

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.07.019

放矿椭球体排列理论的合理性探讨及实验研究

谭宝会¹, 张志贵², 何荣兴¹, 朱强²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 对基于椭球体排列理论的采场结构参数设计方法存在的缺陷和不足进行了探讨和分析, 主要包括该理论是否遵循了放出体和崩落体一致原则、将放出体相切最优原则等价于纯矿石放出体相切最优原则是否合理、认为放出体相交便会造成矿石贫化的说法是否科学, 以及高分段结构计算公式的合理性等几个方面. 设计并开展了三组不同结构参数的物理放矿实验, 实验结果表明, 由于放出体与崩落体形态不符, 导致大间距结构参数方案的矿石回收效果最差. 理论分析和物理实验均表明, 基于椭球体排列理论的采场结构参数设计方法存在一定缺陷, 有待进一步的改进和完善.

关 键 词: 椭球体排列理论; 无底柱分段崩落法; 结构参数设计; 大间距结构; 放矿实验
中图分类号: TD 853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)07-1014-06

Discussion on the Rationality and Experimental Research of the Ore-Drawing Ellipsoid Arrangement Theory

TAN Bao-hui¹, ZHANG Zhi-gui², HE Rong-xing¹, ZHU Qiang²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China.
Corresponding author: HE Rong-xing, E-mail: herongxing@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The deficiencies of structural parameter design method based on ellipsoid arrangement theory were discussed and analyzed, involving whether the theory follows the consistence principle between the drawn-out ore body and the blasting ore body or not, whether the equivalence from drawn-out ore body tangent optimum principle to the draw off body of pure ore tangent optimum principle is reasonable, whether the viewpoint that the drawn-out ore body intersection results in ore dilution is scientific or not, and the rationality of the calculation formula of high sublevel structure. Three groups of physical drawing experiments with different structural parameters were designed and carried out. The experimental results showed that the ore recovery rate of large spacing structure parameter scheme is the lowest due to the drawn-out ore body and the blasting ore body seriously inconsistent. Both theoretical analysis and physical experiments showed that the design method of structural parameters of stope based on ellipsoid arrangement theory is unreasonable and needs to be further improved.
Key words: ellipsoid arrangement theory; sublevel caving; structure parameter design; large spacing structure; ore-drawing experiment

无底柱分段崩落法因其高效安全、机械化程度高、采矿成本低等优点被广泛应用于直立厚大稳固矿体的地下开采. 随着采矿技术与采矿设备的进步, 加大采场结构参数成为该方法的主要发展方向之一. 国外主流的无底柱分段崩落法结构参数的设计与优化方法由美国著名学者 Kvapil 提出^[1], 该方法以模型实验的椭球体理论为基础, 遵循了崩落矿石堆体与放出体形态一致的原则. 此外, 美国学者 Bullock 等也提出过基于经验公式的采矿场结构参数设计及优化方法^[2]. 我国无底柱分段崩落法经历了由“小结构参数”向“大结构参数”演变的过程, 优化方法基本上也是遵

无底柱分段崩落法因其高效安全、机械化程度高、采矿成本低等优点被广泛应用于直立厚大稳固矿体的地下开采. 随着采矿技术与采矿设备的进步, 加大采场结构参数成为该方法的主要发展方向之一. 国外主流的无底柱分段崩落法结构参数的设计与优化方法由美国著名学者 Kvapil

循了崩落矿石堆体与放出体形态一致的原则. 但在此过程中,曾出现了基于“椭球体排列理论”而构建的无底柱分段崩落法采场结构参数设计和优化方法,这种方法的提出致使我国无底柱分段崩落法矿山的大结构参数方案在相当长一段时间内呈现出所谓的“大间距结构参数”和“高分段结构参数”两种形态和发展趋势. 然而,其应用和推广却不如其人意,甚至已经被相关矿山所摒弃,究其原因,主要是因为根据这种理论所得来的结构参数未能在实际生产中取得理想的矿石回收效果. 黄泽研究表明,一定时空范围内大间距的矿石回收效果是比较差的,加大进路间距会导致矿石回收率降低^[3];柳小波研究表明,相同放矿步距时,随进路间距的变大(15~25 m),岩石混入率趋于增加,但波动不大,而矿石回收率逐渐降低^[4];陈发兴等研究表明,当分段高度一定时,随进路间距增大,岩石混入率持续增加,而回贫差先增加后降低^[5]. 无论是理论研究还是生产实践,均表明基于椭球体排列理论所提出的结构参数优化方法的合理性的确值得进一步商榷.

本文从理论分析的角度探讨了基于椭球体排列理论而演化出的结构参数设计方法所存在的问题和不足,并通过物理实验研究分析了基于椭球体排列理论而得来的大间距结构参数方案的矿石回收效果,并解释了大间距结构矿石回收效果不佳的根本原因.

1 基于椭球体排列理论的采场结构参数设计方法

在传统研究中,认为无底柱分段崩落法单个回采单元的高度应该为宽度的 2.5~3.0 倍,其根据是因为工业放出体的长轴尺寸为横轴尺寸的 2.5~3.0 倍,结合无底柱分段崩落法回采进路菱形布局的要求,便可形成图 1 所示的采场结构. 分段高度(H)与进路间距(S)的比值大约为 1.3~1.5,因此在采场结构设计中分段高度通常要大于进路间距.

椭球体排列理论认为传统放矿理论注重于单个放出体形态的研究,而忽视了实际采矿中多个放出体之间的排列关系,如果将多个放出体在空间上进行排列,便会发现这些纯矿石放出体发生了明显的重叠,见图 1b 所示,这就违背了纯矿石放出体应该互相相切的基本原则. 因而,为了“遵循”崩落体体形与放出体体形相一致的原则,椭球体排列理论研究了多个放出体的空间排列关

系,同时,为利于掌握和实际操作,将“崩落体体形与放出体体形吻合程度最高的结构参数为最优”的原则等价于“纯矿石放出体互相相切的结构参数为最优”的原则^[6]. 该理论认为结构参数优化的实质就是放出体空间排列的优化问题,密实度最大者为优. 根据这一理论可演化出两种最优结构模式,一种为高分段结构,另一种为大间距结构,如图 2 所示.

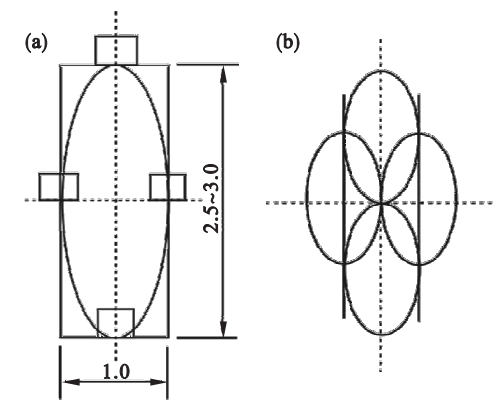


图 1 传统的结构参数确定模式
Fig. 1 Traditional structural parameter determination patterns
(a)—单个放出体形态; (b)—多个放出体排列模式.

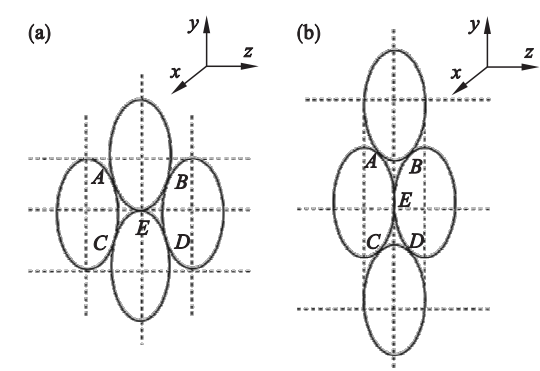


图 2 大间距及高分段结构椭球体排列模式
Fig. 2 Ellipsoid arrangement of large spacing and high sublevel structure schemes
(a)—大间距结构排列模式; (b)—高分段结构排列模式.

为便于开展数学计算,需要将放出椭球体转换为直径为 1 的单位球体,同时把原 xyz 坐标系转换为 uvw 坐标系,如图 3 所示,最终建立相关的计算方程.

在图 3a 所示的 4 个球体中,上下两球之间互相相切,左右两球之间未接触,但左右两球与上下两球之间均互相相切. 由于 v 方向上的变换系数为 a , CE 为分段高度,则分段高度相当于 a , w 方向的变换系数为 b , AB 为进路间距,则进路间距为 $2\sqrt{3}b$,由此可推导出大间距结构参数的计算公式为

$$\frac{H}{S} = \frac{\sqrt{3}}{6} \cdot \frac{a}{b} \quad (1)$$

在图 3b 所示的 4 个球体的密密度与图 3a 一致,4 个球体之间也达到了 5 点相切,但由于球体排列模式的不同使得分段高度要大于进路间距,从而构成高分段结构模式,其结构参数计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{H}{S} &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{a}{b}, \\ b &= a \sqrt{1 - \varepsilon^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

根据式(1),式(2)便可对无底柱分段崩落法采场结构参数进行设计和优化.

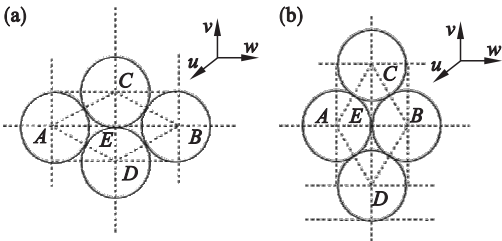


图 3 大间距及高分段结构球体排列模式
Fig. 3 Sphere arrangement of large spacing and height structure schemes
(a)一大间距结构排列模式;(b)一高分段结构排列模式.

2 基于椭球体排列理论的结构参数设计方法合理性探讨

椭球体排列理论主要包含以下几个观点:
(1) 基于椭球体排列理论的结构参数设计方法遵循了“崩落矿石堆体与放出体形态保持一致”的基本原则;
(2) 该理论将“崩落矿石的爆堆体形态与放出体形态吻合程度高为结构参数最优”等价于“纯矿石放出体互相相切结构参数为最优”;
(3) 结构参数优化的实质就是放出体空间排列的优化问题,密实度最大者为优;
(4) 如果各回采单元之间的放出体不能密实地 5 点相切排列,就会造成矿石损失,如果各回采单元之间的放出体相互交叉,就会因重复放矿而导致矿石贫化;
(5) 根据放出体排列密实度最大者为优,可以得出两种最优的椭球体排列方式,一种为高分段结构,一种为大间距结构.

2.1 关于遵循“崩落体与放出体一致原则”的探讨

虽然“椭球体排列理论”的倡导者一再声称遵循了“崩落矿石堆体与放出体形态保持一致”的基本原则,但却缺乏必要的理论及实践证据来证明这一点^[7]. 图 4 是根据椭球体排列理论得出

的大间距结构及高分段结构的放出体与实际矿石堆体(崩落矿石 + 矿石残留)的关系图. 可见,在大间距结构和高分段结构方案下,有相当大比例的矿石散体处于放出椭球体之外,说明该理论实际上并未遵循“崩落矿石堆体与放出体形态保持一致”的原则. 如果放出体连崩落矿石以及残留矿石都不能完全包括进去,就很难说这是一个合理的结构参数方案,更不能说是最优结构参数方案.

2.2 关于“等价原则”合理性的探讨

在椭球体排列理论中,将“崩落矿石的爆堆体形态与放出体形态吻合程度高为结构参数最优”等价于“纯矿石放出体互相相切的结构参数为最优”,但并没有明确其所指的纯矿石放出体是何种放矿方式下的放出体,如果采用的是传统的截止品位放矿方式,正面废石会很快达到放矿口,纯矿石放出体比较小,此时纯矿石放出体很难实现 5 点相切或密实排列;如果采用的是无贫化放矿方式,根据无贫化放矿理论的研究,无底柱分段崩落法无贫化放矿的纯矿体放出形态并不是一个大小固定的椭球体,而是随崩落矿石及残留体的形态及大小经常变化,因而放出体之间的排列更可能是一种大小相间、相互交叉的复杂形态^[8].

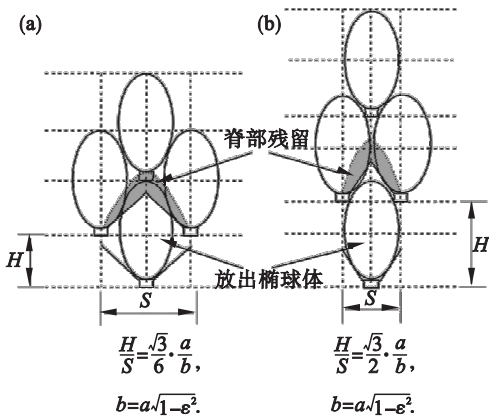


图 4 大间距及高分段结构方案的放出体与崩落体关系
Fig. 4 Relationship between the drawn-out ore body and the blasting ore body of large spacing and high sublevel structure schemes
(a)一大间距结构;(b)一高分段结构.

2.3 关于结构参数计算公式合理性的探讨

椭球体排列理论提出了两种确定最优结构参数的计算公式,分别为大间距结构参数计算式(1)和高分段结构参数计算式(2). 表 1 按照高分段结构参数的计算公式(式(2))分别计算了两种

分段高度 ($H = 15\text{ m}$ 和 $H = 18\text{ m}$) 在不同偏心率 (ε) 下的进路间距. 从计算结果的数值来看, 两种分段高度所对应的进路间距仅有 $5 \sim 8\text{ m}$, 过小的进路间距极易引发采切工程量偏大和采场结构稳定性变差等问题, 严重影响采矿生产及其技术经济效益, 在实际生产中这样的结构参数几乎不具备应用价值, 因此也就很难称其为最优结构参数方案.

表 1 由高分段结构计算公式得出的进路间距值 Table 1 Spacing is calculated from the formula of high sublevel structure			
偏心率 ε	H/S	进路间距/m	
		$H = 15$	$H = 18$
0.92	2.21	7	8
0.93	2.36	6	8
0.94	2.54	6	7
0.95	2.77	5	6
0.96	3.09	5	6

2.4 关于“放出体相交则贫化”说法的合理性探讨

椭球体排列理论认为放出体达到 5 点相切时才是最优状态, 如果放出体未相切, 则放出体之间的间隙就会成为矿石损失, 如果放出体互相交叉, 则交叉部分会因重复放矿而造成矿石贫化. 其实众多研究均已表明这是对无底柱分段崩落法放矿过程的一种错误认知, 无底柱分段崩落法的放矿过程是一个动态的过程, 崩落矿石的形态、位置、大小等会随着放矿的进行而不断变化, 因此实际放矿过程中各单元的放出体形态及大小在时间及空间上都是相互关联和相互影响的, 且这种影响基本上是单向的 (从分段上看是上影响下, 从步距上看是前影响后). 放出椭球体相互交叉, 是因为矿石的充分回收需要放出体之间相互交叉 (即崩落矿石的转段或转步距回收). 放出体的交叉是在不同时间上的空间位置交叉, 交叉部分正是从其他位置转移至此且需要再次回收的残留矿石. 放出体的相互交叉并不意味着矿石的重复放出以及贫化的产生, 而是崩落矿岩在采场内移动规律的准确体现^[9-10], 也是矿石充分回收的必要技术措施.

3 物理实验研究

3.1 实验方案的设计

为进一步分析根据椭球体排列理论确定的结构参数在矿石回收方面的效果, 开展了一系列物

理放矿模拟实验, 大量实验数据表明, 物理放矿模拟实验与现场放矿情况具有较高的相似度, 可以最大程度地反映真实的放矿规律及现象^[10]. 物理实验共设计了三组不同结构参数的放矿模型, 放矿模型结构参数如表 2 所示, 模型比例为 1:100. 其中模型三为根据椭球体排列理论而确定的大间距结构参数方案. 模型一和模型二采用了传统的结构参数, 基本上保持了分段高度 \geq 进路间距这一原则. 实验所用到的装填材料为磁铁矿颗粒和白云岩颗粒, 二者颗粒粒度范围均在 $1 \sim 10\text{ mm}$ 之间, 磁铁矿容重为 1.89 g/cm^3 , 地质品位为 34.6%, 白云岩容重为 1.49 g/cm^3 , 二者粒度配比按照真实采矿环境中经爆破形成的矿岩粒度比例进行搭配, 以满足实验的相似性要求. 实验中为便于筛分, 以带有磁性的磁铁矿颗粒作为实验废石, 以白云岩颗粒作为实验矿石. 图 5 以模型三 ($H \times S \times L = 15\text{ cm} \times 18\text{ cm} \times 2.8\text{ cm}$) 为例给出了装料前后的模型实物图.

表 2 三组物理模型结构参数 Table 2 Structural parameters of three physical models			
物理实验模型	分段高度 H/cm	进路间距 S/cm	放矿步距 L/cm
模型一	20	18	3.5
模型二	20	20	3.8
模型三 (大间距结构)	15	18	2.8

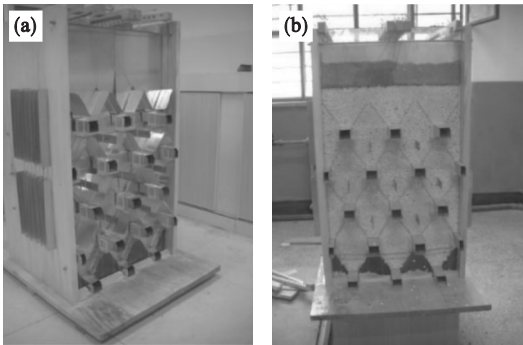


图 5 实验模型
Fig. 5 3D physical model
(a)—装料前; (b)—装料后.

3.2 实验过程

物理模型完成装料后开始进行放矿作业, 放矿过程中对各分段按照由上至下的顺序进行放矿, 对各回采进路按照由前至后的顺序进行退采. 实验过程中对于放出的矿石及废石进行精确的筛分称重, 并分别记录矿石、废石量, 严格按照表 3 给出的出矿控制指标进行放矿. 依次对所设计的三组模型展开放矿实验研究.

表 3 放矿实验控制指标

Table 3 Control index for ore-drawing tests

指标	取值
截止品位/%	32
截止放矿贫化率/%	7.77
截止放矿岩石体积混入率/%	9.44
截止放矿岩石质量混入率/%	12.41

表 4 三组模型矿石回收指标

Table 4 Ore recovery indicators of three models

物理实验模型	$H \times S \times L$	矿石回收率/%	岩石混入率/%
模型一	20 cm × 18 cm × 3.5 cm	87.95	8.53
模型二	20 cm × 20 cm × 3.8 cm	89.91	5.47
模型三	15 cm × 18 cm × 2.8 cm	81.67	10.77

综合对比表 4 中三组模型的矿石回收指标可知,模型二(20 cm × 20 cm × 3.8 cm)的矿石回收效果最佳,不仅矿石回收率最高(89.91%),且岩石混入率最低(5.47%)。而为大间距结构参数的模型三(15 cm × 18 cm × 2.8 cm),其矿石回收效果最差,同时占据了矿石回收率最低(81.67%)和岩石混入率最高(10.77%)这两个最劣指标。从所观察到的放矿实验过程可知,造成大间距结构参数回收指标最差的主要原因是因为在大间距结构下放出体与崩落矿石+残留矿石的形态严重不符,有相当一部分脊部残留矿石未能完全被包含在下分段的放出体之中,从而导致脊部残留矿石在向下转移过程中变成了矿岩混杂层,造成了较大的矿石损失及贫化。分析图 6a 可知,在采用相同的放矿方式情况下,三组模型各分段的矿石回收率的趋势基本相同,但在模型三中因脊部残留矿石在转移过程中发生严重贫化和损失,导致

3.3 实验结果

实验结束后,对各组模型的放矿实验数据进行分析处理,得到各模型的矿石回收指标,见表 4。各模型放矿实验的分段矿石回收率和分段岩石混入率统计情况如图 6 所示。

模型三的各分段矿石回收率低于其他模型;观察图 6b 可知,在三组模型各分段岩石混入指标中,模型三的各分段岩石混入率始终高于其他模型的分段岩石混入率,最终导致模型三的总岩石混入率高于其他模型的总岩石混入率。此外,在实验中还观察到模型三在步距放矿时往往最先出现贫化,纯矿石回收率很低,一般仅为 30%~50%,贫化回收的时间很长,但矿石回收率却不高。而其他两组模型则恰恰相反,步距放矿时贫化出现的时间较晚,纯矿石回收率较高,一般能达到 70%~80%,而且一旦贫化开始,则废石量迅速增大直至达到截止放矿条件,贫化回收的时间相对较短,但矿石回收率较高。可以看出,在优化无底柱分段崩落法结构参数时,当采场的结构参数能够满足崩落体形态符合放出体形态时便可获得最为满意的回收效果。

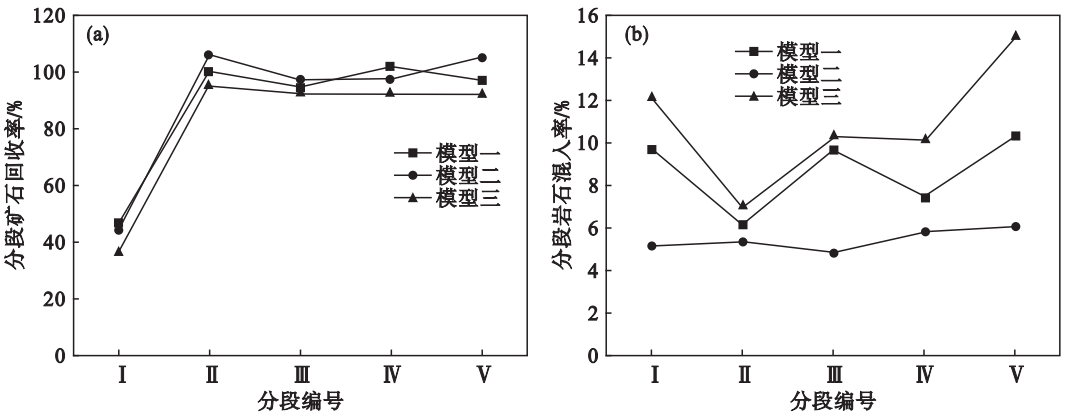


图 6 各结构参数方案分段矿石回收指标

Fig. 6 Recovery indexes of ore in different structural parameter scheme

(a)—分段矿石回收率曲线; (b)—分段岩石混入率曲线。

物理放矿实验表明,相对于传统的结构参数而言,大间距结构参数在矿石回收指标上并不具

备优势,相反却同时具备了回收率低和贫化率高等缺点.

4 结 论

1) 基于椭球体排列理论的无底柱分段崩落法采场结构参数设计方法尚不够严谨和完善,在本质上并没有遵循放出体与崩落体一致原则,将“崩落矿石放出体相切最优”等价为“纯矿石放出体相切最优”并不妥当,错误地认为放出体相交便会产生贫化,此外,根据这种理论所得出的高分段结构参数计算公式也不够科学合理.

2) 物理放矿实验进一步证明,大间距结构参数的矿石回收指标并不理想,主要原因是崩落矿石(包含脊部残留)与放出体形态严重不符,导致脊部残留矿石在下移过程中发生贫化损失,同时大间距结构参数方案中有相当大一部分矿石是以贫化矿石的形式放出,从而造成较高的岩石混入率.

3) 基于椭球体排列理论进行采场结构参数的设计和优化,将不可避免地出现矿石回收效果不理想的现象,这一点已经在众多矿山的实际生产中得到证实,不彻底摒弃存在严重缺陷的椭球体排列理论,无底柱分段崩落法加大结构参数的设计和优化就很难走出误区.

参考文献:

[1] Kvapil R. Underground mining methods handbook [M]. Colorado: Society of Mining, Metallurgy and Explorations, 1982: 880 – 897.

[2] Bullock R, Hustrlid W. Underground mining methods; engineering fundamentals and international case studies [M]. Colorado: Society of Mining, Metallurgy and Explorations, 2001: 721 – 728.

[3] 黄泽. 金山店铁矿无底柱分段崩落法大间距结构试验研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2011.

(Huang Ze. Study on large spacing structure with sublevel caving in Jinshandian iron mine [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2011.)

[4] 柳小波. 散体流动时空演化仿真模型的研究与应用 [D]. 沈阳: 东北大学, 2009.

(Liu Xiao-bo. Study on simulation model of time-space evolution of granular flow and its applications [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.)

[5] 陈发兴, 张志雄. 大参数无底柱分段崩落法在大红山铁矿的运用 [J]. 有色金属设计, 2009, 36 (3): 18 – 21.

(Chen Fa-xing, Zhang Zhi-xiong. Application of big parameter of sublevel caving in Dahongshan iron mine [J]. Nonferrous Metals Design, 2009, 36 (3): 18 – 21.)

[6] 董振民, 何士海, 李永明, 等. 无底柱分段崩落法采矿理论的重大突破 [J]. 金属矿山, 2009 (sup1): 145 – 150.

(Dong Zhen-min, He Shi-hai, Li Yong-ming, et al. Mining theoretical great breakthrough of sublevel caving method [J]. Metal Mine, 2009 (sup1): 145 – 150.)

[7] 陈诗墨. 大结构参数无底柱分段崩落法放矿方式与结构参数研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016.

(Chen Shi-mo. Study on the ore drawing method and structure parameters in the condition of enlarged-structure parameters of sublevel caving [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2016.)

[8] Zhang Z G, Liu X G. Non-dilution draw method and its application in sublevel caving mines in China [C] // Proceedings of the 5th International Conference & Exhibition on Mass Mining. Luleå, 2008: 275 – 284.

[9] Trueman R, Castro R, Halim A. Study of multiple draw-zone interaction in block caving mines by means of a large 3D physical model [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45 (7): 1044 – 1051.

[10] 张志贵, 刘兴国, 于国立. 无底柱分段崩落法无贫化放矿: 无贫化放矿理论及其在矿山的实践 [M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2007: 52 – 67.

(Zhang Zhi-gui, Liu Xing-guo, Yu Guo-li. Non-dilution draw for sublevel caving: non-dilution draw method and its application in mines [M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2007: 52 – 67.)