

# 多分段多进路矩形放矿口尺寸对出矿效果的影响

张治强<sup>1,2</sup>, 杨建东<sup>1</sup>, 于志宏<sup>3</sup>, 马 驰<sup>1</sup>

1. 辽宁科技大学矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051;
2. 辽宁省金属矿产资源绿色开采工程研究中心, 辽宁 鞍山 114051;
3. 金诚信矿业管理股份有限公司, 北京 101500)

**摘要:** 针对无底柱分段崩落法岩石混入率较高、矿石损失较大的问题,应用多分段多进路的相似模型,进行了不同放矿口高度和宽度条件下的放矿实验,从散体流动性的影响因素和散体压力平衡拱的形成与破坏的角度,分析了矿石回收率和岩石混入率的变化规律。结果表明:当同一分段的各进路同时出矿时,适当扩大放矿口宽度或者降低放矿口高度能够增加矿石移动带宽度,改善矿石流动性,提高矿石回收率,降低岩石混入率,而且每一个分段的矿石回收率也得到明显提升。

**关键词:** 散体流动性; 放矿口尺寸; 放矿效果; 回收率; 岩石混入率

**中图分类号:** TD853    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1004-4051(2020)11-0107-05

## Influence of dimension of rectangular ore drawing hole with multi-sublevel and multi-way on ore drawing effect

ZHANG Zhiqiang<sup>1,2</sup>, YANG Jiandong<sup>1</sup>, YU Zhihong<sup>3</sup>, MA Chi<sup>1</sup>

1. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;
2. Engineering Research Center of Green Mining of Metal Mineral Resources Liaoning Province, Anshan 114051, China;
3. JCHX Mining Management Co., Ltd., Beijing 101500, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of high rock mixed rate and large ore loss in sublevel caving without sill pillar, the drawing experiments under different height and width of ore-drawing hole are carried out by using the similar model of multi-sublevel and multi-path. From the angle of influencing factors of granules fluidity and formation and destruction of granules pressure balance arch, the variation laws of ore recovery and rock mixed rate are analyzed. The results show that when all mining approach of the same sublevel are mined at the same time, properly enlarging the width or reducing the height of the ore-drawing hole could increase the ore moving bandwidth, improve the ore fluidity, increase the ore recovery and reduce the rock mixed rate, and the ore recovery rate of each sublevel is also significantly increased.

**Keywords:** granules liquidity; sizes of ore draw hole; ore drawing effect; recovery; rock mixed rate

自无底柱分段崩落法引入我国,先后在大庙、镜铁山、符山、梅山等矿山进行了试验并取得显著成效,这种采矿方法具有操作简单、开采强度大、机械化程度高、作业安全可靠等优点<sup>[1-3]</sup>,已在国内的金

属矿山获得了快速推广,目前已有近60年的发展历程<sup>[4-6]</sup>。然而这种采矿方法也存在一些缺陷:该采矿方法的放矿作业是在松散的覆盖岩层下进行,矿石和覆盖岩层直接接触,较小的覆盖层颗粒会穿过空

收稿日期: 2019-09-25    责任编辑: 刘硕

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题项目资助(编号:2013BAB02B08);辽宁省金属矿产资源绿色开采工程研究中心开放课题项目资助(编号:USTLKFJ201604)

第一作者简介: 张治强(1971-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事金属矿产资源开发方面的教学与研究工作, E-mail: 634870500@qq.com。

引用格式: 张治强,杨建东,于志宏,等. 多分段多进路矩形放矿口尺寸对出矿效果的影响[J]. 中国矿业, 2020, 29(11): 107-111. doi: 10.12075/j.issn.1004-4051.2020.11.021

隙与较大的矿块形成一条混合带,因此出矿过程中难免有岩石混入矿石,造成矿石损失贫化加大,部分矿石不能放出,形成永久残留,矿石的回收率较低,影响放矿效果。为了降低矿石的损失贫化,提高开采效益,专家学者从该方法的放矿工艺、结构参数、覆盖层形成方式等方面做了大量研究,并且取得了丰硕成果。

孙浩等<sup>[7]</sup>基于 PFC<sup>3D</sup>模拟软件研究了影响放出体流动性的主要因素,认为放矿初始阶段,矩形放矿口尺寸是影响放出体流动性的最显著因素,其次是岩块之间的摩擦系数,矿石形状对流动性的影响最小,随着放矿过程的进行,矿石形状逐渐成为最显著的影响因素,另外两个因素次之。陶干强等<sup>[8]</sup>从矩形放矿口大小、颗粒粒径以及散体材料入手研究了散体颗粒的流动特性,认为放矿口尺寸和颗粒粒径会影响散体的流动性。乔攀登等<sup>[9]</sup>分析了回采进路宽度和出矿方式对端部放矿效果的影响,通过适当改善矿岩散体的流动范围,有助于上部矿岩平稳下降。宋超等<sup>[10]</sup>设计物理实验研究了边孔角对放矿效果的影响,认为边孔角通过影响放矿口上方两侧矿岩的流动性进而影响放出体形态。安龙等<sup>[11]</sup>借助物理实验,研究了倾斜边壁约束条件下的端部放矿规律,测得了分段高度不同时沿回采进路方向放矿椭球体的宽度,通过仿真实验,确定了该条件下崩矿步距的最优方案。为了降低无底柱分段法采出的矿石损失贫化较大的技术难题,路增祥等<sup>[12]</sup>设计了实验室物理模型,研究了铲入深度对放出矿石量、矿石回收率及岩石混入率等指标的影响,结果发现正面岩石和顶部岩石的入侵时间不同,正面岩石入侵会早一些,主要原因是放矿口附近散体的不均匀流动影响正面岩石较早入侵。

当前,地下采场大型设备已经逐渐投入,采场的各项结构参数日趋增大,必然引起回采进路尺寸的增加。为了进一步研究矩形放矿口尺寸对矿石回收率、岩石混入的影响规律,设计了多分段多进路的放矿实验模型,通过改变放矿口宽度和高度,对矿石回收率和岩石混入率进行研究。

## 1 多进路多分段放矿研究

### 1.1 实验模型和材料

在实验室,按相似比 1:50 来模拟采场实际的分段高度、进路间距以及崩矿步距,设计多分段多进路实验室模拟放矿模型,边孔角  $45^\circ$ ,模型总高度 1 800 mm、长度 1 200 mm、宽度 180 mm,设置了 4 个分段,分段高度和放矿口间距均为 400 mm,按菱形布置 10 个放矿口。分别进行了放矿口高度×宽

度为 70 mm×100 mm、80 mm×100 mm、80 mm×80 mm 的 3 组实验。模型的其他相关参数如图 1 所示。实验材料选用磁铁矿和石英岩,矿岩的粒径均为 13~16 mm。

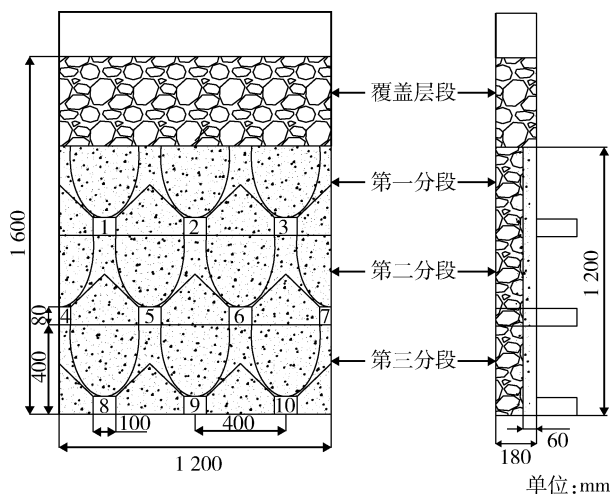


图 1 模型结构

Fig. 1 Structure of the model

### 1.2 实验过程

在第三分段的崩矿步距处放入隔离板,隔离板两侧分别充填一个分段的矿石和岩石,充填完毕后将隔离板取出;第二分段和第一分段重复上述过程,最上面的一个分段充填 400 mm 高的石英岩作为覆盖岩层。

实验开始后,从放矿口两边交替均匀出矿,每出 6 铲为一次计量单位,称重并记录,在 5 次连续的计量单位中,若有 3 次或 3 次以上计量单位的岩石混入率超过 70%,则停止放矿。每一组实验重复 3 次,出矿过程如图 2 所示。

## 2 实验数据分析

实验中,由于 1 号放矿口、3 号放矿口、4 号放矿口、7 号放矿口、8 号放矿口和 10 号放矿口均靠近模型边界,为避免边界条件对放矿指标的影响,主要分析在 2 号放矿口、5 号放矿口、6 号放矿口和 9 号放矿口的岩石混入率和矿石回收率。

### 2.1 矩形放矿口宽度对放矿效果的影响

放矿过程中,矿岩散体的流动区域按照散体移动带大致分为移动区和微动区,如图 3 所示。在工程中,影响散体流动性的因素有很多<sup>[8]</sup>,但是放矿口尺寸却是一个可控因素。在端部放矿中,当分段高度保持不变时,矿石的放出总量受沿进路方向散体流动参数( $\alpha$ 、 $\beta$ )和垂直进路方向散体流动参数( $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ )的共同影响<sup>[13-14]</sup>,因此通过调整放矿口的尺寸可以改善矿岩的流动性。在端部放矿实验中,各分段

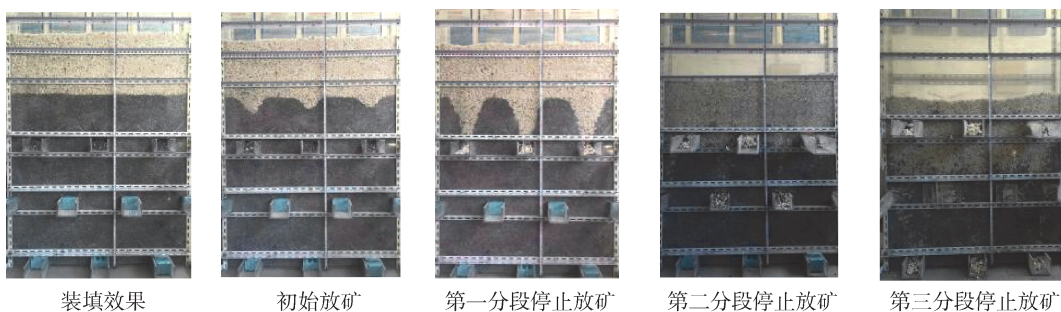


图 2 放矿过程

Fig. 2 The drawing process

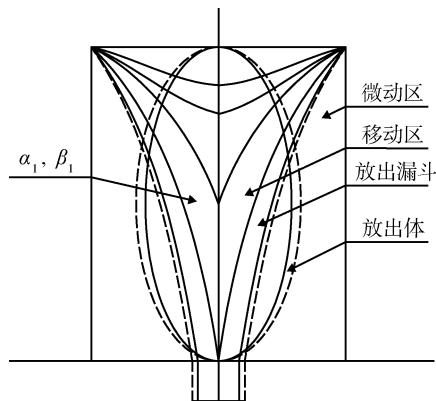


图 3 放出体边界移动情况

Fig. 3 Boundary movement of drawn-out ore body

各进路的散体流动参数存在差异,使得散体矿岩颗粒在向下移动的过程中具有不确定性和随机性。当扩大放矿口宽度时,放出体中心轴(流轴)两侧的矿石流动性增大,放出体移动带变宽,即放出体“变胖”。当铲取等量矿石时,顶部矿石竖直向下移动的速度大于正面岩石向前移动速度,在一定程度上延缓了正面岩石侵入的速度,因而“变胖”的放出体能够增加矿石的放出量。倘若在岩石漏斗破裂的同时,正面岩石也刚好到达放矿口,这种出矿方式即提高了纯矿石的放出量,同时也降低了岩石的混入率,提高了矿石的回收率。

实验中,与宽度为 80 mm 的放矿口相比,宽度为 100 mm 的放矿口放矿效果较好,截止放矿时每个放矿口放出的矿石中岩石的混入率明显降低(4 号放矿口和 7 号放矿口除外),并且矿石的回收率均提高,各放矿口岩石混入率和矿石回收率的变化情况如图 4 和图 5 所示。由图 4 和图 5 可知,2 号放矿口、5 号放矿口、6 号放矿口和 9 号放矿口的岩石混入率依次降低了 1.98%、0.54%、0.21% 和 6.37%,矿石回收率依次提高了 1.80%、2.56%、0.77% 和 10.81%。不但每一个放矿口放出的矿岩量发生变化,而且三个分段的岩石混入率和矿石回收率均有较理想的变化,见表 1。

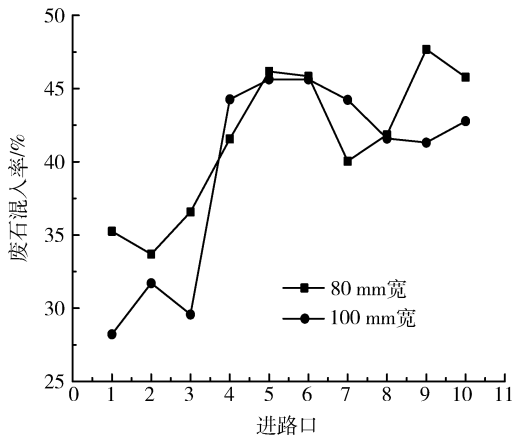


图 4 放矿口宽度对各进路岩石混入率的影响

Fig. 4 Effects of ore drawing hole widths on the mixing rate of rock in different approaches

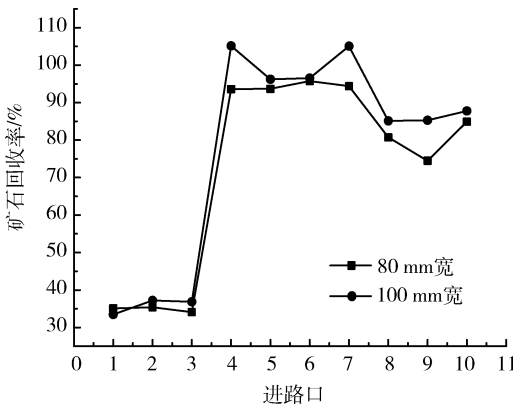


图 5 放矿口宽度对各进路回收率的影响

Fig. 5 Effects of ore drawing hole widths on the recovery of different approach

表 1 三个分段最终的岩石混入率和矿石回收率  
Table 1 Final rock mixing rate and ore recovery rate in three subsections

分段	岩石混入率/%		矿石回收率/%	
	80 mm × 80 mm	80 mm × 100 mm	80 mm × 80 mm	80 mm × 100 mm
第一分段	35.17	29.92	34.87	35.86
第二分段	44.38	45.15	94.47	99.29
第三分段	45.15	41.91	80.03	86.07

## 2.2 矩形放矿口高度对放矿效果的影响

出矿过程中,放出体中心轴(流轴)周围的矿石下移实际上是压力平衡拱的不断形成和破坏的交替过程,只有平衡拱破坏,矿石和岩石才会突然以整体冒落的形式向下移动,然后又形成新的平衡拱,每一次平衡拱的破坏都是剪切破坏<sup>[14]</sup>。颗粒在流动过程中的随机性和不确定性导致每个颗粒所受的外力大小不等,并且不同位置的矿岩颗粒的速度以及运动方式也存在差异,在下移过程中,为了适应漏斗断面逐渐变小的情况,矿岩颗粒必然重新排列。此外,矿岩颗粒在相互挤压和移动过程中,矿岩散体颗粒间的相互摩擦作用使得颗粒之间的抗剪强度逐渐增大,出现结拱现象。

矿石的损失贫化主要取决于放出体形态,矿岩颗粒的移动特征又直接影响放出体形态的发育。放矿时,矿岩颗粒的流动是一个复杂的、随机的过程,分段高度、崩矿步距、回采进路间距、炮孔的布置形式等参数都会影响矿岩流动范围。实验中,当放矿口宽度不变,对比放矿口高度分别为70 mm和80 mm两种情况下的放矿效果,发现高度为70 mm时,各放矿口放出矿石中岩石混入率减小,矿石回收率均增大(4号放矿口和7号放矿口除外),如图6和图7所示。由图6和图7可知,2号放矿口、5号放矿口、6号放矿口和9号放矿口岩石混入率依次降低了3.39%、7.26%、6.87%和2.39%,矿石回收率依次提高了0.53%、3.42%、2.62%和11.33%。三个分段的岩石混入率和矿石回收率见表2。这一结论说明,适当降低放矿口高度也能降低岩石混入率,提高矿石的回采率。

在多分段多进路放矿实验过程中,当同一分段的各放矿口同时放矿时,适当增加放矿口宽度或者降低放矿口高度均可降低岩石混入率,提高矿石的回收率,但是第一分段的矿石回收率比第二分段和第三分段低很多,第一分段的矿石回收率仅有35%左右,而岩石混入率同样达到了35%左右,其主要原因是,在第一分段,矿石和岩石直接接触,随着矿石的放出,岩石漏斗口很快到达放矿口,使得岩石过早混入,当岩石漏斗完全破裂时,混入率急剧增大,矿石被岩石漏斗隔离,部分矿石形成残留,使得放出的矿石量逐渐减少,岩石的混入率却在增加。在第二分段和第三分段,因放矿口按菱形布置,上部岩石距放矿口的距离较大,不仅能够放出本分段的矿石,在上一分段脊部残留矿石在下一分段放出,大大提高了矿石的回收率。

从实验中可以看出,当放矿口的宽度保持不变

时,通过降低放矿口高度,同样能够增加放出的矿石量,降低岩石混入率。因此,在实际生产中,若不考虑其他因素,适当降低回采进路的高度不仅减少了掘进工作量,还能提高采出纯矿石量。

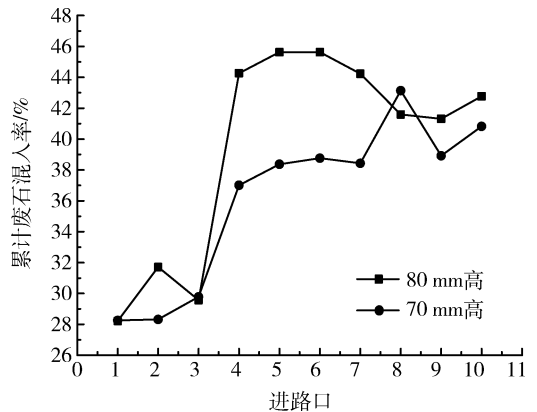


图6 放矿口高度对各进路岩石混入率的影响

Fig. 6 Influence of ore drawing hole height on the mixing rate of rock in different approaches

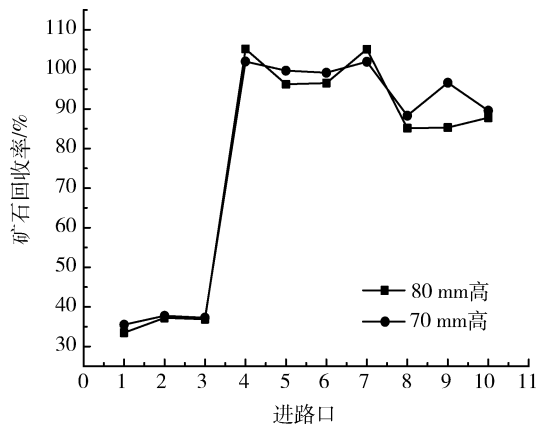


图7 放矿口高度对各进路回收率的影响

Fig. 7 Effect of ore drawing hole height on the recovery of each approach

表2 三个分段最终的岩石混入率和矿石回收率  
Table 2 Final rock mixing rate and ore recovery rate in three subsections

分段	岩石混入率/%		矿石回收率/%	
	80 mm× 100 mm	70 mm× 100 mm	80 mm× 100 mm	70 mm× 100 mm
第一分段	29.92	28.80	35.86	36.84
第二分段	45.15	38.28	99.29	100.24
第三分段	41.91	40.95	86.07	91.50

## 3 结论

1) 在多分段多进路放矿实验中,适当扩大放矿口宽度或者降低高度,同一分段各放矿口同时出矿时,各放矿口的岩石混入率明显降低而矿石回收率显著提高,并且整个分段的矿石回收率也明显提高。

2) 适当调整矿口大小,能够减少矿石的脊部残留,提到矿石的回收,特别是第二分段和第三分段的矿石回收率增加量较大,而岩石混入率较小,这意味着适当扩大放矿口宽度或者降低放矿口高度都有助于矿石的回收,减少资源浪费。

3) 适当增大矩形放矿口宽度,能够增加矿石移动带宽度,改善矿石的流动性,顶部矿石下落速度加快,延缓了正面岩石的入侵速度,使得放出体得到更好的发育,放矿指标得到了明显改善。

### 参考文献

- [ 1 ] 王云鹏,余健. 无底柱分段崩落法崩矿步距的优化[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(2):603-608.  
WANG Yunpeng, YU Jian. Optimization of breaking interval in non-pillar sublevel caving mining[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2014, 45(2): 603-608.
- [ 2 ] 孙东东,张治强,常帅,等. 大结构参数无底柱分段崩落法结构参数优化研究[J]. 中国矿业,2018,27(1):105-108.  
SUN Dongdong, ZHANG Zhiqiang, CHANG Shuai, et al. Optimization research on structural parameters in non-pillar sublevel caving method with large structural parameters[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(1): 105-108.
- [ 3 ] 常贯峰,路增祥,常帅,等. 毛公铁矿大结构参数无底柱分段崩落法多分段放矿实验[J]. 金属矿山,2017(11):48-51.  
CHANG Guanfeng, LU Zengxiang, CHANG Shuai, et al. Multi-sublevel ore drawing test of non-pillar sublevel caving method with large structural parameters in Maogong iron mine[J]. Metal Mine, 2017(11): 48-51.
- [ 4 ] 何荣兴,任凤玉,宋德林,等. 大结构参数无底柱分段崩落法的发展及技术问题探讨[J]. 金属矿山,2015(6):1-5.  
HE Rongxing, REN Fengyu, SONG Delin, et al. Discussion on development and technical problems of sublevel caving with large structural parameters[J]. Metal Mine, 2015(6): 1-5.
- [ 5 ] 安龙,徐帅,李元辉,等. 基于多方法联合的崩落法崩矿步距优化[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(4):754-759.  
AN Long, XU Shuai, LI Yuanhui, et al. Optimization of rate of advance during ore breaking of caving method based on multi-method joint application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 754-759.
- [ 6 ] 丁航行,牛伦,孙明志,等. 基于 PFC 的无底柱分段崩落法崩矿步距优化[J]. 中国矿业,2019,28(3):82-86.  
DING Hangxing, NIU Lun, SUN Mingzhi, et al. Optimization of blast rings space of non-pillar sublevel caving method based on PFC[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(3): 82-86.
- [ 7 ] 孙浩,金爱兵,高永涛. 崩落法采矿中放出体流动特性的影响因素[J]. 工程科学学报,2015,37(9):1111-1117.  
SUN Hao, JIN Aibing, GAO Yongtao. Flow characteristics of caved ore and rock in the multiple draw-point condition[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(9): 1111-1117.
- [ 8 ] 陶干强,杨仕教,任凤玉. 崩落矿岩散粒体流动性能试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(10):2950-2954.  
TAO Ganqiang, YANG Shijiao, REN Fengyu. Experimental research on granular flow characters of caved ore and rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 2950-2954.
- [ 9 ] 乔登攀,周宗红,马正位. 无底柱分段崩落法端部矩形放矿口的影响机理研究[J]. 中国矿业,2007,16(11):59-62.  
QIAO Dengpan, ZHOU Zonghong, MA Zhengwei. Study on influence mechanics of drawing outlet in sublevel caving[J]. China Mining Magazine, 2007, 16(11): 59-62.
- [ 10 ] 宋超,路增祥,马驰,等. 边孔角对无底柱分段崩落法放矿效果的影响[J]. 矿业研究与开发,2019,39(5):6-9.  
SONG Chao, LU Zengxiang, MA Chi, et al. Affect of side hole angle on drawing effect with non-pillar sublevel caving method[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(5): 6-9.
- [ 11 ] 安龙,邹金,徐帅,等. 急倾斜薄矿脉中深孔落矿崩矿步距实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015,36(4):560-564.  
AN Long, WU Jin, XU Shuai, et al. Caving space optimization experiment on middle-deep hole blasting for steeply inclined thin veins[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(4): 560-564.
- [ 12 ] 路增祥,常贯峰,宫国慧. 铲入深度对无底柱分段崩落法放矿效果的影响[J]. 中国矿业,2018,27(6):90-94.  
LU Zengxiang, CHANG Guanfeng, GONG Guohui. The effect of shoveling depth on the ore drawing of non-pillar sublevel caving method[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(6): 90-94.
- [ 13 ] 王述红,任凤玉,魏永军,等. 矿岩散体流动参数物理模拟实验[J]. 东北大学学报(自然科学版),2003,24(7):699-702.  
WANG Shuhong, REN Fengyu, WEN Yongjun, et al. Experimental physical simulation of mineral moving[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2003, 24(7): 699-702.
- [ 14 ] 陶干强,杨仕教,任凤玉. 随机介质放矿理论散体流动参数试验[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(S2):3464-3470.  
TAO Ganqiang, YANG Shijiao, REN Fengyu. Test on granules flow parameters of ore drawing with stochastic medium theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3464-3470.