工程科学学报 第 38 卷 第 2 期: 159-166 2016 年 2 月

Chinese Journal of Engineering , Vol. 38 , No. 2: 159–166 , February 2016 DOI: 10.13374/j.issn2095–9389.2016.02.001 http://journals.ustb.edu.cn

# 不同端壁倾角条件下放出体形态研究及最优崩矿步 距的确定

# 孙 浩,金爱兵<sup>∞</sup>,高永涛,孟新秋

北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083 ☑ 通信作者,E-mail: jinaibing@ustb.edu.cn

摘 要 为分析端部放矿中放出体形态 获得大结构参数下最优的崩矿步距 基于颗粒元理论和 PFC<sup>3D</sup>程序 构建具有矿石散 体细观力学性质的放矿模型.通过已有研究结论与模拟结果的对比分析,验证了基于 PFC 程序的放矿模型的可靠性.在此 基础上,开展 18 m×20 m 结构参数下不同端壁倾角崩矿步距研究.研究结果表明,不同倾角端壁条件下放出体形态不完整, 并不是一个规则的椭球体.当放矿量相同时,放出体高度随端壁倾角的减小而增大,放出体整体形态也随之越来越"瘦长". 在无限边界和不同倾角端壁条件下,放出体高度的变化趋势均可概括为两个阶段:在放矿初始阶段,放出体高度呈指数形式 快速增加,随放矿量的增加,其增长率逐渐减小;随后,放出体高度将随放矿量的增加而呈线性增长的趋势.建议在 18 m×20 m 结构参数下采用 85°~90°的端壁倾角 *A*.8 m 的崩矿步距. 关键词 崩落法;放出体;端壁;倾角;步距 分类号 TD85

# Research of the isolated extraction zone form and determination of optimal independent advance under different end wall angles

SUN Hao , JIN Ai-bing<sup>™</sup> , GAO Yong-tao , MENG Xin-qiu

School of Civil and Environmental Engineering , University of Science and Technology Beijing , Beijing 100083 , China Corresponding author , E-mail: jinaibing@ustb.edu.cn

**ABSTRACT** In order to analyze the form of the isolated extraction zone (IEZ) in side drawing and get optimal independent advance with large structural parameters , drawing models with the mesomechanical properties of ore granular media were constructed based on the particle flow theory and  $PFC^{3D}$  code. The reliability of the drawing models was validated by comparative analysis between existing research conclusions and simulated results. On this basis , a study on independent advance of side drawing at different end wall angles in the structural parameters of 18 m × 20 m was performed. The results show that the IEZ form is incomplete and is not a regular ellipsoid at different end wall angles. When the drawn mass is equal , the IEZ height increases with decreasing end wall angle and the IEZ form becomes more and more slender. The trend of the IEZ height at both the infinite boundary condition and the boundary condition of different end wall angles can be divided into two stages: in the first stage , the IEZ height rapidly increases in the exponential form at the initiation of side drawing and its growth rate decreases with the increasing of drawn mass , while in the second stage the IEZ height linearly increases with the increasing of drawn mass. It is suggested that the end wall angle of  $85^{\circ} - 90^{\circ}$  and the independent advance of 4.8 m should be used in the structural parameters of 18 m × 20 m.

KEY WORDS caving mining; isolated extraction zone; end walls; tilt angle; independent advance

# 无底柱分段崩落法自 20 世纪 60 年代中期在我国 开

开始使用以来 在金属矿山尤其是铁矿山获得迅速推

收稿日期: 2015-09-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374032);科技北京百名领军人才培养工程资助项目(Z151100000315014)

广和广泛应用. 无底柱分段崩落法具有采场结构及回 采工艺简单、安全高效及成本低等优点,但采场结构与 放矿方式不当时,矿石损失贫化较大<sup>11</sup>.无底柱分段 崩落法的放矿方式属于端部放矿,即崩落矿石在崩落 围岩覆盖下,借助重力由回采巷道一端放出,与底部 放矿方式相比 端部放矿因受未崩落端壁影响 其放出 体位置和形态发生变化,更易引起矿石的损失贫化<sup>[2]</sup>. 在众多结构参数中,分段高度、进路间距以及崩矿步距 是影响矿石损失贫化的3种相互联系和制约的主要因 素. 在矿山的实际生产中,分段高度和进路间距是考 虑矿床赋存条件、工程地质条件、采矿设备等诸多因素 后 在采准工程施工前确定 因此在之后的生产过程中 难以改变 而崩矿步距则相对灵活可变[3]. 另外 综合 考虑上部废石提前混入、装药条件等因素 矿山一般采 用前倾和垂直两种不同的炮孔布置形式 因而产生不 同的炮孔扇面倾角即端壁倾角,其对矿石损失贫化率 会产生一定的影响.因此,在分段高度与进路间距确 定的情况下 开展不同端壁倾角条件下端部放矿崩矿 步距研究 对于分析放出体与矿石损失贫化率的关系, 优化采场结构参数以及提高矿山经济效益等具有重要 意义.

最优崩矿步距的确定对放出体形态及矿石损失贫 化具有重要影响,为此有必要在放出体形态研究的基 础上,对不同端壁倾角条件下最优崩矿步距进行研究. 目前,国内外学者基于放出体形态研究,已对端部放矿 条件下崩矿步距的优化问题进行了大量物理及数值试 验研究.

国外的 Laubscher<sup>[4]</sup> 和 Castro<sup>[5]</sup> 先后通过以砂子、 砾石为介质的大型物理放矿试验对无限边界条件 下<sup>[6-7]</sup>崩落矿岩的流动特性进行探究,剖析放出体与 松动体形态变化规律及其主要影响因素,并为此后的 放矿理论与技术研究提供大量宝贵的试验数据. 国内 的徐帅等<sup>[8]</sup>、李彬<sup>[9]</sup>和刘元祺<sup>[10]</sup>以国内典型地下矿山 为工程背景,通过一系列二维或三维室内试验对端部 放矿规律及崩矿步距的优化进行研究,为不同矿山采 场结构参数的设计提供了可靠依据.

基于离散单元法(discrete element method, DEM) 的 PFC(particle flow code)软件进行放矿试验及放矿方 案的选择十分方便灵活,并可反复试验,能够从细观角 度对崩落矿岩这一散体材料的流动特性进行本质性的 分析和描述<sup>[11-12]</sup>,直观地表明放出体形态,矿石的移 动、回收与残留,岩石的混入等.因此,与有限单元法 (finite element method, FEM)、元胞自动机理论(cellular automaton, CA)等方法和理论的放矿模型及软 件相比,PFC更适合于研究包括崩矿步距优化在内 的放矿理论与技术等问题<sup>[13-14]</sup>.国外的 Lorig 和 Cundall<sup>[15]</sup>基于 PFC<sup>30</sup>进行大量放矿数值试验并开发 了可以快速模拟放矿过程的 REBOP (rapid emulator based on PFC3D)程序.在国内,刘志娜等<sup>[16]</sup>、吴爱祥 等<sup>[17]</sup>和张巍元<sup>[18]</sup>基于 PFC 对大冶铁矿、金山店铁 矿、首云铁矿等矿山的放矿方式、采场结构参数等进 行优化研究.

目前 国内外学者针对端部放矿的研究主要是在 垂直端壁条件下开展 ,未考虑不同端壁倾角对矿石损 失贫化的影响.此外 ,其研究的采场结构参数偏小(如 12 m×15 m 和 15 m×15 m),而大结构参数对于提高矿 山生产能力,降低采矿成本具有明显的优势,是未来崩 落法采矿发展方向.因此,本文基于 PFC<sup>3D</sup>程序构建放 矿模型,在分析端部放矿中放出体形态的基础上,开展 高分段、大间距(18 m×20 m)结构参数下不同端壁倾 角崩矿步距研究,为放矿理论的丰富和矿山采场结构 参数的优化提供依据.

# 1 端部放矿数值试验研究

#### 1.1 单口放矿试验设计

单口端部放矿研究将通过若干组数值试验比较无限边界条件和不同倾角端部放矿条件下放出体形态变化规律、放出体高度与放矿量的关系等方面的异同.分别在无限边界条件下进行1次试验,在70°、80°和90°端壁倾角条件下各进行1次试验,因此共进行4次数值试验.每次试验分别依次记录达到100、200、300、500、800、1200、1500、2000和3000t共9个不同放矿量时的放出体高度.图1为放出体(isolated extraction zone, IEZ)及松动体(isolated movement zone, IMZ)的主要参数.如图1所示  $h_{\rm IEZ}$ 和 $w_{\rm IEZ}$ 分别表示放出体的高度和宽度,而 $h_{\rm IMZ}$ 和 $w_{\rm IMZ}$ 分别表示松动体的高度和宽度.



Fig. 1 Main parameters of the IEZ and IMZ

单口放矿模型构建与放矿过程设置
 综合考虑矿山放矿现状及计算机处理能力,本次

数值试验无限边界及垂直端壁条件下放矿模型尺寸设为 25 m×25 m×50 m(长×宽×高),前倾端壁条件下 模型宽度及高度与前者相同,长度随倾角不同而不同. 模型初始孔隙率设为 0.40,放矿 口尺寸为4.0 m× 4.0 m,颗粒半径为 0.3 m,颗粒黏结采用无黏结模型, 颗粒生成采用半径扩大法.图2为模型墙体结构.其 中:图2(a)为无限边界条件下的试验1模型;图2(b) 为90°即垂直端壁条件下的试验2模型;图2(c)为前 倾端壁条件下的试验模型,该模型下试验包括端壁倾 角为 70°的试验3及端壁倾角为 80°的试验4.图2 中 第1、2 和3号墙体分别代表试验1~4 中的放矿口.整 个放矿过程可划分为以下5 个阶段:

(1) 在模型内随机生成一定数量散体颗粒使模型 初始孔隙率达 0.40. (2) 赋予颗粒重力加速度  $g = -9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,并赋 予墙体及颗粒如表 1 所示的细观力学参数.

(3)待整个模型内颗粒达初始平衡状态后,记录 每个颗粒坐标值,为随后拟合放出体形态做准备.

(4)删除图 2 中代表放矿口的正方形墙体, 散体 颗粒将从放矿口不断放出, 放矿过程随即开始; 当放出 量达设定值时,关闭代表放矿口的相应墙体, 放矿过程 随即结束.

(5) 借助 PFC<sup>3D</sup>中的 FISH<sup>[19]</sup>语言,通过编程记录 被放出颗粒的 ID 号并结合初始平衡状态时放出颗粒 坐标值 即可确定每个放出颗粒在初始平衡时的位置, 该部分颗粒所形成的区域即为放出体.通过上述程序 可以真实直观地将放出体的形态、位置可视化并计算 放出体高度等信息.



图 2 模型墙体结构. (a) 无限边界条件; (b) 垂直端壁条件; (c) 前倾端壁条件

Fig. 2 Wall structure of the models: (a) infinite boundary condition; (b) vertical end wall condition; (c) forward-leaning end wall condition

表 1 墙体及颗粒细观力学参数 Table 1 Mesomechanical parameters of walls and particles

墙体					
法向刚度/(N•m <sup>-1</sup> )	切向刚度/( N•m <sup>-1</sup> )	与颗粒间摩擦系数	法向刚度/(№•m <sup>-1</sup> )	切向刚度/( N•m <sup>-1</sup> )	颗粒密度/(kg•m <sup>-3</sup> )
$1 \times 10^{9}$	$1 \times 10^{9}$	0.50	$1 \times 10^{8}$	$1 \times 10^{8}$	4200

# 2 端部放矿数值试验计算结果分析

为验证基于 PFC 程序所构建放矿模型的可靠性, 研究不同端壁倾角条件下放出体形态,对放出体拟合 形态、放出体高度、放矿量的关系等进行分析.

# 2.1 放出体拟合形态

对不同边界条件下放出体形态进行拟合,图3为4组试验中放矿量达到3000t时的放出体形态.如图 所示,沿 x轴负方向放出体未受边界条件影响,放出体 形态均较为完整,但沿 y轴正方向的试验2~试验4中 放出体受垂直及倾斜端壁的影响,放出体形态不完整 且沿端壁产生不同程度的倾斜.具体而言,无限边界 条件下放出体形态完整,近似椭球体;不同倾角端壁条件下放出体形态不完整,并不是一个规则的椭球体. 除此之外,在端壁影响下,当放矿量相同时,放出体高度随端壁倾角的减小而增大,放出体整体形态也随之 越来越"瘦长".

# 2.2 PFC 放矿模拟可靠性检验

Castro<sup>[5]</sup>在无限边界条件下开展了崩落散体矿岩 流动特性的大型三维物理放矿试验研究,其模型主体 结构尺寸为2.5m×3.5m×3.3m(长×宽×高)相似 比为1:30及1:100.

该试验通过在不同位置布置的标志颗粒圈定放出 体形态等信息,研究得出放出体高度 h<sub>IFZ</sub>与累计放矿



图 3 4 组试验放出体形态.(a) 无限边界条件(试验 1);(b) 90°端壁条件(试验 2);(c) 80°端壁条件(试验 3);(d) 70°端壁条件(试验 4)

Fig. 3 IEZ form of 4 experiments: (a) infinite boundary condition (Exp. 1); (b)  $90^{\circ}$  end wall condition (Exp. 2); (c)  $80^{\circ}$  end wall condition (Exp. 3); (d)  $70^{\circ}$  end wall condition (Exp. 4)

### 量 m 之间满足以下方程:

 $h_{\text{IEZ}}(m) = h_0(1 - e^{-m/m_1}) + cm.$  (1) 式中,方程系数 $h_0 \ m_h \ c$ 均为常数. 其中 $h_0 \ m_h \ c$ 别表示随着放矿量的增加,在放出体高度呈指数形式 增加的阶段结束时的放出体高度和质量,而c表示放 出体高度呈线性增加阶段的线性增长率. 为进行 PFC 放矿模型可靠性检验,分别统计4 次试验中达到所设定9个放矿量时的放出体高度, 基于 Levenberg-Marquardt 算法用方程(1)对模拟试 验数据进行检验,其系数拟合结果见表2(表中各 拟合系数右侧括号内的数据为相应拟合系数的误 差值).

表 2 方程(1) 系数拟合结果 Table 2 Fitting results of coefficients in Eq. (1)

		-		
试验号	$h_0$ / m	$m_h$ /t	c/( m•t <sup>−1</sup> )	$R^2$
1	7.367 (0.331)	190. 647 ( 20. 413)	3. 310 × 10 $^{-3}$ ( 1. 774 × 10 $^{-4}$ )	0. 997
2	10.994 (0.740)	188.164 (30.420)	3. 794 × 10 <sup>-3</sup> ( 3. 979 × 10 <sup>-4</sup> )	0. 989
3	11.356 (0.490)	156. 524 (18. 040)	4. 508 × 10 $^{-3}$ ( 2. 725 × 10 $^{-4}$ )	0.995
4	12.484 (0.943)	224.098 (36.989)	4. 821 × 10 $^{-3}$ ( 4. 898 × 10 $^{-4}$ )	0. 991

表 2 中各试验的拟合优度 *R*<sup>2</sup> 值均接近于 1 ,表明 方程(1) 与模拟试验数据高度拟合. 其中 ,方程(1) 是 在无限边界条件下物理试验所得结论 ,因此试验 1 数 据的高度拟合说明本次试验构建模型能够反映放矿实 际情况 ,即验证了基于 PFC 程序放矿模型的可靠性; 而不同倾角端壁条件下的试验 2 ~4 数据的高度拟合 则扩大了方程(1) 的适用范围 ,即说明不同端壁倾角 条件下随放矿量增加,放出体高度变化也遵循方程 (1)所示规律.

图 4 为放出体高度理论曲线与试验 1 ~ 4 数据对 比. 如图 4 所示,放出体高度的变化趋势可分为两个 阶段:在放矿初始阶段,放出体高度呈指数形式快速增 加 随着放矿量的增加,其增长率逐渐减小;随后,放出 体高度将随放矿量的增加而线性增长. 该结论可有效 分析无底柱分段崩落法采矿中不同倾角端壁条件下不 同放矿阶段时的放出体形态演化规律.





Fig. 4 Comparison between the theoretical curves and experimental data of IEZ height

# 3 崩矿步距优化研究

目前,国内外采用无底柱分段崩落法采矿的许多 地下金属矿山的采场结构参数不断增大,而梅山铁矿 的分段高度与进路间距也不断向18m×20m过渡.因此,有必要分析和确定上述结构参数下最佳的端壁倾 角及崩矿步距.

#### 3.1 多分段放矿试验设计

在本次试验中需要注意崩矿步距与放矿步距的区 别. 其中 ,崩矿步距为每次爆破崩矿的矿石层厚度 ,而 放矿步距为爆破后每次放矿时的矿石层厚度. 通常情 况下 ,由于爆破推距及崩落矿石的二次松散等因素的 影响 ,放矿步距大于崩矿步距<sup>[20-21]</sup>. 放矿步距和崩矿 步距满足以下关系:

$$D = K \bullet C. \tag{2}$$

式中 K 为步距系数 ,D 和 C 分别为放矿步距和崩矿 步距.

综合考虑国内外相似矿山放矿实际情况及梅山铁 矿矿岩物理力学性质等,本次数值试验中步距系数*K* 取1.3,分析放矿步距与端壁倾角对矿石贫损失指标 中回收率 $\beta$ 、贫化率 $\rho$ 及回贫差*F*(回收率与贫化率 之差)<sup>[3]</sup>的影响.其中,放矿步距取5.5、6.0、6.5、 7.0和7.5m五个水平,端壁倾角取90°、85°和80°三 个水平,因此共进行15(5×3)组模拟试验.图5为 多分段放矿模型的墙体结构.其中,分段高度即每分 段矿石层高度18m,顶部废石层高度15m,正面废石 层厚度7m;进路间距即相邻放矿口间距20m,放矿 口尺寸3.8m×5.5m,模拟矿山现场3.8m高、5.5m 宽的回采进路<sup>[8]</sup>.图5中第1~5号墙体即代表相应 放矿口.



Fig. 5 Wall structure of the multiple-subsection drawing models: (a) vertical end wall condition; (b) forward-leaning end wall condition

# 3.2 多分段放矿模型构建与放矿过程设置

为了更真实地反映顶部存在的细小废石,综合考 虑计算机处理能力和矿山放矿现状,本次数值试验中 矿石颗粒半径为0.40m,废石颗粒半径0.20~0.40m. 另外,矿石颗粒密度4200kg•m<sup>-3</sup>,品位40%,废石颗粒 密度2600kg•m<sup>-3</sup>,品位为0.模型内初始孔隙率0.40, 其余墙体及颗粒细观力学参数设计与表 1 相同. 放矿 方式为截止品位放矿 截止品位 18%.

整个模型构建及放矿过程可划分为以下 4 个 阶段:

(1) 构建顶部、正面废石层以及第1分段矿石层 所需墙体后 在相应区域内生成一定数量废石及矿石 颗粒使模型初始孔隙率达 0.40,并赋予墙体及颗粒如 表 1 所示的细观力学参数.

(2)待整个模型内颗粒达初始平衡状态后,同时 打开第1~2号放矿口进行第1分段放矿.当任一放 矿口当次放出矿石品位达截止放矿条件时关闭该放矿 口;待两放矿口均关闭时,第1分段放矿过程结束.

(3)构建第2分段所需墙体并生成相应正面废石 及矿石.随后,同时打开第3~5号放矿口进行第2分 段放矿过程,直至3个放矿口均达到截止放矿条件时, 关闭该放矿口,第2分段放矿过程结束.

(4)由于第1分段放矿高度只有18m,不具代表 性 故以第2分段作为研究对象,拟合其放出体形态, 计算不同端壁倾角及放矿步距条件下各试验的矿石贫 损指标回收率 β、贫化率 ρ 及回贫差 F,并分析判断最 佳的采场结构参数.

#### 3.3 矿石损失率分析

以垂直端壁条件下放矿步距为 6.5 m 的试验为 例 图 6 为其不同放矿过程. 其中,黄色与蓝色颗粒分 别为顶部和正面废石,红色颗粒为矿石. 以上述试验 中第 4 放矿口为例,图 7 为其最终放出体形态. 如图 7 所示,通过编译程序实现放出体形态可视化,不仅能够 真实直观地显示最终放出体中矿石、顶部及正面废石 的相应位置分布,而且可以方便快速地计算各类矿石 贫损指标.





图 8 为矿石贫损指标与放矿步距的关系.如 图 8(a)所示,当放矿步距一定时,矿石回收率随端壁 倾角的增大而增大;当端壁倾角一定时,放矿步距过小 和过大都会使矿石产生不同程序的损失.在倾角为 85°~90°,放矿步距6.0~6.5m时,可以获得较大回收率. 如图8(b)所示,当放矿步距一定时,矿石贫化率 也随端壁倾角的增大而增大;当端壁倾角一定时,贫化 率随放矿步距的增大而减小. 如图8(c)所示,端壁倾



Final IEZ form: (a) front view of IEZ; (b) side view of IEZ

Fig. 7

角为 80°试验的回贫差最小,而倾角 85°、放矿步距 6.0m和倾角 90°、放矿步距 6.5m 试验的回贫差较大. 结合如表 3 所示相似矿山实际崩矿步距<sup>[21-22]</sup>,并综合 考虑模拟所得各矿石贫损指标、现场装药难易程度以 及放矿步距与崩矿步距的关系等因素,建议梅山铁矿 在 18m×20m 结构参数下采用 85°~90°的端壁倾角、 6.0~6.5m 的放矿步距,即最优崩矿步距为 4.8m 左右.

# 4 结论

(1)不同倾角端壁条件下放出体形态不完整,并 不是一个规则的椭球体.当放矿量相同时,放出体高 度随端壁倾角的减小而增大,放出体整体形态也随之 越来越"瘦长".



图 8 矿石贫损指标与放矿步距的关系.(a) 矿石回收率与放矿步距的关系;(b) 矿石贫化率与放矿步距的关系;(c) 矿石回贫差与放矿步 距的关系

Fig. 8 Relationship between ore dilution and loss indexes and drawing pace: (a) relationship between ore recovery ratio and drawing pace; (b) relationship between ore dilution ratio and drawing pace; (c) relationship between the difference of recovery ratio and dilution ratio and drawing pace

表3 相似矿山实际崩矿步距

Table 3	Practical independent advance in similar mines				
矿山名称	分段高度/m	进路间距/m	崩矿步距/m		
梅山铁矿	15	20	3.5		
北洺河铁矿	15	18	3.7		
	20	20	4.6		
入红山铁坝	15	20	2.8		

(2) 无限边界条件下的模拟结果符合 Castro 所做 物理放矿试验的模拟结果.此外,模拟结果表明,不同 倾角端壁条件下放出体高度与放矿量的关系依然满足 其结论.放出体高度的变化趋势可概括为两个阶段: 在放矿初始阶段,放出体高度呈指数形式快速增加,随 放矿量的增加,其增长率逐渐减小;随后,放出体高度 将随放矿量的增加而呈线性增长的趋势.

(3) 在一定范围内,当放矿步距一定时,矿石回收

率及贫化率均随端壁倾角的增大而增大;当端壁倾角 一定时,放矿步距过小和过大都会使矿石产生不同程 序的损失.

(4)建议在18m×20m结构参数下采用85°~90° 的端壁倾角、4.8m的崩矿步距.

#### 参考文献

 Wang Q , Ren F Y. *Mining Science*. Beijing: Metallurgical Industry Press , 2011

(王青,任凤玉.采矿学.北京:冶金工业出版社,2011)

[2] Wang H C. Ore Drawing. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982

(王汉昌.放矿学.北京:冶金工业出版社,1982)

- [3] Zhou C B. Calculation models and examples of independent advance and indexes of dilution and loss of sublevel caving method without sill pillars. *Non-ferrous Min Metall*, 1994, 10(4): 5
   (周传波. 无底柱分段崩落法崩矿步距及贫损指标的计算模型与实例. 有色冶金, 1994, 10(4): 5)
- [4] Laubscher D H. Cave mining: the state of the art. J S Afr Inst Min Metall, 1994, 94(10): 279
- [5] Castro R. Study of the Mechanisms of Gravity Flow for Block Caving [Dissertation]. Brisbane: University of Queensland, 2006
- [6] Zhang Z G, Liu X G, Yu G L. Sublevel Caving Method without Sill Pillars in the Base of Undiluted Ore Drawing: Undiluted Ore Drawing Theory and Its Practice in Mine. Shenyang: Northeastern University Press, 2007 (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. 沈阳:东北大学出版社,

员化放价 理论 及具任价 山钓头践. 沈阳: 朱北大字 出版 ( 2007)

[7] Ren F Y. Stochastic Medium Theory for Ore Drawing and Its Appli-

- cation. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994
   (任凤玉.随机介质放矿理论及其应用.北京:冶金工业出版 社,1994)
- [8] Xu S, An L, Li Y H, et al. Optimization of caving space for different angles of end-wall during pillarless sublevel caving. J Northeast Univ Nat Sci, 2012, 33(1): 120
  (徐帅,安龙,李元辉,等. 无底柱分段崩落法多端壁倾角下崩矿步距优化. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(1): 120)
- [9] Li B. Investigation of Law Ore Drawing and Step Optimize in Chengchao Iron Mine of Wugang [Dissertation]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2012 (李彬. 武钢程潮铁矿采场放矿规律及放矿步距优化研究[学 位论文]. 武汉:武汉科技大学 2012)
- [10] Liu Y Q. Experimental Research on Mullock Movement in the Side Drawing [Dissertation]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2013
  (刘元祺.端部放矿废石移动规律实验研究[学位论文]. 鞍 山: 辽宁科技大学, 2013)

- [11] Zhu H C. PFC and application case of caving study. *Chin J Rock Mech Eng*, 2006, 25(9): 1927
  (朱焕春. PFC 及其在矿山崩落开采研究中的应用. 岩石力 学与工程学报, 2006, 25(9): 1927)
- [12] Wang J C, Wei L K, Zhang J W, et al. 3D numerical simulation on the top-coal movement law under caving mining technique. J China Coal Soc, 2013, 38(11): 1905
  (王家臣,魏立科,张锦旺,等. 综放开采顶煤放出规律三维 数值模拟. 煤炭学报, 2013, 38(11): 1905)
- [13] Chitombo G P. Cave mining: 16 years after Laubscher's 1994 paper 'Cave mining-state of the art'. *Min Technol*, 2010, 119 (3): 132
- [14] Castro R , Gonzales F , Arancibia E. Development of a gravity flow numerical model for the evaluation of drawpoint spacing for block/panel caving. J S Afr Inst Min Metall , 2009 , 109 (7): 393
- [15] Lorig L J , Cundall P A. A Rapid Gravity Flow Simulator. Brisbane: Jkmrc and Itasca Consulting Group Inc. , 2000
- [16] Liu Z N, Mei L F, Song W D. A study of no bottom pillar stope structure parameters optimization based on PFC numerical simulation. *Min Res Dev*, 2008, 28(1):3
  (刘志娜,梅林芳,宋卫东.基于 PFC 数值模拟的无底柱采 场结构参数优化研究. 矿业研究与开发, 2008, 28(1):3)
- [17] Wu A X, Wu L C, Liu X H, et al. Study on structural parameters of sublevel caving. J Cent South Univ Sci Technol, 2012, 43 (5): 1845
  (吴爱祥,武力聪,刘晓辉,等. 无底柱分段崩落法结构参数

研究. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(5):1845)

[18] Zhang W Y. Research on 3D Modeling Low Dilution for Ore Drawing [Dissertation]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013

(张巍元.低贫化放矿的三维数值模拟研究[学位论文].哈 尔滨:哈尔滨工业大学,2013)

- [19] Itasca C G. PFC3D (Particle Flow Code in 3 Dimensions) Command and Reference. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2008
- [20] Zhang C S , Ju Y Z. The drawing pace and independent advance of ore breaking of sublevel method. *Met Mine*, 1979(4): 11
  (张成舜,鞠玉忠.关于无底柱分段崩落法的放矿步距和崩矿步距. 金属矿山, 1979(4): 11)
- [21] An L, Xu S, Li Y H, et al. Optimization of rate of advance during ore breaking of caving method based on multi-method joint application. *Chin J Rock Mech Eng*, 2013, 32(4): 754 (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. 岩石力学与工程学报,2013,32(4): 754)
- [22] Luo Z N. Study on the tests of rational independent advance of ore breaking and blasting parameters in Dahongshan iron mine. *Yunnan Metall*, 2008, 37(4):3
  (罗正泥.大红山铁矿采场合理崩矿步距和爆破参数的试验研究.云南冶金, 2008, 37(4):3)