

露天矿多采区受约束条件下全境界优化

胥孝川¹, 顾晓薇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: 基于浮锥排除法基本原理, 使用 Smart Miner 软件对两露天采场进行全境界优化, 将两个不同生产条件的采场合为一个矿区. 考虑到不同采区生产技术经济参数不一样, 而境界优化结果对这些参数的敏感度较高, 所以软件增加了优化中识别开采对象所在分区, 按所属分区的技术经济参数进行优化的功能; 同时采场开采范围受地表构筑物影响, 因此软件新增在任何约束范围进行境界优化功能. 以司家营露天矿区为例分别在有约束和无约束条件下根据分区参数进行优化. 结果表明, 地表构筑物对最佳境界的约束“很硬”, 由此少采 1 亿 t 矿, 且在 -202 m 水平开始形成挂帮矿; 如果这 1 亿 t 矿仍然露天开采, 那么地表构筑物移除费用必须小于 3.4 亿元.

关 键 词: 境界优化; 浮锥法; 露天矿; 利润值; 模型

中图分类号: TD 216

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)01-0079-06

Optimizing the Whole Boundary of Open Pit Mining Areas with Restrictions

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

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Eastern Coal-Based Engineering Company in Shenyang, Shenyang 110016, China. Corresponding author: GU Xiao-wei, E-mail: 493212755@qq.com)

Abstract: Based on the theory of floating cone exclusive method, the ultimate boundary of two open pits in different producing conditions was optimized together by Smart Miner software. In view of the technical and economic parameters being different in open pits and the optimization results being sensitive to these parameters, the software incorporated some functions to indentify the partitions of mining objects and optimized the boundary by the corresponding parameters in each partition. Meanwhile, the software incorporated the function of optimizing boundary in any constraint ranges for the mining range being restricted by the surface structures. Taking Sijiaying open pit as an example, the ultimate boundary was optimized with restrictions and non-restrictions according to the parameters in different partitions. The results showed that the surface structures which caused 0.1 billion ore loss were a strong constraint to the optimum boundary. The 0.1 billion ores formed hanging wall ores from -202 m level. If the hanging wall ores were still mined opening, the cost of moving surface structures must be less than 0.34 billion.

Key words: boundary optimization; floating cone method; open pit mine; profit value; model

露天矿境界优化从理论研究到工程实践都取得了巨大成就. 理论研究以 Lemieux 的浮锥排除法^[1]、Lerchs 与 Grossmann 的图论法和动态规划法^[2]、Meyer 的线性规划法^[3]最具代表性. 基于以

上理论方法的研究, 目前境界优化主要集中在解决境界设计参数的优化以及具体工程背景的研究, 其中, Jalali 等考虑境界形态的不确定性建立了马尔科夫随机模型^[4]; 黄勇等试图通过构建反

收稿日期: 2014-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474049); 辽宁省自然科学基金资助项目(2014020040); 辽宁省教育厅重点实验室基础研究项目(LZ2014020); 沈阳市科技计划项目(F14-231-1-07).

作者简介: 胥孝川(1986-), 男, 四川绵阳人, 东北大学博士研究生; 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.

映矿山开采成本、岩性、综合回采率、品位以及市场价格等多因素变化的复杂模型对露天矿最终境界进行动态优化,然而矿山地质环境的复杂性以及产品市场的多变性,未能将因素变化的时间和空间进行联系^[5];Latorre 和 Golosinski 在境界确定中考虑资金的时间价值^[6];汪朝等首先对影响露天矿境界优化的参数通过正交试验进行组合,然后对各组合进行优化,根据优化结果选出每个参数的最优水平,再进行优化得出最优方案^[7];Frimpong 等基于神经网络算法,在优化中考虑结构、水文和工程地质等条件对境界设计的影响^[8];杨彪、Akbari 等从成本极小化、经济与矿岩等的时间特点等方面考虑,分别建立了最终境界决策模型和境界全动态优化算法^[9-10]。

可以看出,露天矿境界优化在理论基础研究较为成熟的今天,更多的关注集中在解决工程中的实际应用。本文研究的重点是解决受地表构筑物影响的最终境界范围的确定,以及实现同一矿山不同区域使用不同技术经济参数进行境界优化,同时判断地表构筑物是否值得移除。

1 露天矿境界优化模型

1.1 地表标高模型

露天矿境界优化中最重要的 3 个模型是地表标高模型、品位模型和台阶模型。其中,地表标高模型是境界优化的空间约束条件之一,另外还包括最终帮坡角和最小底宽等。地表标高模型的建立分两步,首先是根据地表地形线(等高线)以及采场台阶线(坡顶、坡底线)使用线性插值法初步构建地表标高模型,模型中模块尺寸为 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$,然后根据采场测点对建立的地表标高模型进行修正,最终得到如图 1 所示的地表标高三维模型。

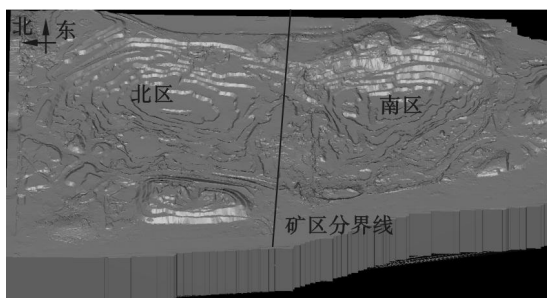


图 1 地表三维标高模型
Fig. 1 The 3D terrain elevation model

图 1 中北区即为目前矿山的二期工程,露天 I 采场;南区为矿山一期工程,露天 II 采场;中间的

一条粗线即为两个采场的分界线(N18 勘探线),可以看出两个采区已初具规模。本次境界优化的目的之一就是要对这两个采区进行综合考虑,实现全境界优化。

1.2 品位模型

品位模型是境界优化中矿岩量、利润值等计算的基础。基于钻孔取样的品位模型建立方法有克里金法、距离反比法等。本文采用距离反比法,品位模型模块尺寸同地表地形模型尺寸一致,每个模块品位估算过程中:距离指数取 4,平行矿体走向搜索半径为 200 m ,垂直走向搜索半径为 100 m ,垂直斜面搜索半径为 30 m ,矿体倾角设置为 40° ,最近孔估值距离为 40 m 。品位模型如图 2 所示,为 -307 m 水平品位分布。

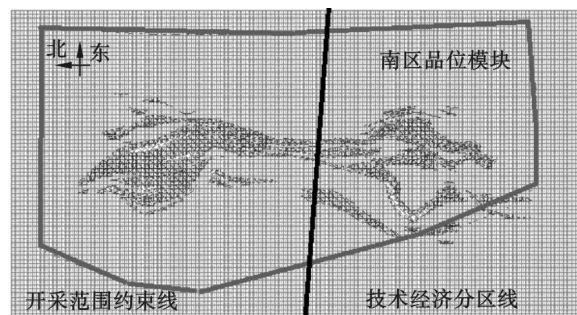


图 2 -307 m 水平品位模型
Fig. 2 Grade model at -307 m level

图 2 中,不同颜色模块分别代表氧化矿(又分表内矿和表外矿)和原生矿(又分表内矿和表外矿)。中间粗线是技术经济分区线,与图 1 中的矿区分界线重合,依据该分区线,在进行境界优化时,分区线以北的所有模块均按照北区采场目前的技术经济参数计算矿岩量、精矿量以及利润值等,分区线以南的所有模块按照南区的技术经济参数计算矿岩量、精矿量以及利润值等。由于在整个矿区西边有高压线以及公路(高压线西侧),东边有一条大河,南边是地下采场,北边有矿石破碎站,所以矿山最终境界优化范围受到很大限制,这里根据构筑物等布置特点,预留 20 m 左右作为安全距离,给出一个约束线框作为境界优化的约束条件,即如果不移除地表构筑物,最终境界只能在该范围内产生。

1.3 台阶模型

作为露天矿优化单元,台阶设置关系着矿山的生产安排和整体规划。本文台阶模型建立过程中, -54 m 以上台阶高度为 12 m , -67 m 以下台阶高度为 15 m ,坡面角为 65° ,安全平台宽 8 m ,工作平台宽 45 m 。

2 锥体排除法

锥体排除法的基本思想就是从模型最低水平开始逐一去掉不盈利的锥体模块,剩下的模块即构成最佳境界.锥体排除法示意图如图 3 所示.

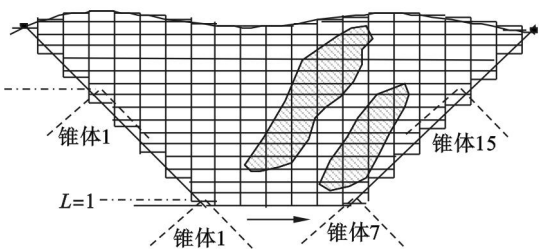


图 3 锥体排除法示意图
Fig. 3 Illustration of cone elimination

具体思路:首先构造一个足够大的锥体(锥体放在模型的任何位置都能覆盖整个模型水平面),将锥顶向上的锥体的顶点置于模型最低水平($L=1$)某模块中心,计算如果要采出该锥体内的矿石和岩石,能获得的利润值是多少,如果小于零,说明不值得开采,则将该锥体内的所有模块从该境界中删除掉,否则不做任何处理.将锥体沿同一水平移动到下一个模块,做同样的判断和处理,直到锥体遍历该水平所有的模块;然后向上移动一个水平(根据优化等级可以是一个台阶高度也可以是 $1/2$ 台阶高度或者 $1/4$ 台阶高度),对该水平所有的模块进行同样的锥体移动和判断,再向上移动一个水平,直到模型中所有水平的模块都被遍历过,这就完成了一轮锥体排除.如果某一轮锥体排除过程中没有任何锥体被排除,那么锥体排除结束,剩下的模块即构成了最佳境界,否则继续下一轮锥体排除,直到没有锥体被排除为止.

3 境界优化与分析

由于司家营矿山南北区两个采场现有的生产能力和运输设备远大于原矿山设计,矿区部分地方已超出原境界范围,30 m 宽主运输干道(道路两旁还设置有挡土墙和排水沟,近 10 m 宽,实际上运输干道只有 20 m)不能满足 180 t 和 220 t 自卸汽车的错车要求,加上边坡滑坡严重,运输干道受到破坏.所以矿山目前急需解决的问题之一就是重新圈定最终境界.然而境界的圈定又受到地表构筑物的限制以及不同区域开采技术经济参数不一致的影响.是否移动构筑物以及优化过程中不同区域技术经济参数如何选择将对整个矿山的生产布置与经济效益产生重大影响.

3.1 境界优化

矿山原设计在 -397 m 以上贯通两个采场,也就是说在 -397 m 以上两个矿山仍然按照各自相关的技术经济参数进行生产,所以在境界优化过程中,参数选择尤为重要.本次经济优化中,参数选择遵循两个原则:一是技术经济参数以近几年矿山实际生产情况为准(与矿山原设计的参数选择有较大差别);二是不同采场以技术经济分区线(图 2 所示)为界使用对应的生产参数(即,虽然是对两个矿山做全境界优化,但是不同区域的采、剥、选成本以及采选回收率等都不一样).南北采区技术经济参数设置如表 1 所示,表中 H_p 和 H_{pp} 分别表示表内氧化矿和表外氧化矿, M_p 和 M_{pp} 分别表示表内原生矿和表外原生矿;南北区表土剥离成本、岩石剥离成本、精矿价格以及废石混入率相同,分别为 6.5,9,700 元/t(目前铁精粉市场价格)和 6%;在方位 $0^\circ, 30^\circ, 102.5^\circ, 162.5^\circ, 180^\circ, 202.5^\circ, 275^\circ, 342.5^\circ$ 的帮坡角分别为 $39^\circ, 40.5^\circ, 42^\circ, 44.5^\circ, 47^\circ, 46^\circ, 45^\circ, 42^\circ$.

表 1 技术经济参数
Table 1 The technical and economic parameters

分区	矿层	开采成本	选矿成本	回采率/%	选矿回收率/%	精矿品位/%
		¥·t ⁻¹	¥·t ⁻¹			
南区	Hp	77	90	93.09	71	65.17
	Hpp	77	90	93.09	71	65.17
	Mp	77	74.59	93.09	84	64.56
	Mpp	77	74.59	93.09	84	64.56
北区	Hp	72	71.75	93.49	64	64.78
	Hpp	72	71.75	93.49	64	64.78
	Mp	72	60	93.49	75	64
	Mpp	72	60	93.49	75	64

根据表 1 中不同分区的相关技术经济参数,分两种情况进行优化:一是不考虑任何约束的境界优化(无约束);二是以图 2 中的开采范围约束线为界的境界优化(有约束). 优化结果如表 2 所示.

表 2 境界优化结果
Table 2 The results of boundary optimization

条件	原地矿石量/万 t	原地矿石品位/%	原地废石量/万 t	平均剥采比	采出矿石量/万 t	采出矿石品位/%	精矿量/万 t	采出废石量/万 t	盈利/万 ¥
无约束	62 220	27. 55	222 711	3. 579 4	61 706	25. 9	19 886	223 226	2 866 506
有约束	52 481	27. 44	149 950	2. 857 2	52 045	25. 8	16 707	150 386	2 694 953

可以看出,有约束时的最佳境界的矿石量比无约束时小约 1 亿 t. 这说明地表那些构筑物不搬迁会造成大量压矿,开采后形成挂帮矿量. 无约束和有约束条件下优化得到的境界在各台阶水平的等高线如图 4 所示.

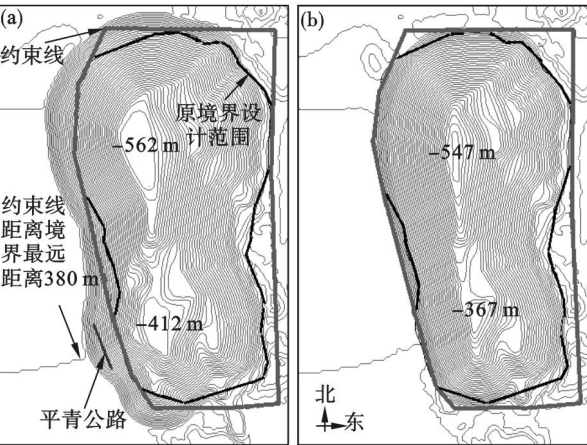


图 4 境界等高线
Fig. 4 The contour of open-pit boundary
(a)—无约束; (b)—有约束.

从图 4 可以看出,在无约束条件下,除了东边境界没有超出约束线外,其他方向都在约束线外,尤以南区西侧受高压线和胶带约束影响最大,最终境界距离约束线最大为 380 m. 而平青公路距离约束线约 100 m. 所以,如果是按照无约束条件下的优化,不仅需要挪动高压线和胶带,平青公路也得改道. 在无约束条件下,南北区均采到了矿山提供的最低分层平面图水平(北区 -562 m,南区 -412 m 水平);在有约束条件下,北区采到 -547 m 水平,南区采到 -397 m 水平.

3. 2 受约束境界对成本价格灵敏度分析

在保证其他技术经济参数不变条件下,分别提高采、剥、选成本以及降低精矿售价,在地表约束范围内对境界进行优化,分析成本价格变化对受约束条件下的境界优化影响. 优化结果如表 3 所示.

从表 3 可以看出,在受地表约束线影响下,境界对成本、价格的灵敏度较低. 当成本上升 10% 和 20% 时,采出矿石量分别减少 1% 和 6%,境界

表 3 成本价格变化分析
Table 3 Analysis of changing cost and price

价格变化	变化率/%	原地矿石量/万 t	原地矿石品位/%	原地废石量/万 t	采出矿石量/万 t	采出矿石品位/%	精矿量/万 t	采出废石量/万 t	盈利/万 ¥	境界面积/万 hm ²
初始数据	0	52 481	27. 44	149 950	52 045	25. 8	16 707	150 386	2 736 892	346. 8
成本上升	10	52 346	27. 46	145 728	51 991	25. 8	16 115	146 083	1 876 869	340. 3
	20	49 367	27. 49	128 399	49 032	25. 84	15 218	128 734	1 070 797	318. 4
	25	46 907	27. 53	117 738	46 518	25. 88	14 971	118 127	650 923	308. 7
价格下降	10	52 173	27. 46	144 411	51 819	25. 81	16 062	144 765	1 605 567	340. 4
	20	46 908	27. 54	118 243	46 590	25. 88	14 469	118 560	553 273	308. 4

面积减少 2% 和 8% ;当价格下降 10% 时,采出矿石量减少 0. 4% ,境界面积减少 2% ;只有当成本上升 25% 或价格下降 20% 时,采出矿石量才有较大变化,均减少 10% ,境界面积减少 11% . 即地表

构筑物对境界圈定来说是一个“很硬”的约束条件,只有当成本上升 25% 或者价格下降 20% 以上时(其他技术经济参数不变),地表构筑物的约束变为“较软约束”,即影响力有明显下降. 图 5 为

不同成本价格条件下最终境界开采范围.

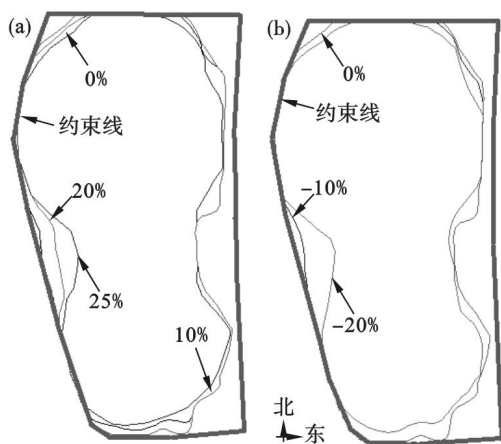


图 5 不同成本价格条件下境界开采范围

Fig. 5 The boundary range with different cost and price
(a)—成本上升; (b)—价格下降.

3.3 地表约束造成的挂帮矿分析

图 6 为在有约束和无约束两种情况下,不同水平境界开采范围.可以看出,如果把境界约束在地表约束线内,在 -157 m 水平开始出现挂帮矿;到 -202 m 水平,挂帮矿变得显著.之后,随着深度增加,挂帮矿量越来越大.经计算, -202 m 以

上境界内矿量约 2 亿 t,按 2 100 万 t/年生产能力算,约 10 年后开始形成较显著的挂帮矿.

从 -157 m 开始形成的挂帮矿大约 1 亿 t 矿,对这些挂帮矿按照地表构筑物是否移动有两种处理方法.一种是不移动构筑物,那么进行地下开采,按照司家营第 III 采场(地下开采,紧挨着露天采场南区)现在的技术经济参数(回采率 73.37%,矿石开采成本 127 元/t,贫化率 19.46%)粗略计算,可产生利润约 4 亿元;如果按照年生产能力 300 万 t 计算,这 1 亿 t 矿将是 25 年后近 33 年的开采量;假设未来成本和精矿价格的年增长率均为 2%,以 7% 的折现率,这相当于现值 0.6 亿元.另一种是移动构筑物,即按照无约束露天开采,根据矿山设计年生产能力最终将达到 2 100 万 t,那么这 1 亿 t 矿将是 25 年后近 5 年的开采量,可产生利润值 17 亿元(见表 2 所示),这相当于现值 4 亿元.也就是说,如果可接受的最低收益率为 7%,若这些地表建(构)筑物可以移动,现在的移动费用小于 3.4 亿元(地采与露采现值之差)就值得移动,即移除地表构筑物(主要是移除境界西侧的高压线和公路),进行无约束露天开采.

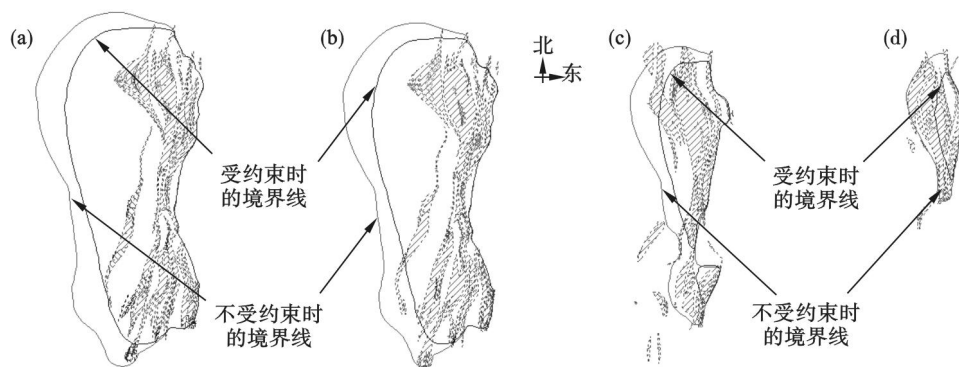


图 6 受地表约束造成的不同水平挂帮矿

Fig. 6 The hanging wall ores caused by surface constraint at different levels
(a)— -157 m ; (b)— -202 m ; (c)— -382 m ; (d)— -502 m .

4 结 论

1) 基于矿山提供的技术经济参数以及目前铁精粉市场价格,地表构筑物形成的地表范围约束线对最佳境界的约束“很硬”,由此少采约 1 亿 t 矿石(相对于无任何约束的境界优化),且这一约束在 10 年后开始显现,开始在南区西帮丢矿,形成挂帮矿.

2) 在成本、价格上升率为 2%,折现率为 7% 的情况下,按照矿山目前的生产情况,如果考虑移除地表构筑物,即上述 1 亿 t 矿石仍然用露天开采的话,就必须满足构筑物移除费用小于 3.4 亿元.

3) 通过境界随成本价格变化灵敏度分析可以看出,只有当成本上升 25% 或价格下降 20% 以上(其他技术经济参数不变)时,地表构筑物的约束变为“较软约束”,即影响力有明显下降.

(下转第 93 页)