

金属露天矿生产计划优化算法的改进

顾晓薇¹, 胥孝川¹, 王 青¹, 刘剑平^{1,2}

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东煤沈阳基础工程公司, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 针对露天矿生产计划优化中使用锥体排除法产生地质最优开采体序列时, 不考虑锥体之间重叠部分对相应锥体的平均品位影响的问题, 提出了改进的锥体排除算法. 该算法在锥体排除过程中, 重新确定了锥体的空间搜索逻辑, 同时重新计算锥体数组中受品位最低锥体影响的各锥体的平均品位并重新排序. 把新算法产生的地质最优开采体序列作为状态变量建立动态排序模型, 对所有可行的路径进行评价, 得出 NPV 最大的路径作为最优开采方案. 实例应用表明, 在相同技术经济条件下, 改进后的优化算法无论是生产能力稳定性还是最终净现值都明显优于原算法, 其中 NPV 提高了 10.5%.

关 键 词: 露天矿; 生产规划; 优化; 锥体排除法; 动态规划

中图分类号: TD 854

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)10-1492-05

Improving Optimization Algorithm of Production Scheduling for Open-Pit Metal Mine

GU Xiao-wei¹, XU Xiao-chuan¹, WANG Qing¹, LIU Jian-ping^{1,2}

(1. School of Resource & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Dongmei Foundation Company of Shenyang, Shenyang 110016, China. Corresponding author: XU Xiao-chuan, E-mail: 493212755@qq.com)

Abstract: In optimizing production scheduling of open-pit mine, the effect of overlap among cones on its average grade was usually ignored, in order to deal with this shortcoming, an improved cone elimination algorithm was proposed. In the process of cone elimination, the spatial search logic was redefined, the average grade of cones influenced by the lowest grade cone and rearranged cones in the cone array were recalculated. A dynamic sequence model was established by taking the geological optimum push-backs generated by new algorithm as state variable, all feasible paths were evaluated, and the path whose NPV is the biggest was taken as the optimal exploitation scheme. The application example showed that under the same conditions of technology and economy, the improved algorithm is superior to the initial algorithm in the production stability and NPV, where the NPV increases by 10.5%.

Key words: open-pit mine; production scheduling; optimization; cone elimination; dynamic planning

露天矿设计阶段的开采计划是长远计划, 即贯穿整个开采寿命期的年计划. 开采计划包括 3 个要素: 生产能力、开采顺序和开采寿命. 开采计划优化的目标是确定每年的采剥量、采剥位置和矿山总的服务年限. 最早用计算机确定开采顺序

的方法是增量采场(push-back)试错法, 该方法由 Kennecott 公司的工程师首先提出并在该公司及一些其他公司的矿山得到应用^[1-3].

近十年来在露天开采计划优化方面的研究重点和进展主要有两个方面. 一是缩小问题的规模

收稿日期: 2013-11-19

基金项目: 辽宁省自然科学基金资助项目(201102065, 201202075); 教育部新世纪人才支持计划项目(NCET-11-0073); 教育部博士点专项科研基金资助项目(20130042110012); 东北大学研究生科研创新项目(N130601002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N120101001); 格平绿色助学行动辽宁环境科研'123'工程资助项目(CEPF 2012-123-1-3).

作者简介: 顾晓薇(1971-), 女, 辽宁凤城人, 东北大学教授, 博士生导师; 王 青(1962-), 男, 内蒙古兴和人, 东北大学教授, 博士生导师.

以便使优化算法变得高效实用. 其中, 文献[4]通过产生台阶并以此为决策单元依据给定的台阶排序法则优化开采计划; 文献[5]通过线性规划把模块组合为符合开采顺序约束的“基本树”作为决策单元; 文献[6-7]采用不同标准的大模块 (macro-block) 来提高计划优化的求解效率. 另一个露天开采计划研究方面的新动向, 是在开采计划中考虑地质和经济因素的不确定性, 以最大程度地获得投资回报与风险之间的平衡. 其中, 文献[8]用地质统计学模拟和传统随机模拟分别体现矿物品位和价格的不确定性, 通过对随机产生的大量的可行开采顺序进行评价, 确定最合理的开采计划; 文献[9]在开采体产生过程中考虑了品位的不确定性; 文献[10]考虑了 2 000 个可能的未来价格方案和 4 个候选境界, 研究市场不确定情况下的采矿与选矿能力选择问题.

本文针对已建立的锥体排除算法产生地质最优开采体序列过程中, 未考虑锥体之间重叠部分对相应锥体的平均品位影响的问题, 提出了新的锥体排除算法. 该算法改进了锥体的空间移动顺序以及在锥体排除过程中根据品位变化同步更新锥体数组中锥体的排列顺序. 多个矿山的应用表明, 该算法具有方法上的优越性和应用上的实用性.

1 地质最优开采体序列产生算法

露天开采是一个从现状地表地形开始, 按工作帮坡角逐台阶推进和延深, 最后到达最终境界的过程. 因此, 生产计划优化的本质可以归结为: 在最终境界内确定每年末工作帮应该推进到的位置以使总 NPV 最大. 本文中提到的生产计划优化的第一步是在最终境界内使用锥体排除算法产生地质最优开采体序列. 这里首先给出地质最优开采体定义: 在最终境界 (V_n) 内, 如果一个采剥量为 V 、以工作帮坡角 β 开采的区段, 所含有的金属量是所有采剥量和工作帮坡角相同的区段中的最大者, 该区段称为对应于 V 和 β 的“地质最优开采体”, 用 V^* 表示

图 1 为在最终境界中使用改进的锥体排除法产生地质最优开采体序列过程. 相对于原算法, 改进的算法主要做了 2 个方面的调整. 一是锥体的移动过程: 锥体首先沿同一个模块柱从下往上移动, 直到锥体内矿岩量满足增量, 然后将锥体移动到下一个模块柱. 二是锥体联合体的确定: 每排除一个平均品位最低的锥体后, 锥体数组中受该锥

体影响的所有锥体都重新计算平均品位, 并重新排序, 直到排除的锥体联合体等于或者接近与设定的开采体增量. 具体算法如下.

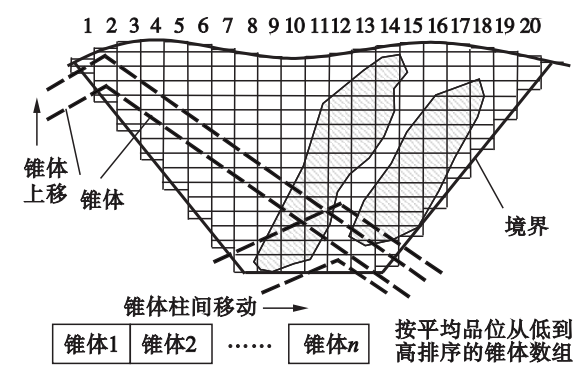


图 1 地质最优开采体序列产生示意图
Fig. 1 Illustration of generating of geologically optimum push-backs

- 1) 构造一个锥壳与水平面的夹角等于工作帮坡角的锥壳模板. 依据储量大小确定要考虑的最小开采体 (开采体产生过程中, 允许的最小矿岩量用作算法结束的依据) 的矿岩量 V_i 和开采体增量 ΔV (相邻开采体之间的矿岩量增量, 即开采体产生的分辨率或者步距).
- 2) 读入已有的最终境界 V_n .
- 3) 取当前境界范围内的第一模块柱, 即 $i = 1$.
- 4) 考虑当前模块柱 i 在当前境界内最低的模块, 即从下数第一个中心标高大于该处当前境界标高的模块.
- 5) 把锥壳模板顶点模块置于该模块处, 找出当前境界中落入锥体内的所有模块 (整块和非整块), 计算锥体的矿量、岩量和平均品位. 如果锥体的矿岩量不大于境界增量 ΔV , 把锥体按平均品位从低到高置于一个锥体数组中, 继续下一步; 否则, 该锥体弃之不用, 转到 7).
- 6) 如果锥壳模板顶点高度已经高出该模块柱处的地表标高一个给定的距离 (根据矿区地表最高点与最低点高差确定), 转入下一步; 否则, 把锥体沿同一模块柱向上移动一个模块 (一般为一个台阶高度), 重复 5).
- 7) 如果当前模块柱不是当前境界范围内的最后一个模块柱, 取下一个模块柱, 即令 $i = i + 1$, 回到 4); 否则, 执行下一步.
- 8) 至此, 当前境界范围内的所有模块柱被“扫描”了一遍, 得到了一组按平均品位从低到高排序的 C 个锥体组成的锥体序列. 从序列中找出前 m 个平均品位最低的锥体“联合体” (联合体中不包括任何锥体之间的重叠部分), 使联合体的

矿岩总量约等于境界增量 ΔV .

9) 把这一锥体联合体从当前境界(开采体)中排除,即把受联合体中锥体影响的每个模块柱的底部标高提升到此模块柱处最高的锥壳标高,就得到了一个新的开采体.

10) 计算新开采体的矿岩量. 如果其矿岩量大于设定的最小开采体矿岩量 V_1 ,以这一新开采体为当前开采体,回到 3),产生下一个更小的开采体;否则,所有开采体产生完毕,算法结束.

针对 8)和 9)中,设置了 2 种排除方法进行锥体联合体的排除,分别命名为优化级别 1 和优化级别 2 锥,以改善优化结果:

如果优化级别是 1,在 8),9)中锥体的“联合体”的排除过程为:排除第 1 个锥体,排除量为 v_1 ;如果 $v_1 < \Delta V$,重新计算第 2 个锥体的量 v_2 ,如果 $v_1 + v_2 \leq \Delta V$,排除第 2 个锥体;如果 $v_1 + v_2 < \Delta V$,重新计算第 3 个锥体的量,如果 $v_1 + v_2 + v_3 \leq \Delta V$,排除第 3 个锥体……一直到第 m 个锥体, $v_1 + v_2 + v_3 \cdots + v_{m-1} + v_m \approx \Delta V$.

如果优化级别是 2,在 8),9)中锥体的“联合体”的排除过程为:排除第 1 个锥体,排除量为 v_1 ;如果 $v_1 < \Delta V$,重新计算所有尚未被排除的锥体 $j(j=2,3,\cdots,C)$ 的量,从中选出平均品位最低且 $v_1 + v_j \leq \Delta V$ 的锥体 i ,把第 i 个锥体与第 2 个锥体调换位置,排除锥体 2;如果 $v_1 + v_2 < \Delta V$,重新计算所有尚未被排除的锥体 $j(j=3,4,\cdots,C)$ 的量,从中选出平均品位最低且 $v_1 + v_2 + v_j \leq \Delta V$ 的锥体 i ,把第 i 个锥体与第 3 个锥体调换位置,排除锥体 3;……一直到排除了 m 个锥体, $v_1 + v_2 + \cdots + v_{m-1} + v_m \approx \Delta V$.

优化级别为 2 时的锥体联合体排除过程,考虑了锥体重叠的影响,优化效果大大改善,但运行时间也大大增加.

2 地质最优开采体动态排序

本文中提到的生产计划优化的第二步是对已产生的地质最优开采体序列进行动态排序,并使用动态规划方法获得最佳开采方案. 开采体动态排序模型如图 2 所示. 图的横轴表示阶段(年),竖轴为地质最优开采体,表示每个阶段末的可能采场状态;每个开采体为一个圆圈;每一条箭线表示相邻两年间一个可能的采场状态转移. 由于采场是逐年扩大的,所以采场状态只能从某一年的一个开采体转移到下一年更大的一个开采体. 这就是为什么每年的最小开采体(最下面的那个)随着时间的

推移而增大,状态转移箭线都指向右上方.

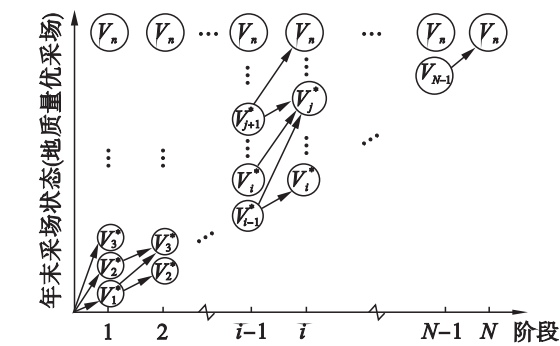


图 2 地质最优开采体动态排序一般模型
Fig. 2 General scheme for dynamic sequencing of geologically optimum push-backs

图 2 中,从开采体 V_1^* 到开采体 V_n (最终境界)有无数条路径,但不是每一条路径都是可行的,比如,对于规模较大的矿床,头几年就采到最终境界是不合理的,也不可能按照开采体增量大小逐年开采. 所以一个合理的生产能力范围的确定对减少评价路径以及实现矿山利润最大化都有很大影响. 在生产能力约束条件下,对上述动态排序模型中的开采体使用动态规划法,寻找 NVP 最大的开采路径作为最优开采方案. 基于该方法得到的生产计划能同时给出生产能力,开采顺序以及开采寿命,并没有把任一要素作为优化其他要素的前提,实现了开采计划的整体优化. 由于篇幅限制,这里不给出动态规划数学模型和算法步骤.

3 实例应用

将改进后的算法及原算法分别用于本溪某露天矿. 该矿山东西走向,向南倾斜,倾角约 40° ;矿区内地表标高 160 ~ 280 m;矿体水平厚度约 30 ~ 80 m;品位 30.5%,品位模型的模块水平边长为 25 m,模块高 12 m.

优化中用到的相关技术经济参数如表 1 所示. 首先产生一个原地矿量为 2 739.3 万 t,矿岩总量为 5 784.6 万 t 的最终境界(利润值最大境界),其最终帮坡角在方位 $0^\circ, 30^\circ, 180^\circ$ 和 270° 分别为 $50^\circ, 45^\circ, 48^\circ$ 和 45° .

以上述境界为基础,根据表 1 中的相关技术经济参数,令矿石增量为 20 万 t,分别使用新算法和原算法产生地质最优开采体序列(共 137 个). 对开采体进行动态排序并使用动态规划方法寻求最优解,优化结果如表 2 所示,包括年采剥量、开采时间以及净现值等.

表 1 技术经济参数
Table 1 Technical and economic parameters

参数	值	参数	值	参数	值	参数	值	参数	值
采矿成本/ (元·t ⁻¹)	20	矿石回采率 /%	95.0	精矿品位 /%	65.0	年采矿量上限 ×10 ⁻⁴ /t	300	基建期 /a	1
剥岩成本/ (元·t ⁻¹)	18	选矿回收率 /%	82.0	折现率 /%	7.0	年采矿量下限 ×10 ⁻⁴ /t	200	闭坑期 /a	1
选矿成本/ (元·t ⁻¹)	135	废石混入率 /%	3.5	精矿售价 /(元·t ⁻¹)	650	废石品位 /%	8	工作帮坡角 /(°)	20

表 2 生产计划优化结果
Table 2 Results of optimizing production scheduling

开采时间/a	原算法				新算法		
	矿石质量 ×10 ⁻⁴ /t	岩石质量 ×10 ⁻⁴ /t	净现值 /亿元	级别	矿石质量 ×10 ⁻⁴ /t	岩石质量 ×10 ⁻⁴ /t	净现值 /亿元
1	290.43	450.74	12.37	2	283.57	437.75	13.54
2	278.79	265.39	13.10	2	296.38	289.49	15.27
3	274.46	232.55	13.50	2	296.98	241.30	15.93
4	287.51	208.16	13.19	2	296.61	224.20	14.3
5	286.12	431.56	10.36	2	297.21	369.04	10.81
6	278.15	454.41	10.01	2	296.77	443.66	11.83
7	279.40	391.86	9.82	2	297.04	455.92	11.56
8	291.65	285.53	9.22	2	296.92	415.05	11.02
9	215.62	211.47	7.56	2	297.00	198.74	12.03
10	214.59	156.26	7.52	2	38.22	12.77	1.53
总计	2 696.7	3 087.9	106.65		2 696.7	3 087.9	117.82

注:表中的矿石量和岩石量分别为送往选厂和排岩场的矿岩量.

从表中可以看出,两种算法的矿山开采年限均为 10 a. 其中,从第 2 a 到第 9 a,新算法的生产能力(矿石量)相对于原算法是很稳定的,在 297 万 t 左右;但是第 1 a 和第 10 a 两个算法的生产能力变化较大,这是由于考虑到实际生产情况,算法设置基建期和闭坑期分别为 1 a,即这些时间段,生产能力不受年采矿量上下限影响;两种算法的最终净现值比较可以看出,采出同样大小的矿岩量,新算法明显优于原算法,净现值增加了 10.5% .

4 结 论

本文对原有锥体排除算法在空间的逻辑搜索以及地质最优开采体产生过程中锥体间重叠问题进行了改进. 对产生的地质最优开采体进行动态排序并使用动态规划法寻找最优开采路径. 最终优化结果给出了年采剥量、矿山开采寿命、矿山开采顺序和净现值等. 通过两种算法优化结果对比

分析可以看出,改进后的算法无论是生产能力稳定性(正常生产期)还是最终净现值都明显优于原算法.

参考文献:

[1] Crawford J T, Davey R K. Case study in open-pit limit analysis[C]//Computer Methods for the 80's in the Mineral Industry. New York,1979;311 – 318.

[2] Belobraidich W. Computer assisted long range mine planning practice at ray mine division—Kennecott copper corporation [C]//Computer Methods for the 80 ' s in the Mineral Industry. New York,1979;349 – 357.

[3] Savage C J,Preller A H. Computerized mine planning system at Rio Tinto Mineral, S. A. (Spain)[C]//Proceedings of the 19th Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. Universal Park,1987;441 – 456.

[4] Halatchev R A. A model of discounted profit variation of open pit production sequencing optimization [C]// Proceedings of the 32nd International Symposium on the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. Tucson,2005;315 – 323.

[5] Ramazan S. The new fundamental tree algorithm for

production scheduling of open pit mines [J]. *European Journal of Operations Research*,2006,177 (2) :1153 – 1166.

[6] Armstrong M,Galli A. A new approach to flexible open pit optimization and scheduling [C]//Proceedings of the 35th International Symposium of Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industry. Wollongong, 2011 :253 – 263.

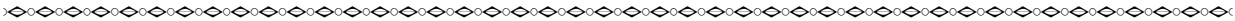
[7] Menabde M, Froyland G, Stone P. Mining schedule optimization for conditionally simulated orebodies [C]// Proceedings of the International Symposium on Orebody Modeling and Strategic Mine Planning:Uncertainty and Risk Management. Perth,2004:379 – 383.

[8] Armstrong M,Galli A, Ndiaye A A. A case study on the

impact of hedging against foreign exchange risk and energy price risk [C]//Proceedings of Orebody Modeling and Strategic Mine Planning. Dimitrakopoulos,2009:95 – 99.

[9] Gholamnejad J, Osanloo M. Incorporation of ore grade uncertainty into the push back design process [J]. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*,2007,107:177 – 185.

[10] Grobler F,Elkington T,Rendu J M. Robust decision making-application to mine planning under price uncertainty [C]// Proceedings of the 35th International Symposium of Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industry. Wollongong,2011:59 – 66.



(上接第 1481 页)

3 结 论

1) 在以乙硫氮为捕收剂的条件下,SGX 的添加使黄铜矿的回收率有一定幅度的增加,而对方铅矿有强的抑制作用. 通过人工混合矿浮选试验可知,在 pH = 6,SGX 质量浓度为 1.9 g/L 时,黄铜矿和方铅矿的分离效果较好,精矿中铜的质量分数和回收率分别为 29.66% 和 85.23% .

2) SGX 在黄铜矿表面存在氢键和静电力作用,而在方铅矿表面是化学吸附、氢键和静电力共同作用.

参考文献:

[1] Qin W Q,Wei Q,Jiao F,*et al.* Effect of sodium pyrophosphate on the flotation separation of chalcopyrite from galena [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*,2012,22 (3):345 – 349.

[2] Valdivieso A L,Lopez A A S, Song S,*et al.* Dextrin as a regulator for the selective flotation of chalcopyrite,galena and pyrite [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*,2007,46 (3) : 301 – 309.

[3] Liu Q,Zhang Y H. Effect of calcium ions and citric acid on the flotation separation of chalcopyrite from galena using

dextrin [J]. *Minerals Engineering*, 2000, 13 (13) : 1405 – 1416.

[4] 魏明安. 黄铜矿和方铅矿浮选分离的基础研究 [D]. 沈阳: 东北大学,2008.

(Wei Ming-an. Fundamental research on flotation separation of chalcopyrite and galena [D]. Shenyang: Northeastern University,2008.)

[5] Huang P,Cao M L, Liu Q. Using chitosan as a selective depressant in the differential flotation of Cu-Pb sulfides [J]. *International Journal of Mineral Processing*,2012,106/107/ 108/109:8 – 15.

[6] Huang P, Cao M L, Liu Q. Adsorption of chitosan on chalcopyrite and galena from aqueous suspensions [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*,2012,409:167 – 175.

[7] Xiong D L,Hu Y H, Qin W Q,*et al.* Synthesis of glycerine-xanthate and its depressing mechanism in separation of marmatite from arsenopyrite [J]. *Journal of Central South University*,2006,13 (6) :678 – 682.

[8] He M F, Qin W Q, Li W Z, *et al.* Pyrite depression in marmatite flotation by sodium glycerine-xanthate [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*,2011,21 (5) :1161 – 1165.

[9] 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱分析 [M]. 北京: 化学工业出版社,2010.

(Weng Shi-fu. Fourier transform infrared spectral analysis [M]. Beijing:Chemical Industry Press,2010.)