

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.05.022

金属露天矿帮坡角变化对最终境界影响

胥孝川, 顾晓薇, 王青, 张伟峰

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 基于正锥排除法基本原理优化南芬露天矿最终境界, 研究上盘帮坡角变化对最终境界开采形态、矿岩量等影响。根据南芬露天矿不同时期采场生产现状, 设置相关技术经济参数, 对矿山进行初始境界优化; 按照 0.5° 步长逐步提升上盘帮坡角, 优化不同上盘帮坡角条件下的最佳境界。研究表明, 随着帮坡角变陡, 最终境界地表范围逐渐缩小, 底部尺寸变大或者向下延伸; 不同帮坡角加陡方案得到的最终境界, 矿岩量可能增大或者减小, 总成本也可能增加, 但利润值增大。

关键词: 露天矿; 最终境界; 优化; 帮坡角

中图分类号: TD 216

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)05-0716-06

Ultimate Metal Pit Optimization with Various Wall Slope

XU Xiao-chuan, GU Xiao-wei, WANG Qing, ZHANG Wei-feng

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: GU Xiao-wei, professor, E-mail: 493212755@qq.com)

Abstract: Based on the moving cone method, the ultimate pit of Nanfen open pit mine was optimized and the influences of hanging wall angle variation on the pit shape, ores and rocks were studied. According to the mining states in different periods, related technical and economical parameters were set to optimize initial pit. The ultimate pits were optimized by increasing the hanging wall slope with the step of 0.5° . The results show that the ranges of ultimate pit shrink gradually and the bottom sizes become larger or downward with wall slope steeping. The ore-rock volumes of ultimate pits obtained by various steeping wall slope may increase or reduce, and the cost may increase, but the total profits increase.

Key words: open pit mine; ultimate pit; optimization; wall slope

在安全范围内, 提高最终帮坡角是降低露天矿山生产成本的一个重要措施。边坡稳定性分析是提高露天矿帮坡角的前提条件, 曹兰柱等在增大顶帮帮坡角的同时, 通过内排压帮方案提高顶帮边坡的稳定性^[1-2]; Feng 等应用临界滑动场理论优化设计露天矿边坡角, 使最终帮坡角在安全条件下提高 3° , 提高了资源回采率^[3]; Shishvan 等使用样条插值法研究境界帮坡角设置, 可以在任意方位考虑不同帮坡角, 形成的最终境界形态更加精确和符合实际^[4]; Contreras 等在露天矿最终帮坡角确定过程中, 将帮坡失稳产生的成

本考虑到评价指标体系里^[5]。当前, 极限平衡和数值模拟相结合的方法被广泛应用到露天矿边坡稳定性分析中^[6-7]。在最佳帮坡角条件下, 进一步降低矿山生产成本, 提高矿山经济效益的另一个重要手段就是进行境界优化。最终境界优化方法很多, 包括浮锥法、图论法、动态规划法、最大网络流法等^[8-10]。然而, 众多关于露天矿境界优化及帮坡角稳定性的研究中, 关于提高帮坡角对最终境界究竟是如何影响的研究较少, 本文分别以南芬露天矿 2008 年采场现状以及 2016 年采场现状为基础, 详细分析提高南芬露天矿上盘帮坡角、最

收稿日期: 2016-11-01

基金项目: 国家青年基金资助项目(51604061); 国家自然科学基金资助项目(51474049, 51674062); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N160104009); 辽宁省自然科学基金资助项目(2014020040); 教育部博士点基金资助项目(20130042110012)。

作者简介: 胥孝川(1986-), 男, 四川绵阳人, 东北大学博士后研究人员; 顾晓薇(1971-), 女, 辽宁凤城人, 东北大学教授, 博士生导师。

终境界矿岩量以及矿山总盈利变化情况。

1 露天矿数值模型建立

1.1 地表标高模型

目前南芬露天矿正在进行第四期开采,第四

期境界是 2009 年基于 2008 年末生产现状进行设计的,到现在已开采 8 年时间,当前采场现状相对于 2008 年末已发生较大变化. 这里分别以 2008 年的采场现状(图 1a)和 2016 年的采场现状(图 1b),建立采场地表标高模型,如图 1c 和图 1d 所示.

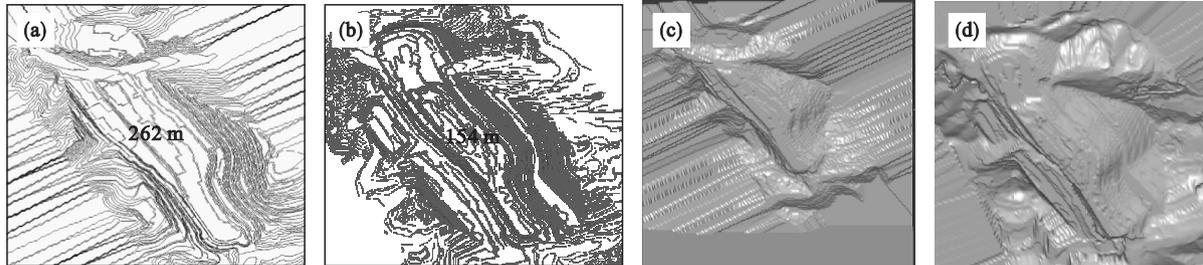


图 1 采场现状与标高模型
Fig. 1 Mine state and 3D model

(a)—2008 现状; (b)—2016 现状; (c)—2008 模型; (d)—2016 模型.

1.2 品位模型

南芬露天矿为大型铁矿床,全长约 3 400 m,工业矿段总长约 2 900 m. 矿体走向北西,倾向南西,倾角为 $40^\circ \sim 55^\circ$,平均品位 31%. 矿床的品位模型在水平面上的尺寸为 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$,其高度等于台阶高度,238 m 水平以上的台阶高度为 12 m,以下为 15 m. 一般情况下,模块的品位应该依据钻孔取样进行估值,本例中品位模型的模块品位不是由估值求得,而是把分层平面图上的矿体离散为模块,模块品位取分层平面图上矿体的品位. 品位模型如图 2 所示,每一小方格为一模块,阴影部分为矿石模块,其他模块为废石模块.

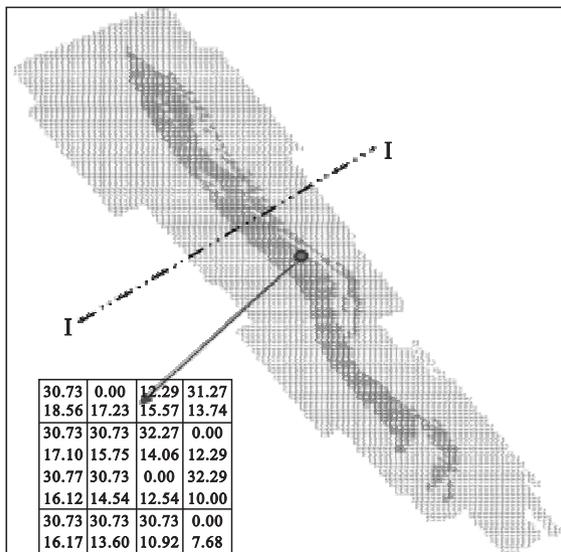


图 2 品位模型
Fig. 2 Grade model

2 露天矿帮坡角设置

南芬露天矿原第四期境界帮坡角分区设置如图 3 所示,根据图 3 帮坡角区域划分特点,对上盘区域(B 区和 C 区)按照 0.5° 步长逐渐增大这两个区域的坡度,如表 1 所示,在满足帮坡角稳定条件下,设置最大变化角度为 2.5° .

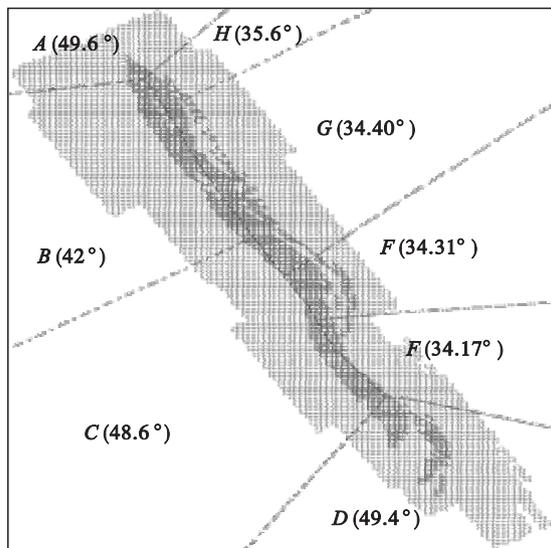


图 3 帮坡角分区
Fig. 3 Dividing of wall slope angle

表 1 上盘帮坡角变化
Table 1 Angle variation of hanging wall

方案	坡角	B	C
		200.5	224.5
原方案	原边坡角/(°)	42.00	48.60
方案 1	增加 0.5°	42.5	49.1
方案 2	增加 1°	43	49.6
方案 3	增加 1.5°	43.5	50.1
方案 4	增加 2°	44	50.6
方案 5	增加 2.5°	44.5	51.1

3 境界优化原理

图论法、浮锥排除法是露天矿最终境界优化最为常用的两种方法. 本文使用的是浮锥排除法中的正锥排除法, 基本思想是: 首先, 构造一个块体模型, 根据采矿权限, 圈定地表开采范围, 从范围线上, 按照不同分区帮坡角向下投影, 得到一个几何最大境界模型; 其次, 构造一个正锥体, 令锥体锥面倾角与矿山不同方位对应分区帮坡角一致, 将锥体顶点置于模型最低水平某模块中心, 计算锥体内矿岩量, 结合相关技术经济参数计算锥体利润值, 如果利润值小于 0, 就将该锥体内的模

块全部剔除, 否则不做任何处理, 沿着同一水平移动到下一个模块中心, 进行同样的计算和判断, 直到该水平所有的模块都被检查完; 然后, 将锥体向上移动一个水平, 将锥体顶点逐一移动到该水平所有模块中心, 每移动一次, 计算锥体内矿岩量和利润值, 并将利润值小于 0 的锥体内的模块从模型中剔除; 最后, 当锥体从最低水平一直移动到地表后, 完成一轮扫描, 得到一个新的模型, 然后再从新模型最低水平开始, 再次进行锥体移动、计算和剔除判断, 直到某一轮扫描, 没有任何锥体内模块集利润值小于 0, 就找到了最优境界, 算法结束.

4 不同帮坡角条件下最优境界优化

基于正锥排除法基本原理, 对南芬露天矿最终境界进行优化. 优化的内容包括: 基于 2008 年南芬露天矿采场现状, 改变上盘帮坡角, 研究不同帮坡角提高方案得到的境界相对于南芬露天矿原四期境界设计的变化关系; 基于 2016 年南芬露天矿采场现状, 改变上盘帮坡角, 分析帮坡角变化对最终境界影响. 境界优化相关技术经济参数如表 2 所示.

表 2 技术经济参数
Table 2 Technical and economic parameters

采矿成本 元·t ⁻¹	剥岩成本 元·t ⁻¹	选矿成本 元·t ⁻¹	精矿售价 元·t ⁻¹	矿石回 收率/%	选矿回 收率/%	废石混 入率/%	精矿 品位/%	混入废 石品位/%
24	6.87	135	551.7	92.1	82	2.045	66	10

以 2008 年采场现状为基准, 保持表 2 中相关技术经济参数不变, 根据表 1 中不同方案下的最

终帮坡角进行境界优化, 优化结果如表 3 所示.

表 3 不同上盘帮坡角条件下境界优化结果——基于 2008 年采场现状
Table 3 Ultimate pit optimization results with various hanging wall angels based on mine sate in 2008

方案	矿石量 万 t	岩石量 万 t	盈利 万元	平均剥采比	底部尺寸: 长(m) × 宽(m)		境界开 采范围 hm ²	最低开采 水平/m	
					西北区	东南区		西北区	东南区
					基准境界	45 704.19	156 777.47	1 219 041.45	3.430 3
方案 1(+0.5°)	45 436.82	153 306.74	1 230 027.98	3.374 1	1 590 × 45	200 × 75	475.50	-62	28
方案 2(+1°)	45 446.39	150 406.25	1 249 203.05	3.309 5	1 590 × 45	260 × 80	472.70	-62	28
方案 3(+1.5°)	45 472.15	148 810.93	1 261 538.99	3.272 6	1 590 × 45	260 × 80	469.51	-62	28
方案 4(+2°)	46 662.71	156 947.32	1 264 544.21	3.363 4	1 565 × 45	365 × 50	468.91	-62	13
方案 5(+2.5°)	46 359.53	152 307.68	1 281 558.65	3.285 4	1 550 × 45	250 × 35	466.97	-62	13

表 3 中, 将基于 2008 年采场现状且帮坡角不变(原四期境界设计使用的帮坡角, 即表 1 中原方案对应的帮坡角)得到的境界称为基准境界,

该境界即原矿山设计的四期境界. 从表 3 可以看出, 相对于基准境界, 帮坡角变陡后, 各方案得到的境界内矿岩量可能增大, 也可能减小. 当上盘帮

坡角从 0.5°增大到 2.5°的过程中,境界内矿石量先增大后减小,其中:从 0.5°到 1.5°,矿石量增幅较小,且境界内矿石量小于基准境界矿石量;当上盘帮坡角增大 2°和 2.5°时,境界内矿石量增幅较大,均比基准境界大. 当上盘帮坡角从 0.5°增大到 2.5°的过程中,岩石量先减小,然后增大,再减小,其中:从 0.5°到 1.5°岩石剥离量逐渐减小,且均小于基准境界,与对应境界内矿石量变化趋势相反;当上盘帮坡角增大 2°时,岩石剥离量比基

准境界稍有增大,当上盘帮坡角增大到 2.5°时,岩石剥离量比基准境界少. 随着上盘帮坡角不断变大,无论矿岩量如何变化,境界总盈利逐渐增大,境界开采范围不断缩小,平均剥采比小于原境界;西北区最低开采水平均为 -62 m,当上盘帮坡角增大 2°和 2.5°时,境界内东南区最低开采水平相对于基准境界下降一个台阶,达到 13 m 水平. 参考图 2 中剖面线 I-I 位置,对表 3 中不同帮坡角条件下得到的境界等高线做剖面,如图 4 所示.

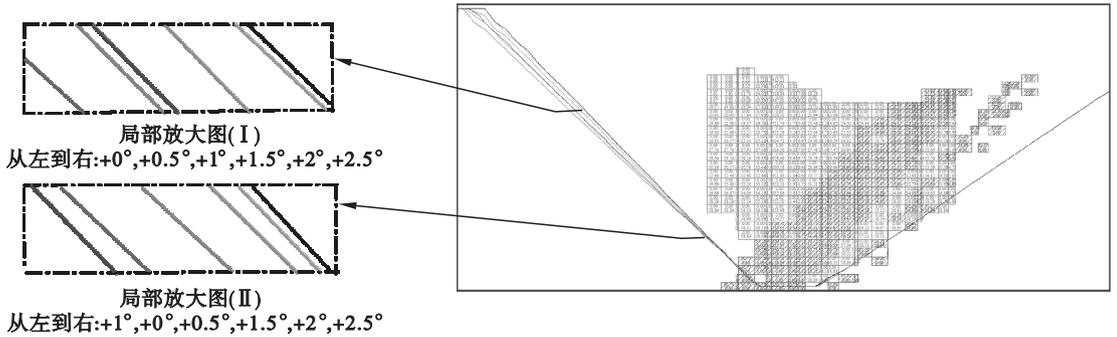


图 4 不同上盘帮坡角条件下境界等高线剖面——基于 2008 年采场现状
Fig. 4 Pit contour section with various hanging wall angles based on the mine state in 2008

图 4 中,左侧图是对右侧剖面图不同深度位置的局部放大,从局部放大图上可以看出不同上盘帮坡角条件下得到的最终境界等高线相对位置. 局部放大图(I),从左到右剖面线分别对应上盘帮坡角提升方案: +0°, +0.5°, +1°, +1.5°, +2°, +2.5°;局部放大图(II),从左到右剖面线分别对应上盘帮坡角提升方案: +1°, +0°, +0.5°, +1.5°, +2°, +2.5°. 可以看出,在不同深

度,不同帮坡角提升方案对应的境界等高线相对位置是不一样的. 例如,上盘帮坡角增加 2°,得到的最终帮坡在境界上部相对于初始境界是往里收缩,在境界下部又是往外扩张.

以 2016 年采场现状为基准,保持表 2 中相关技术经济参数不变,根据表 1 中不同方案下的最终帮坡角进行境界优化,优化结果如表 4 所示.

表 4 不同上盘帮坡角条件下境界优化结果——基于 2016 年采场现状
Table 4 Ultimate pit optimization results with various hanging wall angels based on mine sate in 2016

方案	矿石量 万 t	岩石量 万 t	盈利 万元	平均剥采比	底部尺寸: 长(m) × 宽(m)		境界开 采范围 hm ²	最低开采 水平/m	
					西北区	东南区		西北区	东南区
					初始境界	35 759.39	116 665.99	987 314.74	3.262 5
方案 1(+0.5°)	36 213.84	118 330.53	998 344.09	3.267 5	1 590 × 45	200 × 50	476.48	-62	13
方案 2(+1°)	36 419.62	117 857.11	1 011 356.16	3.236 1	1 590 × 45	380 × 70	473.87	-62	13
方案 3(+1.5°)	36 939.76	120 252.76	1 020 512.30	3.255 4	1 590 × 45	340 × 65	472.03	-62	-2
方案 4(+2°)	36 781.73	116 642.27	1 037 328.80	3.171 2	1 550 × 45	340 × 55	468.1	-62	-2
方案 5(+2.5°)	36 741.05	114 625.94	1 049 326.65	3.119 8	1 590 × 45	200 × 50	466.3	-62	-2

表 4 中,为与表 3 中的基准境界区别,将基于 2016 年采场现状且帮坡角不变(即表 1 中原方案帮坡角)条件下得到的境界叫初始境界. 可以看出,当上盘帮坡角变陡后,各方案得到的境界内矿石量均大于初始境界,而岩石剥离量有增大,也有减少. 其中:从 0.5°到 1.5°,矿石量逐渐增大,当

上盘帮坡角增大到 2°和 2.5°时,矿石量又开始下降,但不同帮坡角条件下得到的境界总矿石量都比初始境界大. 当上盘帮坡角从 0.5°增大到 2.5°的过程中,岩石量呈先增大后减小趋势,其中:从 0.5°到 1.5°岩石剥离量均大于初始境界;当上盘帮坡角增大 2°时,岩石剥离量与初始境界基本一

致,当上盘帮坡角增大到 2.5° 时,岩石剥离量比初始境界下降 2 000 万吨.随着上盘帮坡角不断变大,无论矿岩量如何变化,境界总盈利逐渐增大,境界开采范围不断缩小;西北区最低开采水平均为 -62 m ,当上盘帮坡角增大 1.5° , 2° 和 2.5°

时,境界内东南区最低开采水平相对于初始境界下降一个台阶,达到 -2 m 水平.参考图 2 中剖面线 I-I 位置,对表 4 中不同帮坡角条件下得到的境界等高线做剖面,如图 5 所示.

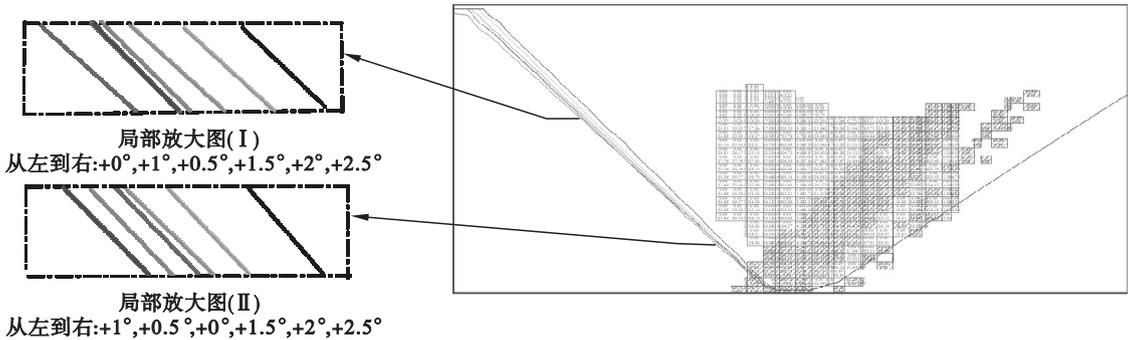


图 5 不同上盘帮坡角条件下境界等高线剖面——基于 2016 年采场现状

Fig. 5 Pit contour section with various hanging wall angles based on the mine state in 2016

图 5 中,左侧图是对右侧剖面图不同深度位置的局部放大,从局部放大图上可以看出不同上盘帮坡角条件下得到的最终境界等高线相对位置.局部放大图(I),从左到右剖面线分别对应上盘帮坡角提升方案: $+0^\circ$, $+1^\circ$, $+0.5^\circ$, $+1.5^\circ$, $+2^\circ$, $+2.5^\circ$;局部放大图(II),从左到右剖面线分别对应上盘帮坡角提升方案: $+1^\circ$, $+0.5^\circ$, 0° , $+1.5^\circ$, $+2^\circ$, $+2.5^\circ$.可以看出,在不同深度,不同帮坡角对应的境界等高线相对位置是不一样的.例如,上盘帮坡角增加 2° ,得到的最终帮坡在境界上部相对于初始境界是往里收缩,在境界下部又是往外扩张.

从以上分析可以看出,受地表地形以及矿体赋存条件影响,不同帮坡角加陡方案,最终境界优化结果区别较大.初始地表模型不一样(2008 年采场现状和 2016 年采场现状),当帮坡角变陡后,对境界内矿岩量增减有影响,但总的有点:如果境界少剥离岩石减少的成本支出大于矿石损失部分的价值,则少采矿少剥岩(如表 3 中的方案 1,2,3);如果增加回采矿石量所带来的经济效益大于新增岩石的剥离成本,则多采矿多剥岩(如表 3 中方案 4,表 4 中方案 1,2,3);多采矿少剥岩(如表 3 中的方案 5,表 4 中的方案 4,5).无论是基于 2008 年采场现状的境界优化,还是基于 2016 年的采场现状的境界优化,在保持其他技术经济参数不变条件下,帮坡角变陡后,境界开采范围在不断缩小,底部尺寸增大或者深度增加.不同上盘帮坡角增陡方案获得的最终境界,由于矿岩采剥量变化不一样,境界内总的生产成本不一定降低,但境界总盈利是增加的.

5 结 论

1) 加陡帮坡角,岩石剥离量不一定减小,所以生产成本也不一定降低,但境界总盈利增加.不同帮坡角加陡方案得到的最终境界,矿岩量有 3 种变化情况:①岩石剥离量减少,回采矿石量减少,少剥离岩石产生的经济效益大于矿石损失价值;②岩石剥离量增加,回采矿石量增加,多回采矿石产生的经济效益大于多剥离岩石产生的成本;③岩石剥离量减少,回采矿石量增加.

2) 随着帮坡角增加,境界开采范围缩小,境界底部尺寸或增大或者开采深度下降;加陡帮坡角有利于降低平均剥采比,但受矿体赋存条件影响,个别情况平均剥采比可能增大(但变化很小,如表 4 中方案 1).

参考文献:

- [1] 曹兰柱,贾兰.露天矿深部境界陡帮开采最终帮坡角的确定[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009,28(sup1):25-27.
(Cao Lan-zhu, Jia Lan. Determine the final slope angle of deep realm steep working slope mining in PingZhuang West open pit mine[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2009, 28(sup1): 25-27.)
- [2] 郑友毅,薛应东,曹兰柱.倾斜煤层深凹露天矿深部开采关键技术研究[J].采矿与安全工程学报,2009,26(4):494-498.
(Zheng You-yi, Xue Ying-dong, Cao Lan-zhu. Key technology about deep mining of surface mine with inclined coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 494-498.)
- [3] Feng S J, Sun S G, Yi Y N. Study on optimization method of

the slope angle design for open-pit mine [C]//2nd International Conference on Energy and Environmental Protection. Guilin, 2013: 656 – 660.

- [4] Shishvan M S, Sattarvand J. Modeling of accurate variable slope angles in open-pit mine design using spline interpolation [J]. *Archives of Mining Sciences*, 2013, 57(4): 921 – 932.
- [5] Contreras L F. An economic risk evaluation approach for pit slope optimization [J]. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2015, 115 (7): 607 – 622.
- [6] Peng C, Guo Q S, Zhang Z C, et al. Study on ultimate slope angle optimization and stability analysis of slopes in an open-pit mine [C]// 3rd ISRM Young Scholars' Symposium on

Rock Mechanics. Xi'an, 2014: 435 – 438.

- [7] Akdag S, Basarir H, Karpuz C, et al. Stability analysis and optimized slope angle for the iron ore open-pit mine [C]// 24th International Mining Congress of Turkey. Antalya, 2015: 1 – 7.
- [8] Lerchs H, Grossmann I F. Optimum design of open-pit mines [J]. *Transactions on Canadian Institute of Mining*, 1965, 68(1): 17 – 24.
- [9] Wright E A. The use of dynamic programming for open pit mine design; some practical implications [J]. *Mining Science and Technology*, 1987, 4(2): 97 – 104.
- [10] Wright E A. The use of dynamic programming for open pit mine design; some practical implications [J]. *Mining Science & Technology*, 1987, 4(2): 97 – 104.

(上接第 692 页)

5 结 论

1) 矿体与大理岩、片岩微量元素质量分数及变化趋势的一致性,反映三者成因有密切联系;岩浆岩体与矿化体表现出的相似性和局部差异性,表明印支期岩浆活动可能影响矿床形成,部分成矿物质源自岩浆岩体。

2) 矿体、岩浆岩和赋矿围岩稀土配分模式基本一致,均为右倾轻稀土富集型,δEu 均具弱的负异常,反映金成矿与地层和岩浆岩关系密切;矿石矿物的 Sm/Nd 值、δEu 异常显示出花岗岩类部分特征及多期性。

3) 稀土元素特征显示成矿热液为富 Cl⁻ 的还原性流体,反映了岩浆热液叠加成矿作用。

4) 小佟家堡子金矿床成矿物质来源和成矿流体来源具有复杂性,吕梁期花岗岩、燕山期花岗岩与盖县组片岩和大石桥组大理岩均为矿体形成提供成矿物质,且深部成矿物质也参与成矿,矿床类型为岩浆热液叠加型金矿床。

参考文献:

- [1] 刘国平,艾永富. 辽宁小佟家堡子金矿床成矿时代探讨 [J]. *矿床地质*, 2002, 1: 53 – 57.
(Liu Guo-ping, Ai Yong-fu. Study on ore-forming epoch of Xiaotongjapuzi gold deposit, Liaoning province [J]. *Mineral Deposits*, 2002, 1: 53 – 57.)
- [2] Rare B M. Earth element mobility during hydrothermal and

metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium [J]. *Chemical Geology*, 1991, 93(3/4): 219 – 230.

- [3] Michard A. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(3): 745 – 750.
- [4] Sverjensky D A. Europium redox equilibrium in aqueous solutions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 67(1): 70 – 78.
- [5] Parker M V K, Mason P R D, Westrenen W V. Trace element partitioning between ilmenite, armalcolite and anhydrous silicate melt; implications for the formation of lunar high-Ti mare basalts [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(15): 4179 – 4193.
- [6] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society*, 1989, 1: 313 – 345.
- [7] 赵睿. 辽东小佟家堡子金矿床成矿作用研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
(Zhao Rui. Research on metallization of Xiaotongjapuzi gold deposit in eastern Liaoning [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.)
- [8] 王恩德, 门业凯, 贾三石, 等. 胶东郭城金矿稀土元素地球化学特征及其对成矿的指示意义 [J]. *稀土*, 2014, 3: 6 – 12.
(Wang En-de, Men Ye-kai, Jia San-shi, et al. REE geochemical characters of the Guocheng gold deposit, eastern Shandong province and its significance to mine realizations [J]. *Chinese Rare Earths*, 2014, 3: 6 – 12.)
- [9] Claude J A. Isotope geology [M]. London: Cambridge University Press, 2008: 1 – 510.
- [10] Flynn R T, Burnham C W. An experimental determination of rare earth partition coefficients between a chloride containing vapor phase and silicate melts [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1978, 6: 657 – 943.