

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.04.020

分期矿量范围对境界优化的影响

顾晓薇, 张伟峰, 王青, 胥孝川

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 以帮坡角及技术经济参数为依据, 基于矿床数值模型, 运用锥体排除法生成最大境界。根据在最大境界内产生的地质最优候选境界序列, 设置5组不同分期矿量范围。通过对分期数、分期境界内的矿岩量、净现值及各分期跨度时间的对比, 分析分期矿量范围对境界优化的影响。优化结果表明: 分期矿量下限不变, 上限增加, 分期数减少, 由9期开采转为8期开采; 分期境界内采矿量、岩石剥离量的波动主要发生在前几个分期境界内。总净现值一直增加, 但增加幅度逐渐减小。各分期时间跨度下限不变, 上限逐渐增加。从总净现值及分期跨度时间来看, 分期矿量范围在6~9年或6~10年更适于该矿山提高经济效益。

关键词: 露天矿; 境界优化; 分期开采; 分期矿量; 矿床数值模型

中图分类号: TD 216 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)04-0557-06

Influence of Staging Ore Volume on Boundary Optimization

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

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Wei-feng, E-mail: 610735412@qq.com)

Abstract: The cone elimination method was used to generate the maximum boundary based on established numerical model of ore deposits considering slope angle and technical economic parameters. On the basis of the geological optimum candidate boundary sequence produced in the maximum boundary, five groups of staging ore volume were set up. By comparing the staging number, the amount of ore and rock in staging boundary, the net present value and the time span of each stage, the influence of staging ore volume on boundary optimization was analyzed. The optimization results showed that the lower limit of the staging ore volume remains unchanged and the upper limit increases, the staging number decreases from 9 to 8. The fluctuation of the mining amount and the rock stripping amount in the staging boundary mainly occurs in the first few stages. The total net present value has been increasing, however the increase is gradually decreasing. The lower limit of the staging time span is unchanged, the upper limit is gradually increasing. According to the total net present value and the staging time span, staging ore volume in 6~9a or 6~10a is more suitable to improve economic efficiency.

Key words: open-pit mine; boundary optimization; installment mining; staging ore volume; numerical model of mine deposit

随着计算机的快速发展, 很多国内外研究者对露天境界优化理论和方法进行了深入研究。Lemieux 系统详细地描述了浮锥法的算法步骤^[1]; Marino 等^[2]采取子区域搜索和评价的形式优化算法; Phillips^[3]采取逐水平搜索方式优化算法; Lerchs 等^[4]提出的图论法已经成为境界优化

的经典算法; Lipkewich 等^[5]提出了求解有向图中最大闭包的“分层蛋糕法”; Yegulalp 等^[6]应用网络最大流法优化最终境界。算法的不断改进使得优化过程更加高效、优化结果更加准确。

进入本世纪后, 对境界优化的最新进展主要是把更多地质、经济环境等不确定性条件纳入优

收稿日期: 2018-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474049, 51674062); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51604061); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N160104009)。

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。

化方法中. Frimpong 等^[7]在优化中考虑结构、水文和工程地质等条件的影响; Jalali 等^[8]考虑境界形态的不确定性; Latorre 等^[9]将资金时间价值考虑到境界优化中. 优化境界存在一个内在缺陷, 它忽略了与其他要素的相互作用, 因此必须将境界与其他要素同时优化.

对于国内外大多数露天矿山, 分期开采已经逐渐成为各矿山降低投资风险、提高经济效益的主要开采方式. 由于各矿山资金投入不同, 因此前期对于分期矿量范围的设计需更加合理, 范围过大可能需要购买更多大型剥岩设备, 范围过小可能造成产能过低、浪费设备. 鉴于此, 本文以某露天矿为例, 研究分期矿量范围对境界优化的影响, 通过设置五组不同分期矿量范围, 对比分析分期数、分期境界内矿岩量、净现值及各分期间的时间跨度, 找到更加经济合理的分期矿量范围, 为实行分期开采的矿山企业提供参考和决策.

1 矿床数值模型

应用 Metalminer 软件进行优化的前提就是根据矿山现场数据建立所需的矿床数值模型. 主要包括地表标高模型和品位块状模型. 除建立矿床数值模型外, 此软件主要功能还有境界优化、开采计划优化及车铲设备配置等.

1.1 地表标高模型

标高模型是二维块状模型, 它是把矿床在水平面范围划分为二维模块形成的离散模型, 模块的特征值是模块中心处的标高. 标高模型通常用来描述地表地形、露天采场形态等.

建立标高模型依据的数据一般有两类: 一是点数据, 如探矿钻孔的孔口标高或对矿区进行测量得到的测点标高; 另一类是等高线数据, 即在矿区已经有的标高等高线图.

本文基于等高线数据建立标高模型, 这种建模优势在于可以获得较高的准确度, 而且对突变性的地貌变化有较好的控制.

图 1 是模块标高插值示意图, 方块 V 为某一被估模块. 模块水平方向一般取 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ 正方形, 竖直高度一般为露天矿实际生产台阶高度. 对其估值的算法如下^[10]:

1) 在选定的一个起始方向上做一条通过模块中心且足够长的直线, 称为扫描线.

2) 将扫描线分成两部分, 以模块中心为边界. 扫描线位于图中实线位置时两点为 u 和 v . 计算并记录这两点距离模块中心间的距离, 称为交

点距离.

3) 以与模块中心成一定角度顺时针或逆时针旋转扫描线, 重复步骤 2), 这样可以获得另外一对交点, 将该对交点距模块中心间的距离与记录中的交点距离比较, 保留相距近的一对交点及其距离.

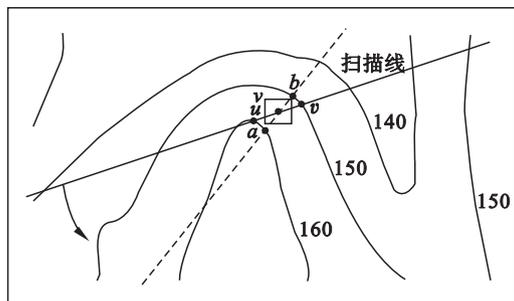


图 1 模块标高插值示意图

Fig. 1 Schematic diagram of module elevation interpolation

4) 以 $\Delta\alpha$ 为步长, 继续绕模块中心按相同方向旋转扫描线, 直到旋转的累计角度等于 (或大于) 180° . 这样, 通过 180° 扫描, 在某个方向上的模块的两侧找到了相距最近的两个交点, 称为最近交点对. 图中的最近交点对为点 a 和点 b .

5) 使用最近的交点线性插值 a 和 b 的标高, 以获得模块 V 中心的标高的估计值 z_v .

6) 对模型中的每个模块重复上述步骤, 以获得所有模块的标高估值. 标高模型建立完毕. 在上述算法中, 角度步长 $\Delta\alpha$ 越小, 估值精度越高, 但运算量大; 模块边长越小, 标高模型的分辨率越高, 但运算量也非常大.

1.2 品位块状模型

品位模型是把矿床在三维空间的指定范围划分成模块, 每一个模块对应一个品位值. 每个模块的品位是依据组合处理后的钻孔取样品位 (即组合样品数据), 通过距离反比法得到. 距离反比法的一般步骤如下:

1) 以被估模块 V 的中心为中心, 并根据影响距离确定影响范围. 在二维空间, 影响范围为圆或椭圆; 在三维空间, 影响范围为球体或椭球体. 而在实际应用中, 常常在矿体走向、倾向和垂直于矿体倾向面的三个方向上分别确定影响距离, 以长方体作为影响范围; 走向上的影响距离最大, 垂直于矿体倾向面方向上的影响距离最小, 倾向上的影响距离介于前两者之间. 一般在建模时, 假定各向同性, 影响距离为 R , 影响范围为半径为 R 的圆.

2) 计算出每一取样与被估模块中心的距离,

并确定落入影响范围的样品。

$$3) \text{ 计算模块的品位 } x_v: x_v = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n d_i^N} \cdot \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^N}}$$

式中: x_i 为落入影响范围的第 i 个取样 ω_i 的品位; d_i 为第 i 个取样到模块中心的距离。由于参与估值的一个取样的权值 b_i 等于取样到被估模块中心的距离 d 的 N 次方的倒数, 即 $b_i = 1/d_i^N$, 也就是说离模块越远的取样其权值越小。

2 帮坡角及技术经济参数

对露天矿而言帮坡角是一个很重要的约束条件, 它既关系到边坡的安全稳定性, 也对矿山利润

有很大影响。帮坡角设置过大会导致边坡失稳, 设置太小在开采深部矿石时需要剥离更多的岩石, 影响经济效益。Metalminer 软件对帮坡角的设置提供了两种实现方式: 一是把矿区划分为几个分区, 每一分区在不同方向上设置帮坡角; 二是不划分分区, 以方位角来设置帮坡角。本文采用第二种方法, 以方位角来设置帮坡角。如表 1 所示, 表中方位角以东为 0° , 逆时针方向旋转, 即正北方位角为 90° 。

技术经济参数作为另外一个很重要的约束条件, 它直接关系到矿石采出量、岩石剥离量和最终盈利情况。本文相关优化参数是从矿山实际生产运营数据报告中获得, 其参数设置如表 2 所示。

表 1 不同方位帮坡角
Table 1 Slope angle in different directions

方位角/ $^\circ$	50	104	136	192	260	290	350
帮坡角/ $^\circ$	41.8	40.5	43.1	41.3	39.5	41.7	43.2

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

采矿成本 元 \cdot t $^{-1}$	剥岩成本 元 \cdot t $^{-1}$	选矿成本 元 \cdot t $^{-1}$	精矿售价 元 \cdot t $^{-1}$	矿石回采率 %	选矿回收率 %	边界品位 %	精矿品位 %
28	10	130	750	95	80	25	66

3 最大境界圈定

根据建立好的矿床数值模型、设置好的帮坡角及获得的技术经济参数, 基于锥体排除法原理

优化产生最大境界。优化最大境界的目的就是尽可能将整个矿体包含在最大境界内。本次最大境界的圈定是通过将精矿价格提高到 750 元/t, 其他技术经济参数不变来实现的。最大境界优化结果如表 3 所示。

表 3 最大境界圈定结果
Table 3 Delineation result of the maximum boundary

原地矿石量 万 t	原地矿石 平均品位/%	原地废石量 万 t	境界平均 剥采比	采出(入选)矿石 量/万 t	精矿量 万 t	采出(排弃)废石 量/万 t	境界总盈利 万元
116 268.5	29.4	476 851.6	4.1	113 871.1	39 395.9	479 248.9	6 762 781.1

4 产生地质最优境界序列

分期境界优化的前提是要在得到的最大境界内产生一系列地质最优候选境界序列, 产生该序列主要约束条件有境界平均剥采比、最小境界矿岩量及相邻境界矿岩量增量。产生候选境界序列的目的是逐步排除总量等于设定的矿岩量增量且平均品位最低的模块集, 每排除这样一个模块集

就得到一个更小的境界。

已知某露天矿山生产能力为 1 700 万 t/年, 由于品位模型很大, 在产生地质最优境界序列中, 最小境界矿量控制在 1.36 亿 t(8 年产量)以内; 根据最大境界优化结果知, 境界平均剥采比为 4.1, 则最小境界矿岩总量为 6.8 亿 t; 相邻境界间的矿量增量控制在 8 500 万 t(5 年产量)左右。优化中, 序列优化级别设置为 2, 保存最低品位锥体数为 3 000。产生最优候选境界序列的技术经济参

数保持不变,依然使用表 2 中的数据.

相邻境界之间的矿石增量 ΔV 的设置对最终优化结果的精度有很大影响,比如一个矿石储量 6 亿 t 的矿山,最小境界矿石量设置为 2 亿 t,如果 ΔV 设置很大,为 1 亿 t,则一共产生 5 个候选境界序列,即 $V_5 = 6$ 亿 t, $V_4 = 5$ 亿 t, $V_3 = 4$ 亿 t, $V_2 = 3$ 亿 t, $V_1 = 2$ 亿 t,也就是说最优境界只可能是这 5 个中的一个,而实际情况可能是境界内矿石量 4.5 亿 t,即最优解不在该序列内.很明显如果将 V_4 和 V_3 作为最优境界,都与实际情况相差很大,甚至可能存在无解情况.如果 ΔV 设置很小,为 100 万 t,则一共可以产生 400 个左右的境界,需要很大的内存空间且工作量大.一般来说对于一个储量达几亿 t 的矿山来说,100 万 t 的变化完全是可以忽略的,即一个 4.51 亿 t 的境界和一个

4.50 亿 t 的境界设计在误差范围内是允许的,它俩完全可以看作是一个境界.

可以看出增量 ΔV 设置太大,可供选择的地质最优境界就少,容易遗漏最优解,使优化结果偏离最优解太大;如果增量设置太小,产生地质最优境界就越多,工作量大并且消耗大量的存储空间.这就需要确定一个合理的增量 ΔV ,一般来说,以矿山年生产能力作为参考,基本上就可以满足优化结果接近或者等于最优解,且不会消耗过多的内存空间.

优化产生的地质最优候选境界序列结果如表 4 所示,可知,相邻境界之间的矿石增量 ΔV 基本上都控制在了 1 700 万 t(即近似等于矿山年生产能力)左右,误差不超过 1%.

表 4 地质最优候选境界序列
Table 4 Geological optimal candidate boundary sequence

序号	原地矿石量 万 t	原地废石量 万 t	平均剥采比	矿石增量 万 t	废石增量 万 t	增量剥采比	境界盈利 万元
1	14 016.1	14 584.3	1.041	1 706.9	3 027.9	1.774	1 239 788.5
2	15 716.3	17 620.2	1.121	1 700.2	3 035.9	1.786	1 360 378.8
3	17 433.0	20 074.4	1.152	1 716.7	2 454.2	1.430	1 474 012.0
4	19 134.4	22 907.6	1.197	1 701.4	2 833.1	1.665	1 588 017.2
5	20 835.1	26 016.0	1.249	1 700.7	3 108.4	1.828	1 711 711.9
6	22 537.6	29 298.7	1.300	1 702.5	3 282.8	1.928	1 846 603.4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
57	107 736.9	391 818.2	3.637	1 702.6	13 560.6	7.964	6 751 508.6
58	109 439.3	406 527.2	3.715	1 702.4	14 709.0	8.640	6 775 680.8
59	111 147.0	422 707.5	3.803	1 707.7	16 180.3	9.475	6 783 803.6
60	112 847.6	439 593.2	3.895	1 700.6	16 885.7	9.929	6 785 254.1
61	114 552.9	458 394.6	4.002	1 705.4	18 801.5	11.025	6 769 294.5
62	116 268.5	476 851.7	4.101	1 715.5	18 457.0	10.759	6 762 781.1

5 分期境界优化

根据上述得到的地质最优境界序列进行分期境界优化.从国内实行分期开采的矿山总结得到的经验来看,分期矿量范围一般为 6~8 年,因此以 6~8 年为基准分期矿量范围(即分期矿量 10 200~13 600 万 t),依次设置 6~9 年,6~10 年,6~11 年,6~12 年四组以净现值最大为目标函数优化最优分期开采方案,将各方案下的优化结果与基准分期矿量范围进行比较分析.

5.1 分期矿量范围在 6~8 年

境界 1~9 采矿量、剥离量和净现值综合比较

如图 2 所示.分期矿量范围在 6~8 年(以下称基准分期矿量范围),共分 9 期开采,对应 9 个分期境界.从图 2 中可以看出随着开采深度增加(即由境界 1~境界 8),除境界 2 内采矿量最高(即 13 641 万 t),其他各境界内采矿量基本稳定在 12 000 万 t;岩石剥离量近似呈线性增长;由于开采深度增加,岩石剥离量大幅增加,因此净现值 NPV 呈下降趋势,但下降幅度在逐步降低.根据矿山年产量 1 700 万 t,计算出各分期境界内分期时间跨度为 7~8 年之间,总的开采寿命约 64 年.由于露天开采使用的大部分重型设备(如电铲、卡车、钻机)的经济服役年限(约 10 年)在分期时间跨度范围,因此该分期时间跨度是合理的.

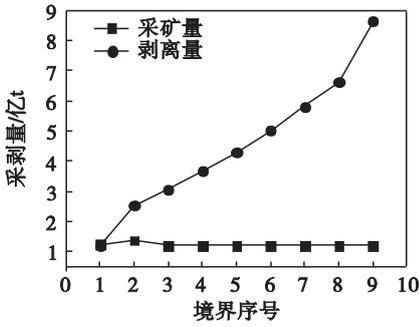
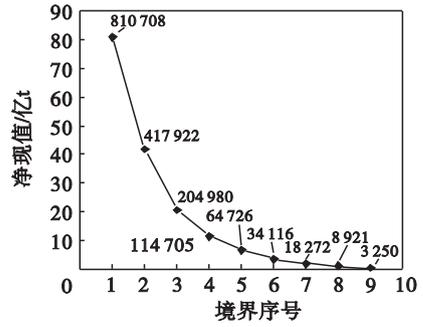


图2 境界1~9 采矿量、剥离量和净现值综合比较

Fig. 2 Comprehensive comparison of mining volume, stripping volume and net present value between boundary 1~9



5.2 分期矿量范围在6~9年,6~10年

境界1~9 采矿量、剥离量和净现值综合比较如图3所示.当分期矿量范围在6~9年和6~10年时,两种方案下的分期数、采剥量及净现值完全相同.与基准分期矿量范围相比,不同之处发

生在境界1和境界2内,境界1内采矿量增加,境界2内采矿量减少,但两个境界内采剥总量不变,总净现值提高1969万元,各分期时间跨度合理(依旧是7~8年).

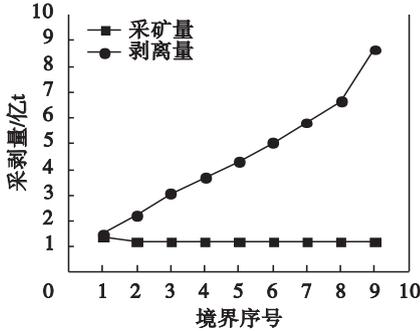
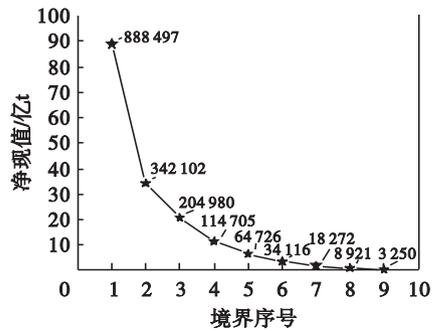


图3 境界1~9 采矿量、剥离量和净现值综合比较

Fig. 3 Comprehensive comparison of mining volume, stripping volume and net present value between boundary 1~9



5.3 分期矿量范围在6~11年

境界1~8 采矿量、剥离量和净现值综合比较如图4所示.当分期矿量范围在6~11年,与基准分期矿量范围相比,分期数由原来9年减少至8年;总净现值提高3165万元,该方案下的分期时间跨度为7~11年,由于露天矿大型设备经济寿命一般为10年以内,因此该方案不理想.

5.4 分期矿量范围在6~12年

境界1~8 采矿量、剥离量和净现值综合比较如图5所示.分期矿量范围在6~12年,与基准分期矿量范围相比,分期数也由原来9年减少至8年;总净现值提高3564万元,该方案下的分期时间跨度为7~12年,由于露天矿大型设备经济寿命一般为10年以内,因此该方案也不理想.

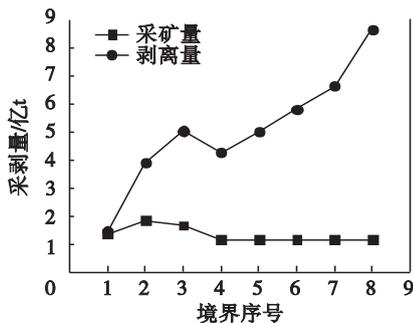
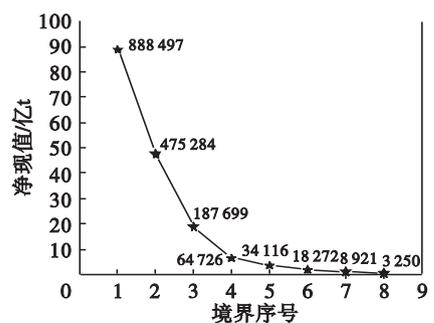


图4 境界1~8 采矿量、剥离量和净现值综合比较

Fig. 4 Comprehensive comparison of mining volume, stripping volume and net present value between boundary 1~8



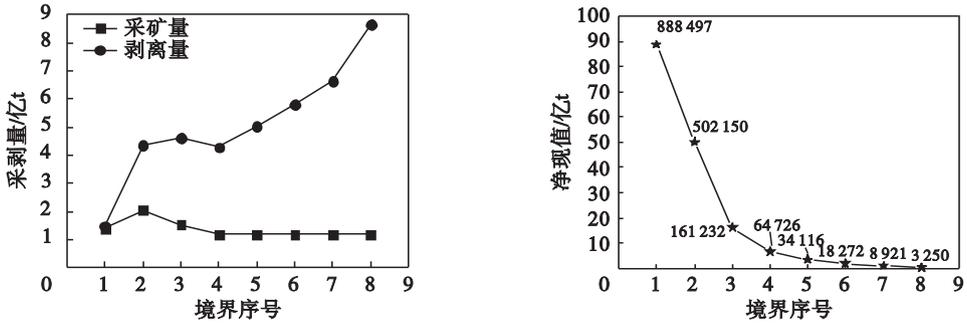


图 5 境界 1~8 采矿量、剥离量和净现值综合比较

Fig. 5 Comprehensive comparison of mining volume, stripping volume and net present value between boundary 1 ~ 8

6 结 论

1) 分期矿量下限不变上限递增,分期数减小(即由 9 期转为 8 期);分期境界内矿石开采量、岩石剥离量的波动主要发生在前几个分期境界内;总净现值一直增加,但增加幅度逐渐减小;各分期时间跨度下限不变,上限递增。

2) 分期数减小,分期时间跨度增加。由于时间跨度过大,露天矿大型设备的经济寿命无法承受,因此优化境界的同时也应该考虑设备配置优化,多因素共同优化对露天矿山实现高效生产十分重要。

3) 虽然分期矿量范围不同,但可能得到相同的分期境界优化结果(即分期矿量范围为 6~9 年和 6~10 年)。由于该方案下总净现值高于基准分期矿量范围,同时分期时间跨度合理,因此该方案对于此矿山提高经济效益效果更为显著。

参考文献:

[1] Lemieux M J. Moving cone optimizing algorithm[J]. *SME-AIME*, 2011, 11(2): 329-345.

- [2] Marino J M, Slama J P. Ore reserve evaluation and open pit planning [C]//Proceedings of Application of Computer Methods in the Miner Industry. Singapore, 2013: 139-144.
- [3] Phillips D A. Optimum design of an open pit [C]//Proceedings of the 10th APCOM. New York, 2012: 145-147.
- [4] Lerchs H, Grossmann I F. Optimum design of open pit mines [J]. *Canadian Institute of Mining Bulletin*, 2015, 23(4): 47-54.
- [5] Lipkewich M P, Borgran L. Two and three dimensional pit design optimization techniques [C]//A Decade of Digital Computing in the Mining Industry. New York, 2009: 1-7.
- [6] Yegulalp T M. New development in ultimate pit limit problem solution methods[J]. *Transaction of the Society for Mining, Metallurgy and Exploration*, 2013, 294: 1853-1857.
- [7] Frimpong S, Asa E, Szymanski J. Intelligent modeling: advances in open pit mine design and optimization research [J]. *International Journal of Surface Mining Reclamation and Environment*, 2002, 16(2): 134-143.
- [8] Jalali S E, Ataee-Pour M, Shahriar K. Pit limits optimization using a stochastic process[J]. *Canadian Institute of Mining Magazine*, 2016, 1(6): 90-94.
- [9] Latorre E, Golosinski T S. Definition of economic limits taking into consideration time value of money [J]. *CIM Journal*, 2011, 2(3): 162-170.
- [10] 王青, 任凤玉, 顾晓薇, 等. 采矿学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 74-76.
(Wang Qing, Ren Feng-yu, Gu Xiao-wei, et al. Mining science [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 74-76.)