

急倾斜薄矿脉中深孔落矿崩矿步距实验研究

安 龙, 邬 金, 徐 帅, 李元辉

(东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 以金厂沟梁金矿 18[#] 薄矿脉为工程依托, 以实验室相似材料实验为手段, 开展倾斜边壁约束条件下端部放矿实验研究。约束边壁条件下, 测得 12, 14 m 段高时沿进路方向放矿椭球体宽度分别为 1.7 和 2.1 m, 流轴角为 4°, 向下盘倾斜。确定步距仿真实验范围为 1, 2, 3 m。通过步距仿真实验, 以回贫差指标最大为判据, 得到 12 和 14 m 段高下, 步距为 1 m 时方案最优。利用三维激光扫描系统 CMS 对 1 m 步距下的工业实验区域进行扫描, 探测结果表明: 爆破后矿岩散体基本全部放出, 实验区域下盘局部出现少量欠挖, 上盘围岩基本完整, 整体爆破效果良好。

关 键 词: 急倾斜薄矿脉; 中深孔落矿; 崩矿步距优化; 相似材料实验; 工业实验

中图分类号: TP

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)04-0560-05

Caving Space Optimization Experiment on Middle-Deep Hole Blasting for Steeply Inclined Thin Veins

AN Long, WU Jin, XU Shuai, LI Yuan-hui

(Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: XU Shuai, E-mail: xushuai@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Taking the 18[#] thin vein of Jinchanggouliang Gold Mine for example, the similar material simulation experiment face-end drawing was conducted under the restraint of the inclined side walls. At the height of 12 and 14 m and inclining to the side walls, the widths of the spheroid were measured as 1.7 and 2.1 m, respectively, under the flow axial angle of 4°. Thus, the scopes of caving space were determined as 1, 2 and 3 m, respectively. Under the optimum experiment between the recovery rate and the dilution rate, the optimum space was determined to be 1 m under the height of 12 and 14 m. The industrial test at the blasting test area under the space of 1 m was accomplished when the 3D laser scanning CMS system was used to scan the tested areas. The results showed that a sound blasting effect was achieved with most part of the bulk ore rocks drawn, the top wall rocks remaining integrated, and the bottom side wall only partially under excavated.

Key words: steeply inclined thin veins; middle-deep hole blasting; caving space optimization; similar material experiment; industrial test

急倾斜薄矿脉在我国有色金属矿山尤其是贵金属矿山占有相当大的比重^[1-2]。对于这种矿体赋存条件, 国内外一直采用浅孔留矿法、削壁充填法、分层或进路充填法等浅孔落矿的方法进行开采, 产能、效率均受到制约。中深孔落矿具有生产能力大、机械化程度高、作业条件安全等优点, 因

此, 将中深孔落矿技术应用于急倾斜薄矿脉开采中, 必将极大地促进该类型矿床的安全高效开采。由于矿脉薄, 施工同样采切工程, 可采矿量少、采切比大; 矿脉薄, 爆破夹制作用大, 中深孔落矿时, 尤为明显; 矿脉薄, 爆破时易将上下盘围岩崩落, 造成损失与贫化; 矿脉薄, 矿岩散体流动空间小,

收稿日期: 2014-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51204031, 51274055); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N130401007); 辽宁省教育厅科学研究项目(L2014100); “十二五”国家科技攻关项目(2013BAB02B03)

作者简介: 安 龙(1987-)男, 内蒙古呼伦贝尔人, 东北大学博士研究生; 李元辉(1968-), 男, 辽宁营口人, 东北大学教授, 博士生导师。

矿石极易在下盘残留,造成矿石损失。崩矿步距为一次爆破的矿石厚度,该参数直接影响爆破效果与矿岩散体的流动效果,因此,开展急倾斜薄矿脉中深孔崩矿步距实验研究,对推进中深孔落矿技术在薄矿脉中的应用具有重要意义。

文献[3-6]表明中厚矿体倾斜边壁约束下放出体与放出漏斗形态受边壁影响,不再是对称形体。边壁对散体移动过程的影响表现为阻隔一部分物料补给源,使相邻部位补给源增添一个指向倾斜边壁方向的体积流分量,从而改变颗粒的移动方向,使颗粒到达漏口所需时间的相对关系发生改变,由此造成放出体及放出漏斗形态的很大变异。相对于中厚矿体,薄矿脉倾斜边壁约束下矿体厚度变小,使得倾斜边壁对散体颗粒流动的影响更加明显,矿岩散体的流动规律更加复杂。文献[7]建立了复杂倾斜边界条件下的散体移动概率密度方程,但该方程所建立的边界是独立给出的,因此,想要精确地找出满足速度边界条件的速度场是比较困难的。文献[8]得到了倾斜边界条件下的放出体几何形态,但该方法的参数值选取困难且较难进行定量分析。

崩矿步距优化研究的方法有理论分析、数值模拟、物理仿真及工业实验,其优化准则有纯矿石回收率最大准则、矿石回收率最大准则、单位工业储量盈利最大准则、单位精矿盈利最大准则、废石在端部出矿口出露的位置判断准则、回贫差最大准则及相似矿山类比法等^[3-6]。其中回贫差最大准则由于可操作性强、量化化容易被广泛应用。本文针对金厂沟梁金矿18[#]脉(脉宽2 m,倾角65°),开展崩矿步距物理仿真实验和工业实验,进而获得最优崩矿步距。

1 急倾斜薄矿脉端部放矿实验

1.1 相似性分析

重力放矿仿真实验认为当2个模型的相似性系数 λ 满足以下条件时,两个模型几何相似、运动学相似:①模型的几何相似包括矿体几何尺寸、放矿口尺寸,矿石颗粒的大小、分布和形状等的相似;②两模型中所采用矿岩散体的重力和体积密度相同,即 $\lambda_g = \lambda_\rho = 1$;③两模型中的剩余摩擦角相同,即 $\lambda_{\phi_r} = 1$ 。为了保证端部放矿仿真实验、步距放矿仿真实验与工业实验的相似性,采取如下措施:①几何相似,参照工业实验采切设计,按照1:25的相似比制作仿真模型,将矿体尺寸、采切工程、步距均按比例缩小制作;②物料相似,从矿

山现场收集矿石与围岩,使得室内实验与工业现场的物料一致;③级配相似,在矿山进行爆破后粒级调查,收集散体流动的矿岩级配,按1:25比例破碎矿岩,进行配比。通过以上措施,可保证室内仿真实验与现场实验矿岩流动规律的一致性。

1.2 倾斜边壁薄矿体端部放矿实验

实验模型如图1所示,实验采用1:25的相似比,模型整体呈平行六面体形状,长400 mm、宽80 mm、高1 200 mm,模拟矿体长10 m、宽2 m、高30 m的倾角65°的急倾斜薄矿脉。进路高100 mm,宽80 mm,紧挨下盘布置,模拟现场高2.5 m,宽2 m的出矿进路。实验用的散体物料选自矿山现场的绢云母化闪长岩和磁铁矿。绢云母化闪长岩作矿石,磁铁矿作覆盖岩石。模型垂直方向每隔50 mm设置一层标志颗粒,共设14层。每层标志颗粒设置0°,180°(垂直进路方向),45°,90°(沿进路方向),135°5个方向,放矿过程中记录每一分层首个标志颗粒放出时的标号及相应的矿岩放出量,放矿结束后从模型上部分层出矿,逐层描绘放出漏斗形态。

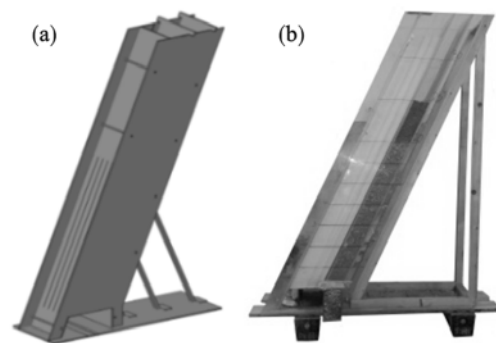


图1 放矿实验模型

Fig. 1 Ore drawing test model

(a)—三维模型;(b)—实物模型。

1.3 端部放矿实验结果分析

倾斜边壁约束条件下单漏口端部放矿放出体形态如图2所示。图2a为垂直进路方向放出体形态,从 z 轴不同高度放出体形态(编号1~9)可以看出,随放出高度的增加,放出体向上盘偏斜,距离出矿口高度越大,放出体向上盘偏斜量越大,放出体越瘦长。该现象表明分段高度越大,下盘矿石流动性越差,下盘残留越大。图2c为沿进路方向放出体形态。放出体受端壁切割不再是对称形体,放出体的流轴(对称轴)前倾,角度约为4°。图2b,2d为45°与135°方向的放出体形态,在这2个方向上,放出体形态与半无限边界条件下相一致,基本不受上、下盘边壁的影响,只受到端壁的切割。

依照矿山当前采用的中深孔落矿设备 YGZ90 的凿岩能力,穿凿 15 m 以内的中深孔效率较高.因此,工业实验采场分段高度取 12 或 14 m 两种结构.12,14 m 分段高度对应模型中放出体高度为 48 和 56 cm 处,在该高度放出体宽度为 6.8,8.4 cm.依照与放出体相切位置的步距为最优步距,可推算出相应工业实验步距为 1.7 和 2.1 m.

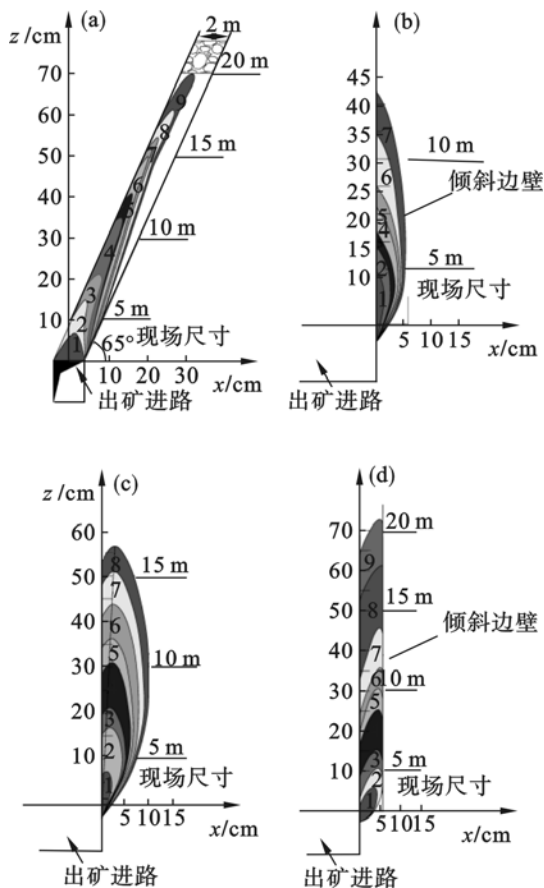


图 2 放出体形态

Fig. 2 Shapes of drawn-out ore body

(a)—0°, 180°; (b)—45°; (c)—90°; (d)—135°.

2 崩矿步距物理仿真实验

2.1 放矿步距仿真实验

步距物理仿真实验模型同样采用 1:25 的相似比,模拟分段高度为 12 和 14 m 两种工况,放矿步距 1,2,3 m 等 6 种方案,实验方案如表 1 所示.实验模型采用端部放矿仿真模型,与端部实验不同之处,在沿进路方向安装步距板,模拟不同步距下矿石的损失与贫化指标.矿山现场边界矿石品位为 2 g/t,截止出矿品位为 1.2 g/t,换算得到实验的截止废石混入率为 52%.

表 1 放矿步距仿真方案
Table 1 Simulation schemes for drawing space

| 方案 | 厚度 m | 高度 m | 截止废石 混入率/% | 步距/m | 实验 次数 |
|----|---------|---------|---------------|------|----------|
| 1 | 2 | 12 | 52 | 1 | 3 |
| 2 | 2 | 12 | 52 | 2 | 3 |
| 3 | 2 | 12 | 52 | 3 | 3 |
| 4 | 2 | 14 | 52 | 1 | 3 |
| 5 | 2 | 14 | 52 | 2 | 3 |
| 6 | 2 | 14 | 52 | 3 | 3 |

2.2 回贫差最优步距判别准则

回贫差最优步距判别量的计算式为

$$\eta_k = \frac{\text{放出矿石量}}{\text{实际装矿量}}, \quad (1)$$

$$D_y = \frac{\text{放出废石量}}{\text{放出总量}}, \quad (2)$$

$$E = \eta_k - D_y. \quad (3)$$

式中: η_k 为矿石实际回收率,%; D_y 为矿石实际贫化率,%; E 为回贫差,%

2.3 步距放矿实验结果分析

每组实验重复 3 次,共计 18 次,取平均值作为该方案最终数据.各方案回收率、贫化率、回贫差指标如图 3 所示.

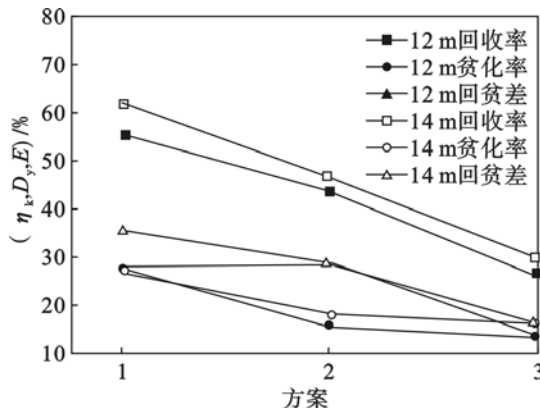


图 3 多方案放矿指标曲线图

Fig. 3 Curves of multiple scheme drawing index

从图 3 矿石回收率曲线可以看出,段高 14 和 12 m 时 1 m 步距的矿石回收率最大.矿石贫化率曲线表明段高 14 和 12 m 时,1 m 步距的矿石贫化率均最高.回贫差曲线表明段高 14 m 时,1 m 步距的回贫差明显高于其余两个步距.表明 14 m 段高下,1 m 步距为最优步距.段高 12 m 时,1 m 步距和 2 m 步距的回贫差指标相差仅为 0.6%,因此,单纯从回贫差指标无法确定 12 m 段高下的最优步距.因此,增加一个纯矿石回收指标来判断最优步距.12 m 分段下纯矿石回收率如表 2 所示.从纯矿石回收率和矿石回收率看,步距 1 m 优于

2 m 方案. 因此, 12 m 段高时最优放矿步距为 1 m. 炮孔利用率、炸药单耗及出矿量进行综合评估.

表 2 12 m 段高无贫化放矿实验结果
Table 2 Non-dilution drawing test result at height of 12 m

| 方案 | 实际步距/m | 实验步距/cm | 纯矿回收率/% | 实验次数 |
|----|--------|---------|---------|------|
| 1 | 1 | 4 | 55.31 | 3 次 |
| 2 | 2 | 8 | 43.92 | 3 次 |

2.4 优化结果分析

从实验结果及图 3 回收率、贫化率及回贫差曲线分析可得如下规律:①分段高度一定情况下, 矿石回收率、贫化率、回贫差均随步距增大而降低. ②步距一定的情况下, 矿石回收率、贫化率和回贫差均随段高增加而增大. 产生该现象的本质原因:段高一定、步距增大时, 同等矿量被回收的次数少, 回收率就小;步距小, 回收次数多, 但同时增加了矿石的贫化次数, 贫化率也增高. 步距小时, 废石混入主要为端部混入, 随着步距增大, 废石混入源逐渐由端部转向顶部, 矿石贫化前, 纯矿石回收量增加, 总体贫化矿石数量减少.

3 崩矿步距工业实验

3.1 崩矿步距工业实验方案

中深孔落矿实验区域矿体平均厚度 2 m, 倾角 65°, 设计 6 个炮孔, 炮孔平行矿体布置, 倾角 65°, 孔间距 1 m, 直径为 60 mm, 排间距为 1 m, 一次爆破 6 个炮孔, 堵塞长度为 1.5 m, 采用直径为 40 mm, 长度为 50 cm 的药卷进行不耦合装药, 设计如图 4 所示. 1, 2 炮孔为拉槽炮孔, 3~6 孔为落矿孔. 单孔起爆, 微差爆破, 微差时间为 50 ms.

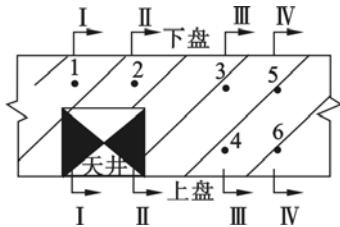


图 4 爆破设计图
Fig. 4 Blasting design graph

3.2 步距工业实验效果评估

1) 中深孔落矿爆区形态扫描. 采用加拿大 Optech 公司的 CMS 三维空区扫描系统对中深孔爆破步距实验效果进行评估, 扫描爆破后空区的形态, 建立爆区的三维模型, 见图 5; 利用爆区模型与矿体三维模型, 对爆破后矿体上下盘的损伤、

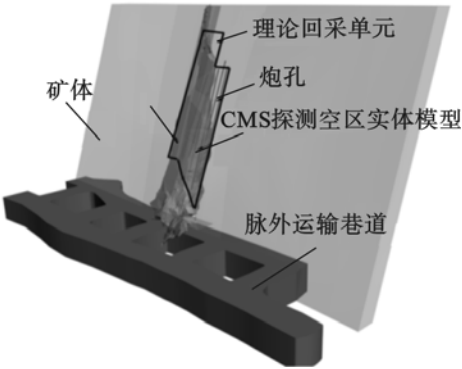


图 5 爆区扫描形态三维图
Fig. 5 3D scanning graph of blasting area

CMS 扫描爆破后空区体积为 69.91 m³. 爆破前已有空区体积为 33.54 m³, 爆破矿体体积为 36.37 m³. 现场矿石密度为 2.7 × 10³ kg/m³, 则爆下矿石质量为 98.199 t. 同时, 爆破后对实验采场的出矿量进行记录, 采场共出矿 98 车, 矿车体积为 0.7 m³, 满车系数为 0.8, 松散矿石密度为 1.8 × 10³ kg/m³, 则出矿总质量为 98.78 t. 现场统计与空区扫描出矿量误差为 0.58%.

2) 炮孔利用率分析: 统计图 6 中炮孔的有效

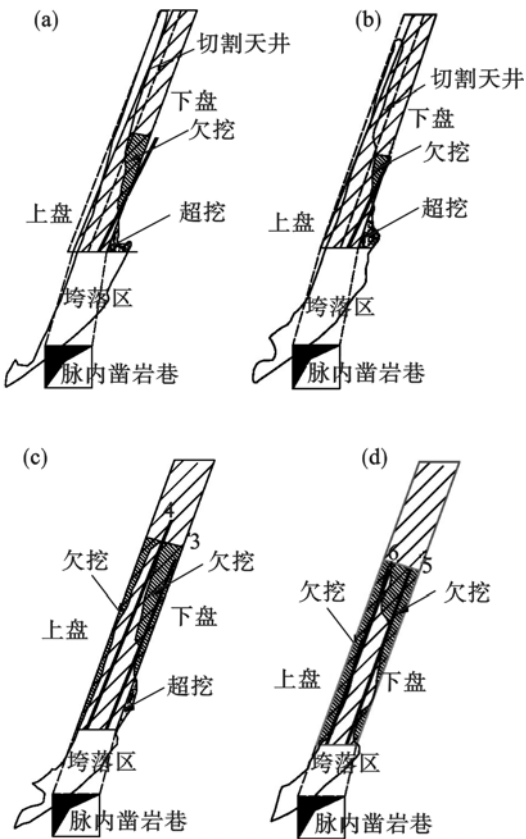


图 6 爆区剖面图
Fig. 6 Section of blasting area
(a)—I—I 剖面; (b)—II—II 剖面;
(c)—III—III 剖面; (d)—IV—IV 剖面.

爆破长度,将其与施工炮孔长度进行对比,即可得到实验爆破中炮孔的有效利用率,如表 3 所示。

表 3 炮孔长度与有效爆破长度对比分析表
Table 3 Comparison data of blasting hole length and effective blasting length

| 炮孔 序号 | 炮孔长度 m | 有效爆破长度 m | 炮孔有效利用率 % |
|----------|-----------|-------------|--------------|
| 1 | 6.8 | 2.30 | 33.82 |
| 2 | 5.4 | 2.98 | 55.19 |
| 3 | 9.7 | 4.30 | 44.33 |
| 4 | 12.0 | 11.05 | 92.08 |
| 5 | 10.0 | 6.86 | 68.60 |
| 6 | 9.9 | 9.90 | 100.00 |

图 6 的 4 个剖面图中均显示出在矿体下盘处出现了少量欠挖,下盘炮孔有效利用率低,说明下盘炮孔爆破效果欠佳。矿体上盘欠挖量较小,爆破边界规整,炮孔的有效利用率较高,基本达到了设计要求。下盘炮孔利用率低和爆破效果差的原因是下盘炮孔施工角度与切割井不平行,致使孔底抵抗线增大,以至于爆破自由空间不足,爆破效果欠佳。同时说明,下盘炮孔与下盘距离过大,需要向下盘移动。

3) 炸药单耗统计。现场出矿量为 98.78 t,中深孔爆破消耗炸药量为 81 kg,则炸药实际单耗 $q = 0.82 \text{ kg/t}$ 。狭窄矿体爆破夹制作用大,导致单耗高于正常爆破消耗,爆破下的矿石块度适宜,适合现场扒装机出矿。

4 结 论

1) 倾斜边壁约束条件下单漏口端部放矿,放出体和放出漏斗形态受到倾斜边壁及端壁面的影响,整体形态发生变异。放出体向上盘倾斜,通过实验得到现场中放出体高度 12, 14 m 时,放出体宽度为 1.7, 2.1 m。

2) 步距仿真实验证明 14 m 高度下 1, 2, 3 m 工况下, 1 m 步距回贫差最大,放矿效果最好。12 m 段高下,通过对纯矿石回收率、矿石回收率及回贫差 3 个指标的对比分析得到 1 m 步距最优。

3) 工业实验证明,崩矿步距 1 m 条件下,采用 1 m 的孔间距、60 mm 孔径、平行布孔条件下,爆破效果较好。虽然局部存在超欠挖情况,但爆破

基本达到预期效果。

参考文献:

- [1] 曹永忠. 急倾斜薄矿脉开采中贫化率的控制[J]. 湖南有色金属, 1993, 9(3): 133 - 136.
(Cao Yong-zhong. The control dilution ratio of mining on the steeply inclined thin vein [J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 1993, 9(3): 133 - 136.)
- [2] 韩志坚, 王坚. 薄矿脉开采之一急倾斜薄矿脉开采[J]. 采矿技术, 1995(36): 7 - 12.
(Han Zhi-jian, Wang Jian. The mining method of steeply inclined thin vein one of the case of steeply inclined thin vein [J]. *The Technique of Mining*, 1995(36): 7 - 12.)
- [3] 余健. 高分段大间距无底柱分段崩落采矿贫化损失预测与结构参数优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
(Yu Jian. Research on the prediction of ore dilution and loss rate and the optimization of structural parameters of high sublevel large-space drive interval pillarless sublevel caving [D]. Changsha: Central South University, 2007.)
- [4] 张国联, 邱景平, 宋守志. 张家洼矿无底柱分段崩落法结构参数灰色决策[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2006, 27(4): 454 - 457.
(Zhang Guo-lian, Qiu Jing-ping, Song Shou-zhi. Grey decision-making for constructional parameters of non-pillar sublevel caving in Zhangjiawa iron mine [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2006, 27(4): 454 - 457.)
- [5] 陶干强, 刘振东, 任凤玉, 等. 无底柱分段崩落法采场结构参数优化研究[J]. 煤炭学报, 2010, 8: 1269 - 1272.
(Tao Gan-qiang, Liu Zhen-dong, Ren Feng-yu, et al. Optimization research of stope structural parameters in sublevel caving with non-pillar [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 8: 1269 - 1272.)
- [6] 吴爱祥, 武力聪, 刘晓辉, 等. 无底柱分段崩落法结构参数研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 37(5): 1045 - 1050.
(Wu Ai-xiang, Wu Li-cong, Liu Xiao-hui, et al. Study on structural parameters of sublevel caving [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2012, 37(5): 1045 - 1050)
- [7] 任凤玉. 随机介质放矿理论及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 122 - 123.
(Ren Feng-yu. Research on the stochastic medium theory for ore drawing [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994: 122 - 123.)
- [8] 邢继波, 王泳嘉. 离散元法的改进及其在颗粒介质研究中的应用[J]. 岩土工程学报, 1990(5): 51 - 57.
(Xing Ji-bo, Wang Yong-jia. Improvement of discrete element method and its applications in granular media [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1990(5): 51 - 57.)