通过人工手动的方式,通常是炮孔岩粉取样数据的算术平均计算爆破区域的平均品位,人工选择参与配矿的爆堆、圈定爆堆采掘范围.这种凑配矿方式粗略,需要反复调整才能得到相对合理的配矿方案.

随着市场竞争加剧,矿山已由粗放式生产管理向精细化生产管理模式转变,传统的配矿模式远远不能满足矿山的需求,为了提高配矿效率,运筹学优化的思想开始广泛运用于矿业研究中.

Wilke 和 Reimer 初次提出运用线性规划方法,通过给各采场赋予不同优先开采级别的权系数,建立配矿模型来编制露天矿短期计划^[2];Gu 等结合地理信息系统技术、GPS 定位技术和 GPRS 传输技术,建立了包括露天矿采剥和运输调度的露天矿配矿管理系统^[3];Souza 等在动态卡车分配的基础上研究露天采矿作业计划问题(OPMOP),目标是在保证产量和品位的前提下使得卡车数量最小化^[4];Huang 等提出了圆周几何约束模型用于求解露天矿配矿问题,模型能很好地描述爆堆开采过程中各矿块间的开采先后顺序,起到了初步优化的效果^[5]. 常规的多目标算法不能有效解决配矿的各种实际要求^[6-8],鉴于此,Xu 等^[9]提出了基于模糊性的两步式多目标配矿方法,较好地协调了多目标规划模型中各目标函数间的冲突;各种启发式算法也相继运用于配矿实践当中,如姚旭龙等提出的基于免疫克隆选择算法求解地下矿配矿模型,并用 Java 编制实现^[10],都取得了不错的效果.

然而上述研究成果真正用于配矿生产中还有一定的难度. 其主要原因在于:①将各爆堆或出矿点看作品位均匀的优化对象,对爆堆内矿石品位难以精确预知,难以保证配矿结果的准确性;②人工圈定采掘范围未考虑电铲的移动情况,电铲频繁的移动可能降低其工作效率;③更重要的是当选厂品位要求比较苛刻,约束条件复杂,而计划出现偏差时,实际参与供矿爆堆品位达不到标准,配矿模型难以收敛. 基于此,本文提出了一种基于目标规划的配矿方法,将爆破区域划分成若干个离散单元块,根据炮孔岩粉数据进行距离幂次反比法估值,然后以品位偏差最小为目标函数,建立基于目标规划的露天矿配矿优化数学模型,配矿结果以天为单位统计量,依据当前经济效益严格控制每日的矿量与出矿品位.

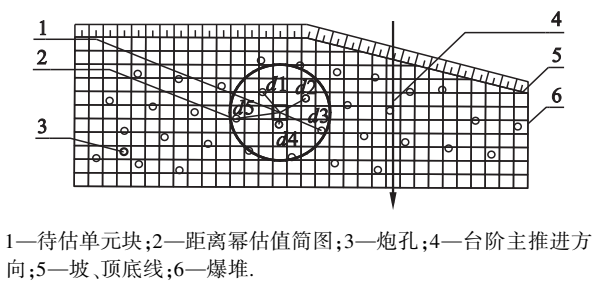
1 配矿原理

1.1 爆堆品位分布预测

掌握各爆堆的品位分布是进行配矿的首要条件. 爆堆的品位信息一般通过炮孔岩粉取样、爆堆取样、生产勘探取样或块段模型估值获得,而炮孔岩粉取样获取的样本数量多、分布均匀. 此外,便携式荧光分析仪的快速应用,也大大缩短了样品化验时间,所以用岩粉取样数据作为配矿的基础数据. 借鉴块段模型的构建方法,将爆破区域划分成规则的离散单元块,单元块的高度等于台阶高

度,长度和宽度在参考露天矿配矿相关资料(岩粉化验采样密度和配矿精细化程度要求)的基础上,根据矿山实际情况设定,边界部分单元块的尺寸根据爆堆轮廓线来确定. 爆破后,岩石会出现抛掷、移动,而大多数金属矿山采用松动爆破,这种爆破方式使岩石破碎后移动幅度不大,爆堆品位分布与爆破前台阶上品位分布基本相同,所以本文不考虑爆破后岩石抛掷的情况. 实现对爆堆品位分布预测,主要利用炮孔取样数据,采用距离幂次反比法对各单元块品位进行估值,这种方法是一种与距离有关的插值方法,在计算插值点取值时按“距离越近,权重越大”的原则,用若干邻近点的线性加权来拟合估计点的值,其基本步骤:①以被估值单元块中心为圆心,以 R 为半径做圆,确定影响范围;②计算落入影响范围内每一样品点与被估单元块中心的距离;③利用距离幂公式计算单元块的品位. 图 1 所示为距离幂次反比法估算爆堆品位,基本原理就是每个单元块的品位等于周围炮孔岩粉化验数据的加权平均,权系数为炮孔距待估单元块中心距离 k 次方的反比. 若 g_i 为第 i 个炮孔的品位值, d_i 为第 i 个炮孔距待估块段中心的距离,则待估块段的品位 g 为

$$g = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^k} g_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^k} \right). \quad (1)$$



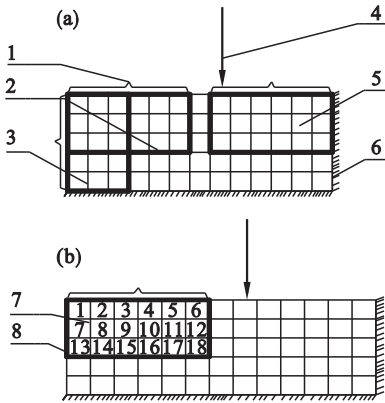
1—待估单元块;2—距离幂估值简图;3—炮孔;4—台阶主推进方向;5—坡、顶底线;6—爆堆.
图 1 距离幂次反比法估算爆堆品位
Fig. 1 Distance power inverse ratio method to estimate the grade of blasting heap

1.2 露天矿配矿数学优化模型构建

露天矿日配矿属于短期计划,需要满足选厂的品位指标,提高高、低品位矿石的利用率,但是选厂下达的品位指标比较苛刻时,如果月计划略微出现偏差,出矿点的品位偏低或者偏高,以线性规划进行日配矿解算,很可能出现无解,故以品位偏差最小为目标函数建立基于目标规划的露天矿配矿优化模型. 这样的话除考虑绝对约束外,还考虑软约束,也就是目标约束,找到最接近品位要求的配矿方案. 为提高配矿的准确性,将爆堆离散化,则单元块为配矿的最小单元,而参与配矿的单元块编号定义包括爆堆位置、单元块的索引、推进

方式、卸矿点位置,按运筹学中目标规划的基本概念及形式,则目标规划的决策变量定义 $x_{i,j,p,k}$ 为 0-1 变量,当 $x_{i,j,p,k} = 1$ 时,表示第 i 个爆堆的第 j 个单元块在第 p 种推进方式下供给卸矿点 k ; 否则 $x_{i,j,p,k} = 0$ 。

推进方式 P_i 指根据台阶主推进方向及自由面方向(设备能作业的方向)可能的采掘方式。采场提供的台阶主推进方向以及自由面,根据适用电铲效率的采掘宽度和电铲的日生产能力,产生出多种可能的推进方式,如图 2a 所示。通过配矿优选推进方式,统计其单元块累积矿量、平均品位,如图 2b 所示。



1—采掘宽度; 2—推进方式 P_1 ; 3—推进方式 P_2 ; 4—台阶主推进方向; 5—推进方式 P_3 ; 6—非自由面; 7—编号; 8—优选推进方式。

图 2 电铲推进方式及采掘方案

Fig. 2 Mode of excavator propulsion and mining scheme

(a)—电铲推进方式; (b)—采掘方案。

配矿以品位均衡为目标函数,而针对多元素配矿,就存在主要元素、次要元素、有害元素等配矿优先级的问題,故定义目标函数为

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{e \in E} \gamma_e (g_{k,e}^- + g_{k,e}^+). \quad (2)$$

式中: k 为卸矿点的索引,卸矿点主要指破碎站、选厂或贮矿厂; e 为矿石中参与配矿的元素的索引; K 为卸矿点的集合, $k \in K$; $g_{k,e}^- \geq 0$ 为负偏差变量,卸矿点 K 中元素 e 品位小于最小品位要求的偏差, $g_{k,e}^+ \geq 0$ 为正偏差变量,卸矿点 K 中元素 e 品位大于最大品位要求的偏差; $\gamma_e > 0$ 为元素配矿优先级系数,当多种元素参与配矿时,根据权重系数大小优先满足选厂品位要求。

1) 共用爆堆约束,矿山将参与配矿的爆堆供给多个卸矿点。为满足配矿的要求,对于品位较高的爆堆,分别送到多个卸矿点进行配矿,共用爆堆约束条件如下:

$$x_{i,j,p,1} = x_{i,j,p,k}, \quad \forall i \in M, j, p, k. \quad (3)$$

2) 优选爆堆约束,如果爆堆 i 是优选爆堆,

则 $x_{i,j,p,k} = 1$, 即必须优先参与配矿。出于工程考虑,如道路设计或减少电铲移动等,必须优先开采这部分矿石,其约束如下:

$$\sum_j \sum_p \sum_k x_{i,j,p,k} = K, \quad \forall i \in M \& i \in S; \quad (4)$$

$$\sum_j \sum_p \sum_k x_{i,j,p,k} = 1, \quad \forall i \notin M \& i \in S; \quad (5)$$

$$\sum_j \sum_p \sum_k x_{i,j,p,k} \leq K, \quad \forall i \in M \& i \notin S; \quad (6)$$

$$\sum_j \sum_p \sum_k x_{i,j,p,k} \leq 1, \quad \forall i \notin M \& i \notin S. \quad (7)$$

式中: S 为优选爆堆集合; 式(4)指爆堆 i 既属于共用爆堆又属于优选爆堆时,爆堆必须参与配矿且供给所有卸矿点; 式(5)指爆堆 i 不属于共用爆堆,属于优选爆堆时,爆堆必须参与配矿且只供给某一卸矿点; 式(6)指爆堆 i 属于共用爆堆,不属于优选爆堆时,爆堆 i 可能参与配矿,如果参与配矿,则爆堆供给所有的卸矿点; 式(7)指爆堆 i 既不属于共用爆堆也不属于优选爆堆,自动配矿时该爆堆可能不参与配矿,如果参与则供给某一卸矿点。

3) 爆堆日生产能力约束。爆堆生产能力太小将无法满产量要求,同时不能超出设备的最大生产能力,其约束如下:

$$\left. \begin{aligned} C_i &\leq \sum_j \sum_p (m_{i,j,p} \sum_k x_{i,j,p,k} \mu) \leq \bar{C}_i, \\ \forall i, \text{ if } i \in M, \mu &= \frac{1}{k}; \text{ else } \mu = 1. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $m_{i,j,p}$ 为第 i 个爆堆在第 p 种推进方式下的第 0 到 j 个单元块的矿量累加值; μ 为系数,当爆堆 i 属于共用爆堆时,该爆堆配矿量平均分配到各卸矿点; $\underline{C}_i, \bar{C}_i$ 为第 i 个爆堆的最小、最大生产能力。

4) 备用爆堆约束。当爆堆 i 剩余矿量低于最小生产能力,即 $\sum_j \sum_p (m_{i,j,p} \sum_k x_{i,j,p,k} \mu) < \underline{C}_i$ 时,选取较近的爆堆为备用进行配矿,若爆堆 i 剩余矿量为 m 吨时,备用爆堆约束如下:

$$\left. \begin{aligned} \underline{C}_i &\leq \sum_j \sum_p [(m + m_{i',j,p}) \times \sum_k x_{i,j,p,k} \mu] \leq \bar{C}_i, \\ \forall i, \text{ if } i \in M, \mu &= \frac{1}{k}; \text{ else } \mu = 1. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: i' 为备用爆堆; m 为爆堆 i 剩余矿量,若爆堆 i 参与配矿,则采完爆堆 i 然后接着采备用爆堆,备用爆堆的选取一般选择离爆堆 i 距离较近的爆堆,减少采掘设备的移动。

5) 卸矿点日处理能力要求。如破碎站每天所能处理的矿石量,约束如下:

$$\left. \begin{aligned} \sum_i \sum_j \sum_p (m_{i,j,p} x_{i,j,p,k} \mu) &= E_k, \\ \forall i, \text{ if } i \in M, \mu &= \frac{1}{k}; \text{ else } \mu = 1. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, E_k 为卸矿点 k 的日处理能力, 为所有供给卸矿点 k 的爆堆供矿量总和。

6) 供矿的爆堆数限制。供给某卸矿点的爆堆数最大限制, 其约束如下:

$$\left. \begin{aligned} \sum_i \sum_j \sum_p (x_{i,j,p,k}) &= N_k, \\ \forall k, \text{ if } i \in M, \mu &= \frac{1}{k}; \text{ else } \mu = 1. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: N_k 为供矿给卸矿点 k 的最大爆堆数目要求, 主要与当日采场能正常工作的铲装设备相关。

7) 卸矿点元素 e 的最小品位要求约束:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sum_i \sum_j \sum_p (m_{i,j,p} x_{i,j,p,k} \mu g_{i,j,p,e})}{\sum_i \sum_j \sum_p (m_{i,j,p} x_{i,j,p,k} \mu)} + g_{k,e}^- &\geq \underline{G}_{k,e}, \\ \forall k, e, \text{ if } i \in M, \mu &= \frac{1}{k}; \text{ else } \mu = 1. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

8) 卸矿点元素的最大品位要求约束:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sum_i \sum_j \sum_p (m_{i,j,p} x_{i,j,p,k} \mu g_{i,j,p,e})}{\sum_i \sum_j \sum_p (m_{i,j,p} x_{i,j,p,k} \mu)} - g_{k,e}^- &\geq \overline{G}_{k,e}, \\ \forall k, e, \text{ if } i \in M, \mu &= \frac{1}{k}; \text{ else } \mu = 1. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中, $\underline{G}_{k,e}$, $\overline{G}_{k,e}$ 为卸矿点 k 对于元素 e 的最小、最大品位要求。卸矿点品位约束表示进行配矿后平均品位满足选厂品位要求。

该模型是针对多元素、多卸矿点的通用型配矿模型。考虑元素配矿优先级, 以品位偏差最小为目标函数, 当计划出现偏差时, 即使配矿条件达不到品位指标, 根据现有约束也能求得最接近品位要求的配矿方案。

1.3 配矿算法流程

配矿的算法流程如图 3 所示。

步骤 1 进行爆堆单元块划分及估值, 准备配矿所需的基础数据, 包括单元块矿量、品位等信息;

步骤 2 配置参数, 包括采掘设备的日生产能力、采掘宽度, 根据台阶主推进方向, 搜索可能的推进方式, 并统计单元块累积矿量、平均品位;

步骤 3 设置配矿元素优先级、爆堆属性, 如优选、共用、备用爆堆、选厂生产能力以及选厂入选品位等约束条件;

步骤 4 进行配矿模型解算, 计算配矿后品位偏差;

步骤 5 输出品位偏差最小的配矿方案。

其优势主要在于: ①考虑爆堆中元素品位分布的不均匀性, 对爆堆进行离散化, 以岩粉取样数据为基础, 利用距离幂次反比法, 实现对爆堆品位的精细化预测, 配矿结果更加准确; ②实现共用爆堆、优选爆堆以及备用爆堆等约束, 贴合工程实际; ③数学模型的构建基于目标规划, 考虑配矿元素的优先级, 相对于线性规划, 目标规划不仅考虑绝对约束, 而且考虑目标约束(软约束), 更具有适用性。

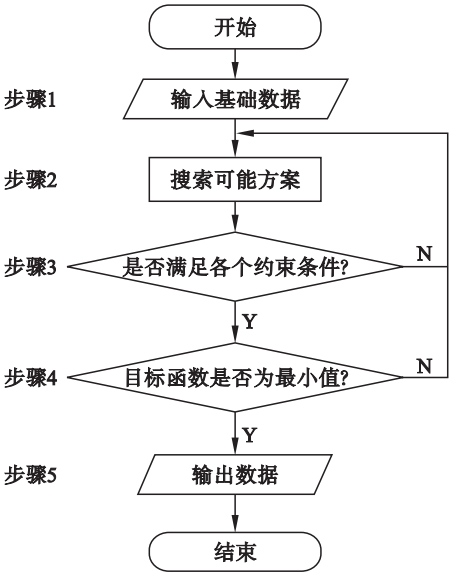


图 3 模型的算法流程

Fig. 3 The arithmetic flow chart of model

2 实例应用

2.1 矿山概况

内蒙古某多金属露天矿, 属于低品位大型斑岩铜钼矿, 年采剥总量在 8 000 万 t, 年出矿能力达到 2 600 万 t, 单日出矿量达到 80 000 t, 采场矿石品位波动较大, Cu 平均品位在 0.268%, Mo 平均品位在 0.042%, 台阶高度 15 m, 铲装设备包括电铲、大型液压挖掘机达到 40 多台, 电铲日产能力在 12 000 ~ 15 000 t, 运输车辆达到二百多辆; 共有 A、B 破碎站, 每个破碎站日处理矿量 4 万 t 左右, 破碎站需要同时满足选厂铜、钼入选品位, 选厂 Cu 入选品位 $(0.325 \pm 0.003)\%$, 即 0.322% ~ 0.328% 之间, Mo 入选品位 $(0.023 \pm 0.003)\%$, 即 0.020% ~ 0.025% 之间。

2.2 数据准备

根据矿山情况, 选择当日能参与配矿爆堆 8 个 765 - 128, 765 - 144 - 1, 765 - 145, 765 - 23, 780 - 148, 780 - 149, 780 - 325, 795 - 394 - 1, 获

取其岩粉取样数据,将爆堆划分为尺寸 2 m × 2 m × 15 m 的单元块(边界单元块尺寸根据爆堆轮廓确定),顺序编号,矿石体积质量为2.7 t/m³.以岩粉数据为基础进行距离幂次反比法估值,估值时选取离待估单元块最近的 5 个炮孔数据进行估值,幂次取 2,表 1 所示为估值完成后各单元块品位信息.

表 1 单元块基本信息

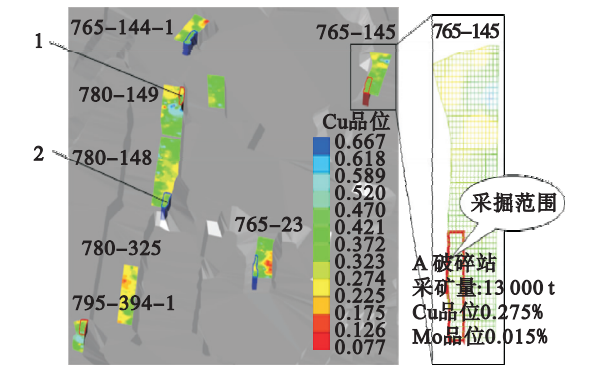
Table 1 Basic information of cell block

爆堆	单元格 序列	尺寸 m ²	矿量/t	Cu 品 位/%	Mo 品 位/%
765-128	1	2 × 2	162	0.384	0.010
	2	2 × 2	162	0.384	0.009
	3	2 × 2	162	0.389	0.009
	4	2 × 2	162	0.377	0.011
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
780-148	1 167	2 × 1.5	121.5	0.420	0.039
	1 168	2 × 1.7	137.7	0.406	0.039
	1 169	2 × 1.8	145.8	0.399	0.038
	1 170	2 × 2	162	0.413	0.040

2.3 模型求解

设定台阶主推进方向、适用电铲效率的采掘宽度 50 m,根据电铲日生产能力、破碎站处理能力,在爆堆网格上搜索可能的推进方式,设置爆堆是否优选、是否共用及是否需要添加备用爆堆情况,设置 Cu,Mo 元素的配矿优先级,优先级系数

均取 1,供矿爆堆数限制为 5,求出品位偏差最小的配矿方案,其实现过程主要在 Microsoft Visual Studio 2010 环境下用 C++ 语言编程并调用 LPSolve 求解器求解,操作环境主要为 Windows7,64 位系统,4 GB 内存,i5 处理器.图 4 所示为自动配矿解算后采场配矿方案图,其中红色线框指供矿给 A 破碎站,蓝色线框指供矿给 B 破碎站.表 2 所示为某日配矿方案,包含当日卸矿位置、供矿位置、供矿量、供矿品位、采掘范围以及总的金属量.



1—供矿给 A 破碎站;2—供矿给 B 破碎站.
图 4 采场配矿方案图
Fig. 4 Scheme of stope ore blending

2.4 结果分析

现统计一周内 Cu,Mo 元素品位波动情况,如图 5 所示.

表 2 某日配矿方案

Table 2 One day ore blending scheme

卸矿位置	供矿爆堆	供矿 Cu 品位/%	供矿 Mo 品位/%	当日总供 矿量/t	平均 Cu 品位/%	平均 Mo 品位/%	位置	面积/m ²	Cu 供矿 量/t	Mo 供矿 量/t
A 破碎站	765-128	0.359	0.010	13 000			红色线	333	4 665.960	130.689
	765-145	0.275	0.015	13 000	0.323	0.021	圈范围	309	3 569.176	190.164
	795-394-1	0.334	0.036	14 000			内	348	4 673.144	500.752
B 破碎站	765-144-1	0.251	0.006	15 000			蓝色线	373	3 761.730	86.100
	765-23	0.365	0.016	12 000	0.325	0.021	圈范围	299	4 374.516	186.348
	780-148	0.375	0.044	13 000			内	323	4 876.118	569.530

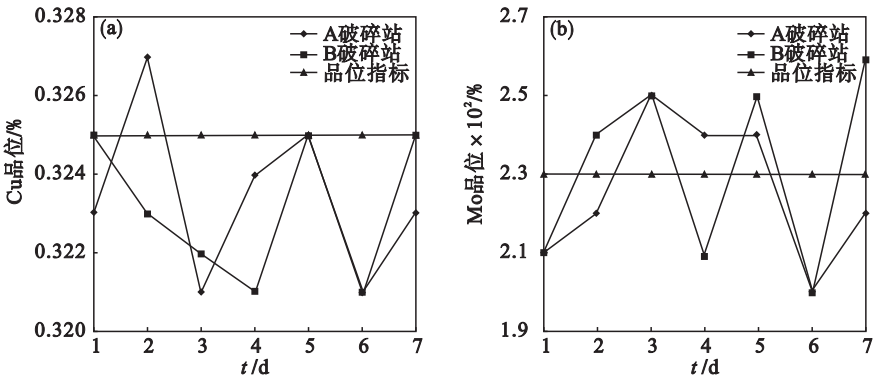


图 5 配矿后元素品位波动图
Fig. 5 Grade wave diagram of element after ore blending
(a)—Cu 元素; (b)—Mo 元素.

可以求得一周内 Cu 元素选矿厂入选品位与品位指标的标准差为 0.002 3% ,小于给定的品位偏差 0.003% ;Mo 元素入选品位与品位指标标准差为 0.001 7% ,小于给定的品位偏差 0.003% ,满足配矿要求. 配矿解算时间方面刚开始由于爆堆推进方式选择较多、爆堆供给量充足,所以很快就能找到优化方案,随着连续配矿推进爆堆供给量不足,需要备用爆堆来供矿,解算时间相对长一点,但整体都在 1 min 之内.

3 结 论

1) 实现对爆堆的离散化,利用地质统计学方法根据岩粉取样数据精确预测爆堆元素品位分布.

2) 针对多种元素多个卸矿点的复杂露天矿配矿问题,考虑元素配矿优先级的条件下,以品位偏差最小为目标函数,建立了基于目标规划的露天矿配矿优化模型,并应用于内蒙古某铜钼矿.

3) 实现配矿爆堆的自动选择及采掘范围的自动化圈定;按天为单位统计量,严格控制每日的出矿品位,配矿结果在品位指标允许的误差范围之内,避免了堆场混匀二次配矿,减少转运;在配矿效率方面,本文的配矿方式在保证出矿量及出矿品位的同时,1 min 之内就能得到合理的配矿方案,极大地提高了配矿效率.

参考文献:

[1] 王青. 采矿学[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.
(Wang Qing. Mining science [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2007.)
[2] Wilke F L,Reimer T H. Optimizing the short term production schedule for an open-pit iron ore mining operation [C]//

Society of Mining Engineers . New York,1979;21 – 25.
[3] Gu Q H,Lu C W,Guo J P, et al. Dynamic management system of ore blending in an open pit mine based on GIS/GPS/GPRS [J]. *Mining Science & Technology*,2010, 20 (1):132 – 137.
[4] Souza M J F,Coelho I M,Ribas S,et al. A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem [J]. *European Journal of Operational Research*,2010, 207 (2):1041 – 1051.
[5] Huang J X,Wang L G,Xiong S M,et al. Circle geometric constraint model for open-pit mine ore-matching and its applications [J]. *Journal of Central South University of Technology*,2012,19 (9):2598 – 2603.
[6] Xu T J,Yang P. Application of improved genetic algorithm in mine ore blending [C]//The 3rd International Symposium on Modern Mining & Safety Technology. Fuxin, 2008: 174 – 179.
[7] 袁怀雨. 合理入选品位整体动态优化[J]. 北京科技大学学报,2002,24 (3):239 – 242.
(Yuan Huai-yu. United dynamic optimization study on the rational beneficiation feed grade [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*,2002,24 (3):239 – 242.)
[8] Li L,Xu T, Liu Z. A fuzzy multi-objective optimization algorithm in mine ore blending [C]// The 2nd International Joint Conference on Computational Science and Optimization (CSO 2009). Sanya,2009:773 – 776.
[9] Xu T J,Yang P, Liu Z Q. Mine ore blending planning and management based on the fuzzy multi-objective optimization algorithm [C]//International Seminar on Business and Information Management. Wuhan,2008:38 – 41.
[10] 姚旭龙,胡乃联,周立辉,等. 基于免疫克隆选择优化算法的地下矿山配矿[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33 (5): 526 – 531.
(Yao Xu-long,Hu Nai-lian,Zhou Li-hui,et al. Ore blending of underground mines based on an immune clone selection optimization algorithm [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*,2011,33 (5):526 – 531.)