

基于三维仿真和动态评估的露天矿采剥顺序优化

杨彪,罗周全,陆广,张旭芳,鹿浩

中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083

摘要 矿石品位分布无序,导致矿山不同采剥顺序所得经济效益差别很大,为获得优越的矿山排产方案,提出了基于三维仿真和动态评估的露天矿开采顺序优化方法。利用三维仿真技术实现复杂露天矿山矿岩多层次约束的动态开挖,获得每年矿岩采剥量及出矿品位。根据矿山总图布置、采剥位置和发展方式计算矿岩运距,进行矿山设备选型,进而估算矿山基建投资,在矿产品预测售价基础上计算各方案净现值,经比较确定最优开采顺序。以某大型钨矿为例,在矿业软件 Surpac 中创建了地质块体模型并进行品位估算和价值参数赋值,然后通过矿石售价折扣方式获得系列嵌套境界方案,根据矿山实际条件,借助 MineSched 软件通过多种约束手段对采剥方案进行排产,运用经济动态评估方法确定了最优采剥方案。

关键词 露天矿山;采剥顺序;三维仿真;矿床模型;动态优化

中图分类号 TD261

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.08.008

Open Pit Mining-stripping Sequence Optimization Based on 3D Simulation and Dynamic Evaluation

YANG Biao, LUO Zhouquan, LU Guang, ZHANG Xufang, LU Hao

School of Resources and Safety, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract The disorder distribution of ore grade leads to different economic benefits caused by different stripping order. In order to obtain superior mine scheduling scheme, the paper proposed a mining sequence optimization method based on 3D simulation and dynamic assessment. By 3D simulation, the dynamic excavation of complex open mine under multi-level constraints was realized, and excavation quantity and grade of ore were obtained. According to mine general layout, stripping position and development, the calculation of transport distance, equipment selection, and infrastructure investment evaluation were carried out. And then combining the mineral advance price, the net present value of each scheme models was calculated. And finally the best optimization scheme through comparing NPV was determined. Take one molybdenum mine as example. First create a geological block model in the Surpac, and then assign the mine grade and value to the model, finally obtain series nest limit schemes by discounting price. According to the actual mining conditions, using MineSched software, the mining-stripping schemes were scheduled through various constraint means, and the optimal scheme was determined by applying the dynamic economic assessment.

Keywords open pit mine; mining-stripping sequence; 3D simulation; deposit model; dynamic optimization

0 引言

露天开采的时空发展顺序是矿床开采过程中极具战略性的关键因素^[1]。矿床在地壳中的赋存条件千差万别,不同采剥顺序所得基建工程量、采出矿石品位、生产平衡剥采比、矿岩运距等结果均不相同,进而导致矿山投资及收益的差异较

大,严重影响着矿山的总体经济效益^[2]。资金的时间特性表明,越早开采高品位矿石且尽量降低并平衡前期岩石剥离,可获得更好的经济结果,而矿石品位的分布无序及矿岩的开挖时间的不确定性给最优采剥顺序的寻找带来很大难度。

矿山排产规划是进行矿岩采剥顺序优化的基础,目前主

收稿日期:2010-8-20;修回日期:2011-01-28

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAK22B04-12)

作者简介:杨彪,博士研究生,研究方向为矿山数字化开采及安全预警等,电子邮箱:ybcusu@163.com;罗周全(通信作者),教授,研究方向为矿山开采与安全预警数字化理论与技术,电子邮箱:lzq505@hotmail.com

要有数学规划法和试错法两类^[3-4]。数学规划法是在一定假设条件下对目标函数求解的一种准数学方法,但在生产实际中很多约束使其无法以准确的函数表达,故该法目前多处于理论研究阶段。试错法在露天矿山排产规划方案制定中应用较为普遍,该法是基于计算机模拟开采的一种人机交互方法,根据矿床实际情况,在主观经验或其他辅助判断基础上进行矿山排产模拟,目前已发展为基于矿块品位模型下的三维仿真模拟,例如 Gemcom 公司的 MineSched 排产规划模块可在矿床块体模型基础上进行快捷的采剥规划仿真模拟^[9]。

在排产方案基础上利用经济动态评估方法进行采剥发展顺序优化比较。本研究采取矿块价值参数约束的方式获得系列扩帮境界,利用进度计划三维仿真技术完成了复杂露天矿山动态开挖模拟,实现矿岩时间属性赋值,将矿石预测售价代入已具有时间属性的矿岩块中,计算境界方案净现值(Net Present Value, NPV),经多方案比较确定最优采剥顺序。矿岩采剥顺序的合理规划不仅能够降低采矿成本、提高生产效率,而且能实现开采效益最大化,对矿区的开发具有重要指导意义。

1 排产计划的三维仿真技术

相互嵌套的系列境界方案是实现排产优化的基础。式(1)是 L-G 法获得境界的矿块价值总和,其中 v_i 是单矿块体积, α_i 为矿块密度, g_i 是矿块品位, p_0 是矿产品售价,通过对矿产品售价打折或进行边界品位约束等方式可获得系列境界文件^[5-6]。

$$Q = \sum_{i=1}^n v_i \alpha_i g_i p_0 \quad (1)$$

露天采剥方法在大的方面可分为延伸法和扩帮法,其中延伸法包括水平分层逐层延伸、多台阶扩帮延伸、分期扩帮多台阶延伸及倾斜分层延伸法。有色类矿山多用延伸法采矿,各方法可同时嵌套应用,例如倾斜分层延伸时可在分条境界带采用多台阶扩帮延伸等方法^[7]。图 1 为一典型的倾斜分层延伸采剥方法,分层境界为 5 部分,由内往外逐坑发展,图中 W 为废石, O_i 为矿石,采出矿岩分别运往矿石破碎站和废石场。

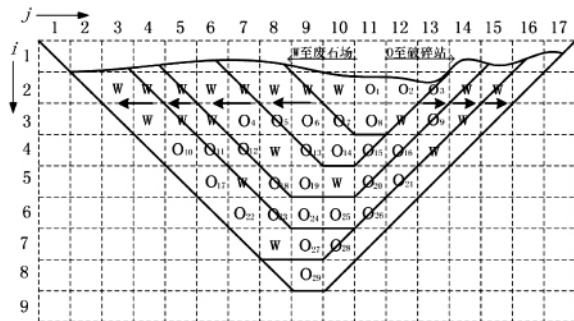


图 1 系列境界方案和采剥发展顺序示意

Fig. 1 Schematic diagram of series limit and mining sequence

露天矿排产计划三维仿真模拟的基础是已进行矿石品位、矿岩比重等参数赋值的矿床原始块体模型,进度计划的编排是对该块体模型的再编辑。图 2 为三维仿真排产方法的流程图,在已有的原始块模型基础上通过境界坑、地表模型、矿体模型等实体模型调整开挖位置,也可通过调整设备能力、台数约束开挖进度,利用开挖方向和台阶要素控制开采方向、平台宽度和工作台阶数。经排产后可输实体模型等格式的动态采剥过程视频,能逼真地展示采剥发展顺序,还可获得已具时间属性的排产后块体模型、实体模型、线文件等格式的分期彩显图、采剥推进图等,最终能生成月、年度等每期采剥报表及采剥矿岩块位置坐标,还可自动绘制进度计划甘特图。

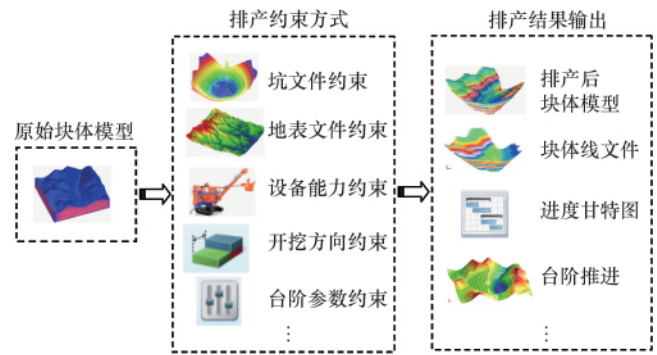


图 2 进度计划的三维仿真模拟方法流程

Fig. 2 Flow chart of mine schedule in 3D simulation

2 采剥方案的制定和动态评估

矿山采剥方案主要受限于矿山品位分布、矿区地形、矿区总图布置、采剥发展顺序等因素。首采区一般布置在高品位区段,即小境界坑内,根据矿体形态和地形布置开段沟,同时也要考虑到废石场、破碎站、选场等工业设施的位置关系,条带境界间的过渡必须保证足够的工作平台宽度且应适时地进行境界间扩帮过渡。制定多组排产方案,利用排产计划的三维仿真技术实现各方案,进而获得各采剥方案的基建剥离量、年度矿岩采剥量、出矿品位等数据,由此可进行基建投资、年收益、年采剥费用等计算,通过计算各方案 NPV 进行优化选择^[8]。采剥方案的 NPV 计算式为

$$F_{NPV_i} = \sum_{l=1}^n \frac{Q_{ore}(\hat{C}_i(l) - C_{ore}) - Q_{rock} C_{rock} - C_f(l)}{(1+r)^{l-1}} \quad (2)$$

式中, F_{NPV_i} 为第 i 个采剥方案的净现值, $\hat{C}_i(l)$ 为预测所得未来第 l 年的矿石金属元素单位重量售价, Q_{ore} 、 Q_{rock} 分别为第 l 年开采的矿石、岩石量, C_{ore} 、 C_{rock} 分别为矿石、岩石的生产成本, r 为贴现率。 $C_f(l)$ 为第 l 年投资额。

3 应用实例

3.1 矿山概况

某矿为一大型铜钼矿床,矿石成分以钼为主,伴生铜金

属,矿石平均品位不高。矿体埋藏浅,水文及工程地质条件简单,开采环境良好,适于露天采矿。根据矿山地表数据及原始勘探数据,运用普通克立格法,在 Surpac 中建立矿床地质品位模型^[9]。图 3 是矿床块体模型与地表模型和最终境界的复合图,由图可知,矿体赋存于山脊之上,其两边为山谷,地形变化比较剧烈。

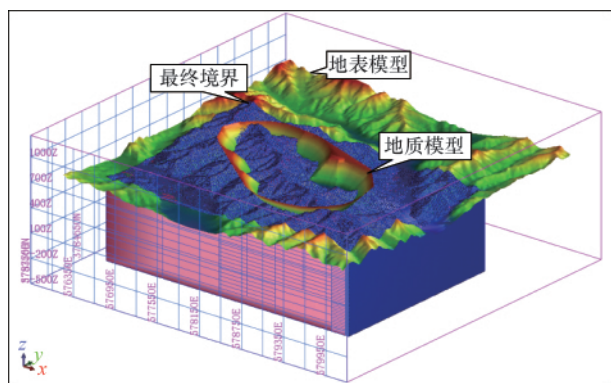


图 3 矿床块体模型、地表模型及最终境界复合图

Fig. 3 Composite map of deposit block, terrain model and last limit

3.2 排产方案制定及优化分析

根据表 1 所示矿山主要优化参数,在矿石开采回收率为 98%,选矿回收率 Mo 为 85%,Cu 为 83%时,利用当量品位方式对品位模型进行价值参数赋值,形成具备价值权值的经济模型^[10]。

表 1 优化参数表

Table 1 Optimization parameter

边坡角/(°)		精矿含金属售价/(万元·t ⁻¹)			成本/(万元·t ⁻¹)		
西南部	其他	铜	钼	选矿费用	采矿成本	剥离成本	其他
47	45	5.5	22	45.5	11.5	10.8	35

利用 L-G 法,采取矿石售价折扣方式获得图 4 所示 5 个嵌套境界方案,由内往外分别为 Pit1、Pit2、Pit3、Pit4、Pit5。经统计,获得各境界间矿量、废石量、品位等结果,详见表 2。

矿体呈带状沿山脊分布,倾角约 80°,平均厚度 42m。根据地形特征,废石堆场布置于采场西北端,废石采用汽车运输直接排放;矿石粗碎站布置在境界附近,采用汽车+破碎+皮带的矿石运输工艺。根据矿区地形特征及总图布置以 Pit1、Pit2 作为不同首采坑,在各自上盘、下盘和靠近废石场的端部布置剥离平台并逐坑扩帮过渡,分别制定了 6 种采剥方案(方案 I~方案 III 以 Pit1 为首采坑,按上盘、下盘和端部次序命名各方案,方案 IV~方案 VI 同前)。按 1 万 t/d 规模利用 MineSched 编排进度计划^[9]。经对排产后块模型统计可获得基

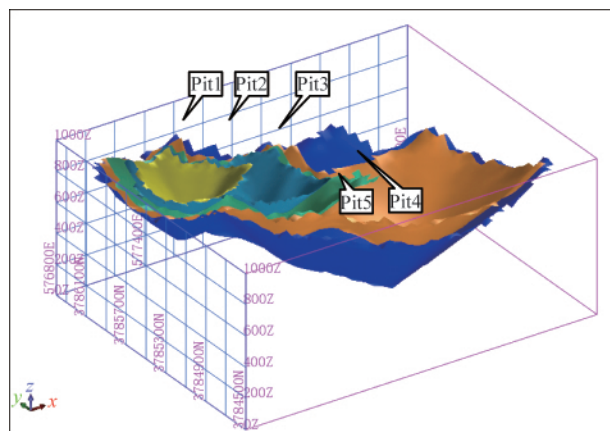


图 4 系列境界坑叠加图

Fig. 4 Overlay map of series pit model

表 2 境界间矿岩统计结果

Table 2 Statistical result of series limit

境界方案	矿量/(万 t)	废石量/(万 t)	Mo 品位/%	剥采比/(t·t ⁻¹)	扩帮宽度/m
Pit1	1366	2839	0.074	2.08	50~70
Pit2	1574	4257	0.071	2.70	40~60
Pit3	1633	6196	0.072	3.79	>100
Pit4	5757	27635	0.072	4.80	50~80
Pit5	8076	39016	0.071	4.83	—

建工程量、逐年矿岩采剥量、矿石年均品位、详细的开采位置等信息,结合总图布置可以计算出各方案的矿岩平均运距,各参数见表 3。

表 3 采剥方案统计

Table 3 Statistics of mine stripping scheme

项目	方案 I	方案 II	方案 III	方案 IV	方案 V	方案 VI
基建工程量/(万 m ³)	546.3	484.8	490.9	496.1	441.8	455.7
最大均衡剥采比/(t·t ⁻¹)	4.82	4.51	4.34	4.45	4.12	4.23
矿石平均运距/km	1.85	1.85	1.85	1.68	1.68	1.68
废石平均运距/km	2.91	2.64	2.24	2.91	2.64	2.24

根据表 3 数据可估算各方案基建剥离、总图和采矿设备等费用,统计年废石剥离量,计算年现金流出量,根据年平均出矿品位、采出矿量及金属预测售价计算年现金流入量,按式(2)计算各方案 NPV。图 5 为折现率取 12%时各方案净现值及基建投资柱线图,由图可知,方案 V(以 Pit2 为首采境

界,沿矿体下盘纵向布置台阶,横向推进,并逐坑扩帮过渡)的 NPV 值最大,基建投资最少,故采用方案 V 作为最终矿山采剥方案。

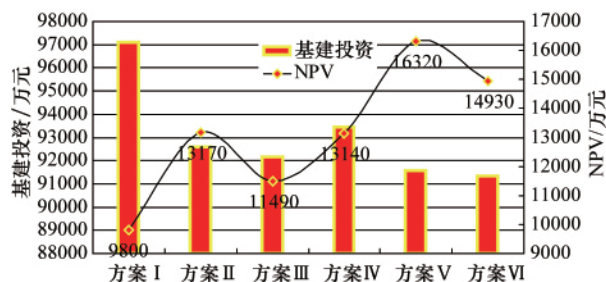


图 5 采剥方案 NPV 及基建投资柱线图
Fig. 5 NPV and infrastructure investment

4 结论

本研究对露天矿山的三维动态采剥顺序优化方法及实施步骤做了说明,结合 L-G 境界优化方法及进度计划编排软件实现了系列境界方案生成和矿山排产三维仿真,并将该方法在某矿山进行了应用,得出如下结论。

(1) 矿山进度计划的三维编排方法可视化程度高、操作灵活,可以根据需要实时调整台阶发展方向、工作平台宽度和同时采剥台阶数,短时间内可完成多套采剥方案,提高了工作效率。

(2) 通过块模型价值参数约束方法可以获得系列嵌套境界,为进度进化编排奠定了基础,且根据嵌套境界可判断矿山最有价值的开采位置,如实例中 Pit1、Pit2 境界内矿石品位较高且剥采比小。

(3) 受生产规模和开拓、备采矿石量限制,首采区的选择及扩帮过渡区间均对矿山总体效益影响较大,如 Pit1 境界范围较小,达到生产规模及开拓、备采矿量要求必须进行纵深较大的基建剥离,且 Pit1 和 Pit2 境界间的过渡太快,影响了矿山整体效益。

(4) 剥离位置的选择制约着生产均衡剥采比和矿岩运距,导致设备投入和剥离成本分布不同,对矿山基建投资及

整体经济效益均有影响。

参考文献 (References)

[1] 牛成俊. 现代露天开采理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 174-178.
Niu Chengjun. Theory and practice of surface mine exploit in modern[M]. Beijing: Science Press, 1990: 174-178.

[2] 郑友毅, 王青, 顾晓薇. 露天煤矿开采计划的整体动态优化[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1054-1056.
Zheng Youyi, Wang Qing, Gu Xiaowei. Journal of Coal Science and Engineering, 2009, 34(8): 1054-1056.

[3] 李建祥, 王青. 多时段露天开采短期计划优化[J]. 金属矿山, 2001, 298(4): 1-3.
Li Jianxiang, Wang Qing. Metal Mine, 2001, 298(4): 1-3.

[4] 于汝绶. 露天矿设计理论分析 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1987: 33-34.
Yu Rushou. Theory analyse in surface mine design [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Book Concern, 1987: 33-34.

[5] 杨彪, 罗周全, 廖江南, 等. 露天矿山开采境界动态优化圈定 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 368-372.
Yang Biao, Luo Zhouquan, Liao Jiangnan, et al. Journal of Coal Science and Engineering, 2010, 35(3): 368-372.

[6] Frimpong S, Asa E, Szymanski J. Advances in open pit mine design and optimization research [J]. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 2002, 16(2): 134-143.

[7] Bye A. The development and application of a 3D geotechnical model for mining optimization[C]. 2005 SME Annual Meeting: Got Mining, Barcelona, Spain, April 13-15, 2005: 651-660

[8] 王维军, 刘庆超, 焦云鹏. 基于 NPV 理论的工程成本控制及实证研究 [J]. 中国管理信息化, 2008, 11(8): 67-69.
Wang Weijun, Liu Qingchao, Jiao Yunpeng. China Management Informationization, 2008, 11(8): 67-69.

[9] 罗周全, 刘晓明, 苏家红. 基于 Surpac 的矿床三维模型构建[J]. 金属矿山, 2006(4): 33-36.
Luo Zhouquan, Liu Xiaoming, Su Jiahong. Metal Mine, 2006(4): 33-36.

[10] Osanloo M, Ataie M. Using equivalent grade factors to find the optimum cut-off grades of multiple metal deposits [J]. Minerals Engineering, 2003, 16(8): 771-776.

(责任编辑 岳臣)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。