

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.05.007

自然崩落法高阶段多漏斗放矿矿岩流动模拟及结构参数优化

朱忠华^{1,2}, 胡杰², 陶干强¹, 王李管²

(1.南华大学核资源工程学院,湖南衡阳 421001;2.中南大学数字矿山研究中心,长沙 410083)

摘要:为掌握自然崩落法多漏斗放矿属性矿岩流动特性,给出属性随机介质放矿理论基础,从放矿水平布置出发,提炼出高阶段多漏斗放矿仿真模型。采用4块模型、6块模型和9块模型3种概率模型分别考虑不同的放矿端部条件;建立流动颗粒体数据结构和空位传递模型,设计高阶段多漏斗放矿流动数据结构和模拟流程,采用C++面向对象语言和hoops可视化工具包开发模拟程序,在三维可视化环境下得到了不同放矿点间距下多漏斗放矿的矿岩流动特性。根据研究结果,确定放矿底部结构优化参数,为放矿控制和放矿优化提供了参考和依据,并可作为后续放矿计划编制的基础。

关键词:多漏斗出矿;高阶段;随机介质;颗粒流;自然崩落法

中图分类号:TD672;TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2017)05-049-11

Flow simulation of ore and rock and structure parameter optimization of ore drawing of high stage block caving with multiple funnels

ZHU Zhonghua^{1,2}, HU Jie², TAO Ganqiang¹, WANG Liguan²

(1. Nuclear Resources Engineering College, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, P.R.China; 2. Research Center of Digital Mine, Central South University, Changsha 410083, P.R.China)

Abstract: To master flow characteristics of ore rock of block caving with multiple funnels, the basis of stochastic property medium theory was presented. Based on the arrangement of ore drawing level, a simulation model of high-stage and multi-hopper discharge was extracted. Three probability models, i.e. four-block model, six-model and nine-block model, were used for different ore drawing boundary conditions. The particle flow data structure and null-block transfer model were established. The flow simulation process of ore rock flow of multi-funnel ore drawing was designed. The simulation program was developed with C++ programming language and hoops visualization toolbox. And flow characteristics of ore-rock under different funnel spacing were obtained in 3D visualization environment. It provides reference and basis for the design of bottom structure parameter and ore drawing control, and provides the basis for the preparation of the following ore drawing scheduling.

Keywords: ore drawing with multiple funnels; high stage; stochastic medium; particle flow; block caving

收稿日期:2017-01-15

基金项目:国家自然科学基金项目资助(51574151),南华大学科研启动基金资助(2016XQD28),湖南省教育厅2017年科研项目资助(17C1372)。

Supported by National Science Foundation of China (51574151), Univesity of South China Research Foundation (2016XQD28) and Research Project of Hunan Provincial Department of Education (17C1372).

作者简介:朱忠华(1981-),男,博士,主要从事数字矿山及数值模拟技术研究工作;

陶干强(联系人),男,南华大学教授,博士,主要从事放矿理论及试验研究,(E-mail)nhutgq@126.com。

自然崩落法是一种高能力、低成本和高技术含量的采矿方法,恰当应用可以大幅降低采矿成本,产生很好的经济效益^[1],特别适合中低品位的厚大矿床开采。通常自然崩落法阶段高度较大,同时参与出矿的漏斗数较多,为多漏斗放矿。多漏斗放矿过程中矿石在覆岩下出矿,容易造成矿石损失贫化。为降低贫损,众多学者进行了大量研究,Castro 等^[2]在大型三维物理模型上进行了单漏斗放矿试验,得出影响放出体几何形态的主要因素是放矿量和放矿高度;而颗粒尺寸和漏斗尺寸对放出体几何形态的影响较小;Trueman 等^[3]在相同的模型上通过试验研究了相邻放矿体的相互作用;Melo 等^[4]研究了颗粒流动的运动学模型,考虑了放出体形态的膨胀效应;此外,Melo 等^[5]比较了大比例物理模型与运动学模型两者的放出体;Yashar 等^[6]将混合整数线性规划用于自然崩落法生产计划优化,确保采矿工作的净现值最大化。这些研究为自然崩落法的应用奠定了坚实的基础,使自然崩落法这种采矿方法在美国、加拿大、俄罗斯、南非及澳大利亚等矿业大国得到广泛应用。但以往的研究未能考虑流动矿岩的岩性和品位信息,具有很大的不足。国内也进行了大量研究,形成了椭球体、类椭球体放矿理论及随机介质放矿理论^[7-10]。但这些研究以崩落矿岩移动概率密度场的描述为主,对多漏斗放矿矿岩流动过程研究欠佳,同时也未能考虑矿岩品位信息。

近年来,三维建模和数字矿山技术的快速发展使得考虑矿岩品位信息的高阶段多漏斗放矿研究变得可能和方便^[11-14]。为此,文中在数字矿山平台上建立三维模型,并结合矿山实际建立自然崩落法多漏斗出矿的物理模型,提出属性随机介质放矿理论,并以此为基础,使用 C++ 面向对象语言和 hoops 可视化工具包进行自然崩落法高阶段多漏斗放矿矿岩流动特性研究,建立放矿模拟的数据结构和流动模型,在三维可视化条件下模拟属性矿岩流动,为放矿结构参数设计和放矿控制提供参考和依据。前期笔者对自然崩落法矿岩流动及放矿的价值模型进行了研究^[16-17],文中研究是前期研究的继续。

1 技术原理与方法

自然崩落法高阶段多漏斗放矿属性矿岩流动模拟及结构参数设计从放矿水平布置出发,以属性随机介质放矿理论为基础,提炼出仿真模型,使用面向对象思想及语言设计和实现属性矿岩流动模拟,从而确定放矿参数,指导放矿设计。

研究总技术路线如图 1 所示。

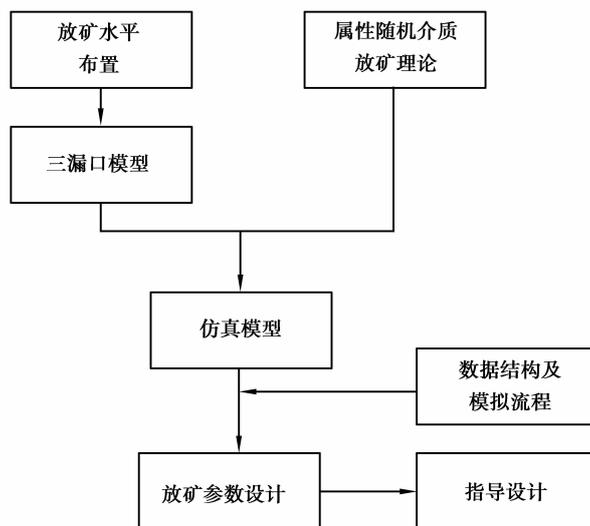


图 1 自然崩落法高阶段多漏斗放矿模拟及结构参数优化技术路线

Fig.1 Sketch of 3D design of oredraw level

1.1 属性随机介质放矿理论基础

属性随机介质放矿理论将崩落散体视为连续流动的属性随机介质,运用概率论方法研究属性散体的移动过程,可以系统地给出各种放矿条件下散体移动场的表述方程,这些方程可作为放矿模拟的数学模型。其

中属性散体移动概率密度方程为

$$P(x, y, z) = \frac{1}{\pi\beta z^\alpha} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\beta z^\alpha}\right) \tag{1}$$

式(1)描述了散体颗粒移动概率的空间分布,其中 α, β 是与属性散体流动性质及放出条件相关的常数。

属性散体移动速度方程满足

$$v_z = -\frac{q}{\pi\beta z^\alpha} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta z^\alpha}\right), \tag{2}$$

$$v_r = -\frac{\alpha q r}{2\pi\beta z^{\alpha+1}} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta z^\alpha}\right), \tag{3}$$

放出体方程满足

$$r^2 = (\alpha + 1)\beta z^\alpha \ln \frac{H}{z}, \tag{4}$$

式中, H 为放出体长轴。

1.2 自然崩落法放矿水平布置及物理模型

自然崩落法放矿水平上放矿点常用的布置方式有鲑鱼骨布置或者对称布置。图 2 是某自然崩落法矿山放矿点鲑鱼骨布置及局部三维布置示意图。

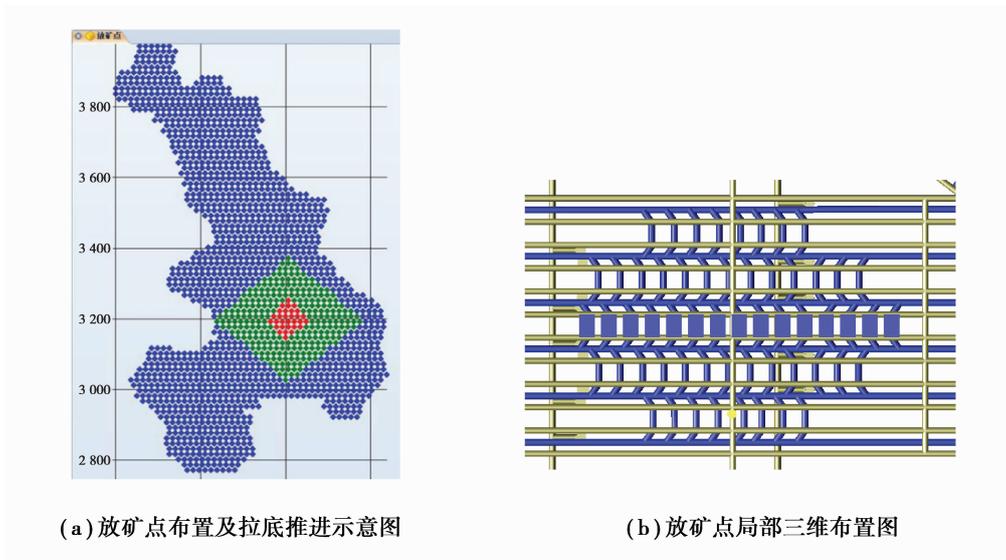


图 2 放矿点布置图

Fig.2 Sketch of drawpoints arrangement

由于其对称性,从图 2 可以提炼出多漏口出矿物理模型,称为三漏斗模型,如图 3 所示。

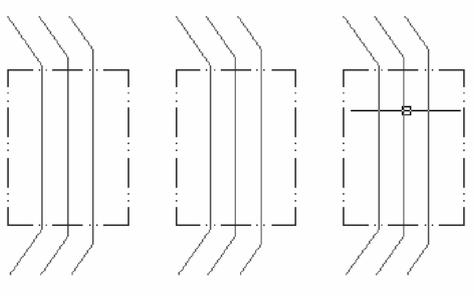


图 3 三漏斗放矿模型

Fig.3 Oredraw physical model of three funnel

1.3 基于属性随机介质放矿理论的高阶段多漏斗放矿模拟

1.3.1 高阶多漏斗放矿仿真模型

根据三漏口放矿模型,可以建立属性随机介质流动模拟的仿真模型,如图 4 所示。由自然崩落法放矿物理模型的对称性可知,图 4 所示的仿真模型具有较好的代表性,可以模拟自然崩落法多漏斗放矿。

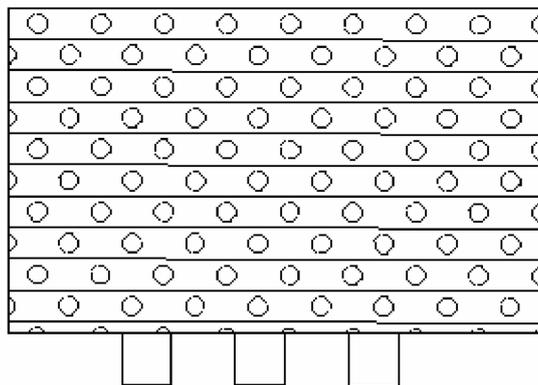


图 4 自然崩落法多漏斗放矿仿真模型

Fig.4 Oredrawing simulation model of multi funnel of block caving

图 4 所示模型,其上部是离散化的目标矿堆,离散单元是带有属性信息的块体,下部是出矿点;该模型用属性随机介质理论考虑,其基础是单漏斗出矿模型,为此首先建立单漏斗出矿模拟的数据结构和模拟流程。

1.3.2 单漏斗出矿模型及数据结构设计

将属性随机介质理论用于单漏斗放矿研究,考虑矿岩属性,流动对象用块体中心点代替,将块体流动简化为颗粒体流动,减少存储空间,又不产生主要信息的失真;块体作用是使用属性插值得到块体的属性值并将属性值存储在其中心点对应的颗粒结构体上。

1) 流动颗粒结构设计

进行属性块体的流动模拟,需要记录块体的属性,为此设计流动颗粒结构体,其数据结构设计如下:

```
struct struc_particle // 流动颗粒体结构体
{
    dmDPoint origin_location; // 初始位置
    int ijkID[3]; // 初始定位数组
    int curijkID[3]; // 当前定位数组
    double grade; // 品位等属性
    bool drawn; // 状态,是否放出
    dmDPoint cur_location; // 当前位置
    int oreFlag; // 0 为岩石,1 为矿石
    int index; // 索引号
    bool used; // 状态,是否已使用
    ..... // 其他可扩展的属性
};
```

2) 单漏斗出矿流动模型

离散颗粒体具有流动颗粒体属性结构,存放于颗粒结构体数组 $m_vecParticleStruc$ 之中;颗粒体流动模拟功能实现主要倚赖以下变量和函数:表示放出颗粒体数量的整形变量 $nDrawOut$,由放出指数 k 确定,放出指数 k 为放出颗粒体数量与总颗粒体数量的比值;表示空位定位数组的数组 $curNullIJK$, $preNullIJK$;表示临时位置的 $dmDPoint$ 类型变量 $TmpLocation$, $TmpLocation2$, $preLocation$; $pointInFun()$ 函数,用以判断流动过程中在漏口范围内的颗粒体,将满足条件的颗粒体应对的定位数组存放于 $pointInFun$ 数组中,对元素为 n 的 $pointInFun$ 数组,第 i 个颗粒体的定位数组为 $pointInFun[i].IJK$, $0 < i < n$; $FlowMode()$ 函数,用以确

定流动模型;而函数 FromIJKtoVecScript()功能则是由定位数组得到下标值。

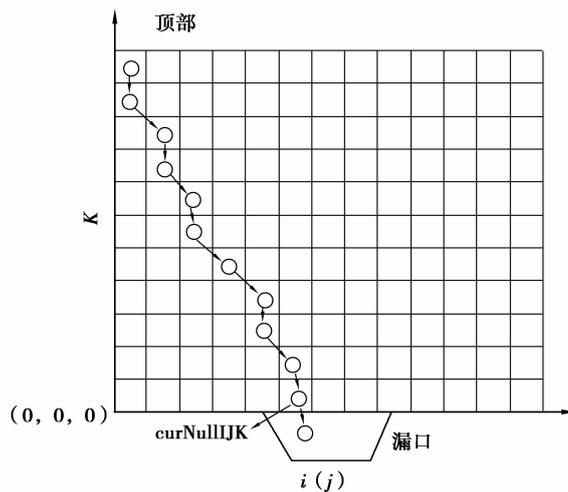


图 5 单漏斗出矿流动模型

Fig.5 Flow model of oredraw under single funnel

在图 5 中,由 Monte Carlo 法确定出口定位数组,以此确定本次模拟的流动概型,并开始单漏斗下属性颗粒体的流动模拟,模拟流程如图 6 所示。通过模拟得到放出体、残留体、接触面,并对其形态和属性进行分析。

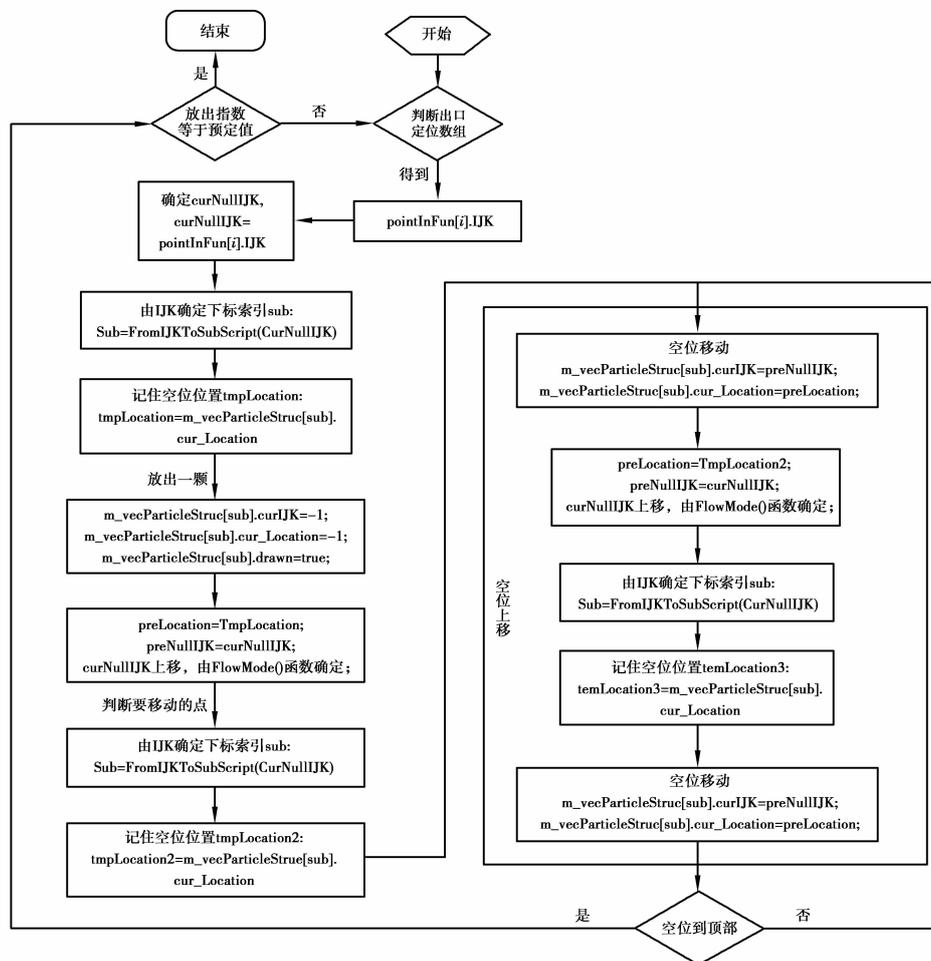


图 6 单漏斗下属性颗粒体流动模拟流程图

Fig.6 Flow chart of attribute particle flow simulation under single funnel

3) 空位传递模型

将随机介质理论用于崩落矿岩流动的计算机模拟,关键是确定离散化目标区域的随机流动概型。在开采沉陷学中,流动概型发展成概率积分法^[16];而在放矿学中,不同的端部条件对应的概率模型不同,常见的有 6 块模型、7 块模型和 9 块模型,如常用的 D. Jolley 仿真模型就是 9 块模型^[10]。

流动概率模型由目标区域离散方法和离散区域的流动概型确定。离散后的区域块体流动概率模型体现为空位传递模型。文中选用 9 块模型、6 块模型和 4 块模型分别考虑不同边界条件下的空位传递模型,如图 7 所示。4 块模型对应目标区域“角落”边界条件;6 块模型适用端部受限边界条件;而 9 块模型适用无边界限制的情况;每次移动对应一随机过程,其概率由 Monte Carlo 法确定。综合考虑这 3 种模型,可以完整模拟离散目标区域的流动。

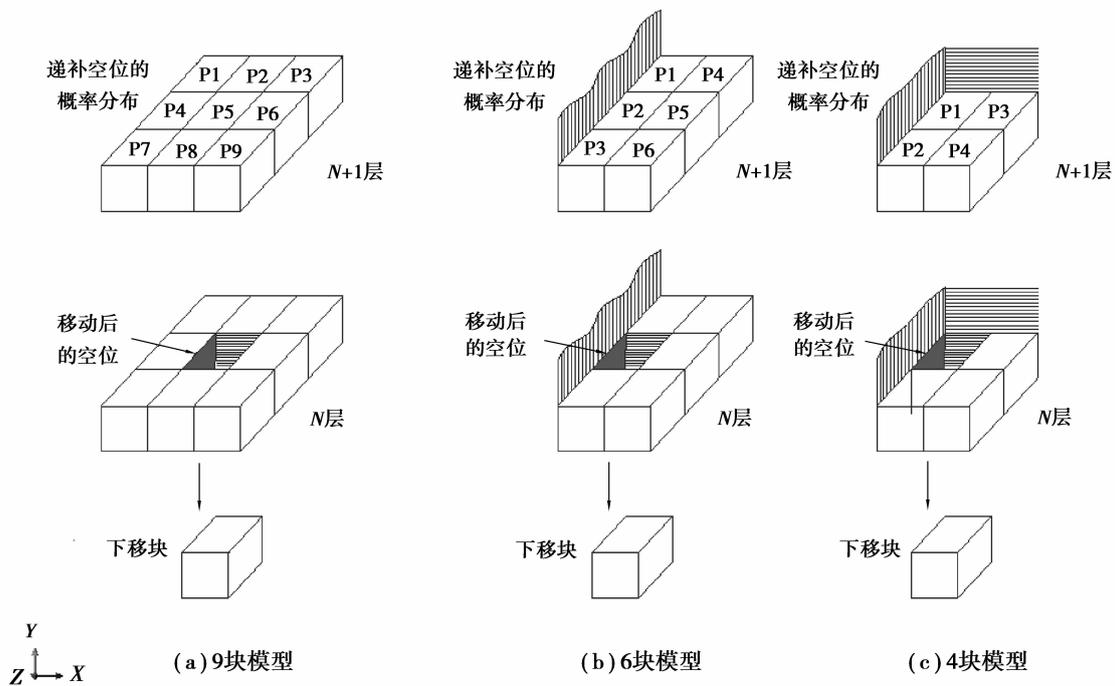


图 7 空位传递模型

Fig.7 Transfer model of null block

1.3.3 多漏斗出矿及其模拟流程

多漏斗出矿条件下矿岩流动模拟与单漏斗出矿模拟类似,但复杂性有所增加。首先,图 4 所示的多漏斗放矿仿真模型中出矿点增加,导致流动模拟时需要考虑每次放矿具体的出矿点;其次,多漏斗的出矿顺序和状态有同时出矿、先后出矿或间隔出矿等,出矿点出矿顺序和状态的不同也将影响矿岩的流动和矿岩接触面形状,此外漏斗的间距也对矿岩流动、放出体形态有着直接的影响。数据结构与单漏斗出矿模型类似,不同之处在于多漏斗出矿模型中要判断出矿漏斗,为此需要增加一个定位数组,数组元素与单个漏斗对应。

三点模型总的模拟思路与单漏斗出矿条件下的模拟思路一致,即以随机介质理论为依据,首先将矿岩体离散化,建立多漏斗与离散矿岩体的位置关系后,模拟离散矿岩体的放出过程,直到满足放矿终止条件,模拟过程结束。具体模拟流程见图 8 所示。

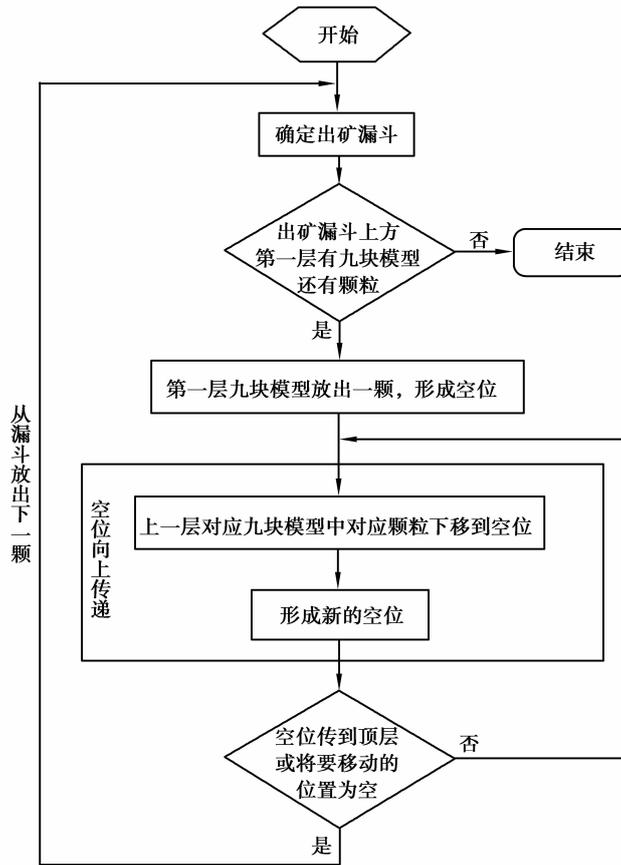


图 8 多漏斗出矿计算机模拟流程图

Fig.8 Flow chart of oredraw simulation under multi funnel

1.4 结构参数优化

自然崩落法放矿过程中,相邻漏斗之间因脊部残留而导致部分矿石放不出来,从而产生矿石损失。矿石损失率可以通过调整放矿底部结构参数而调整。一般而言,放矿结构参数需要设计的尽可能大,以便减少采准工作量和增大矿山产量,但是过大的结构参数势必增大矿石损失率,因此需要在放矿结构参数和矿石损失率之间寻求平衡。在放矿模拟中,矿石损失主要为脊部残留矿石,而矿石损失率定义为脊部残留矿石量与放矿柱体矿量(即担负矿量)的比值。脊部残留和放矿柱体示意图见图 9 所示。

矿石损失率 q 可定义为

$$q = Q_{\text{残留}} / Q_{\text{柱}}, \tag{5}$$

式中, $Q_{\text{残留}}$ 和 $Q_{\text{柱}}$ 分别表示脊部残留矿量和放矿矿柱矿量。

放矿底部结构参数优化,主要就是在当前的崩落块度分布条件下,选择和确定放矿漏斗尺寸,进而优化放矿漏斗间距,使得得到较好的放矿效果,即既能产生持续的放矿,又要避免出现“烟囱”状放出体,同时相邻漏斗间矿岩流动较快地相互影响,并且矿石损失率在合理范围。在本文模拟中,就是根据属性随机介质理论,建立放矿仿真模型,以不同的放矿漏斗尺寸和放矿漏斗间距为输入,模拟得到相应的结果(放矿体形态尺寸、矿石损失率、相邻漏斗矿岩流动相互相应的快慢),进而得到较优的放矿底部结构参数。

2 工程实例

普朗铜矿位于云南省西北部迪庆藏族自治州香格里拉县北东部,由云南迪庆有色金属有限责任公司投资建设,矿区范围南北长约 6 km,东西宽约 5 km,面积 36.72 km²,是中国 2001 年启动的大调查项目发现的

一个特大型铜矿。经工程地质条件调查和研究,综合该矿开采技术和经济条件,设计采用自然崩落法进行大规模低成本开采。矿山设计生产规模为 1 250 万 t/a,一期首采中段为 3 720 m 以上矿体,计划 2017 年达产,其投产后将是国内生产能力最大的自然崩落法矿山。放矿点采用鲑鱼骨布置形式,每日出矿点预计有 150 个左右,为高阶阶段多漏斗放矿。为合理布置放矿底部结构及科学地进行放矿控制,使用文中提出的方法进行放矿模拟。

为设计合理的放矿结构参数,使用三点模型进行不同放矿点间距下的放矿流动模拟,放矿区域如图 10 所示,尺寸为 $80\text{ m} \times 80\text{ m} \times 100\text{ m}$,放矿口尺寸为 $3.5\text{ m} \times 4.0\text{ m}$,放矿点间距分别设为 10、12、15、18、20、25 m,模拟矿岩的流动,计算矿石的损失率,模拟结果见图 11~图 16 及表 1 所示。

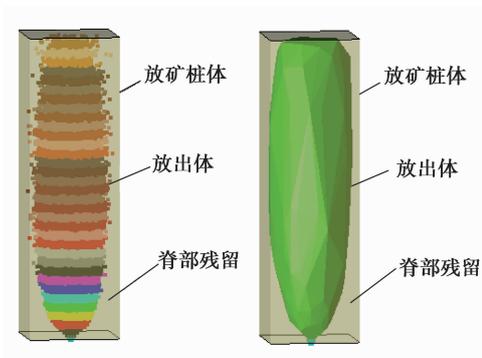


图 9 放矿柱体和脊部残留示意图

Fig.9 Sketch of oredraw column and remaining



图 10 矿岩离散颗粒

Fig.10 Discrete particle of ore-rock

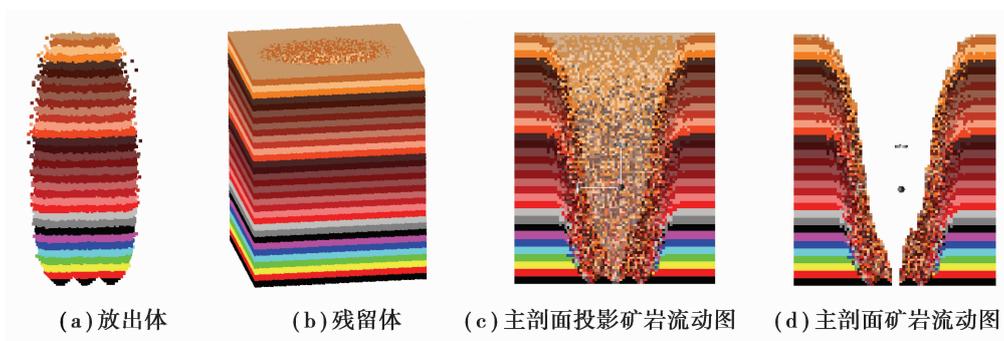


图 11 三点模型放矿模拟(放矿点间距 $d = 10\text{ m}$)

Fig.11 Oredraw simulation of three funnel model (distance of drawpoints $d = 10\text{ m}$)

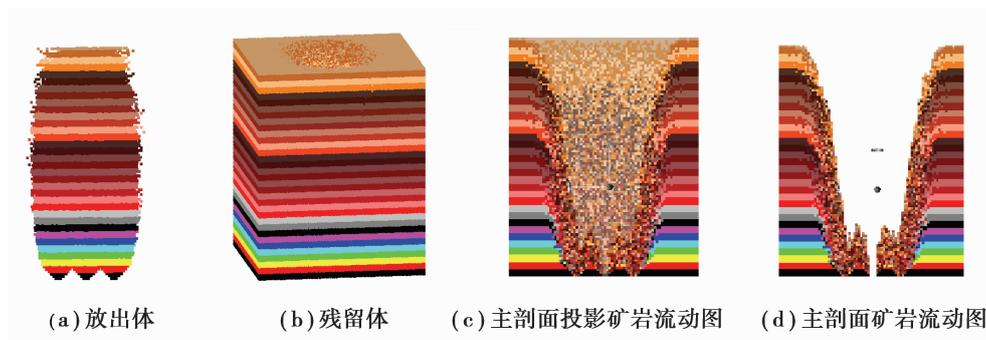


图 12 三点模型放矿模拟($d = 12\text{ m}$)

Fig.12 Oredraw simulation of three funnel model (distance of drawpoints $d = 12\text{ m}$)

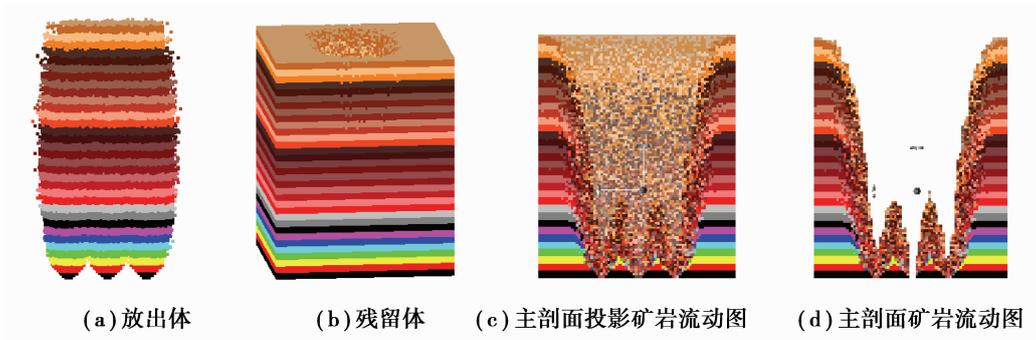


图 13 三点模型放矿模拟($d = 15\text{ m}$)

Fig.13 Oredraw simulation of three funnel model(distance of drawpoints $d = 15\text{ m}$)

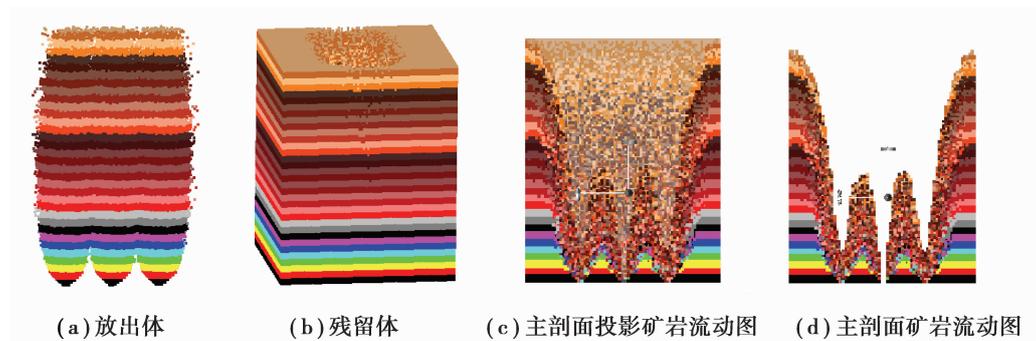


图 14 三点模型放矿模拟($d = 18\text{ m}$)

Fig.14 Oredraw simulation of three funnel model(distance of drawpoints $d = 18\text{ m}$)

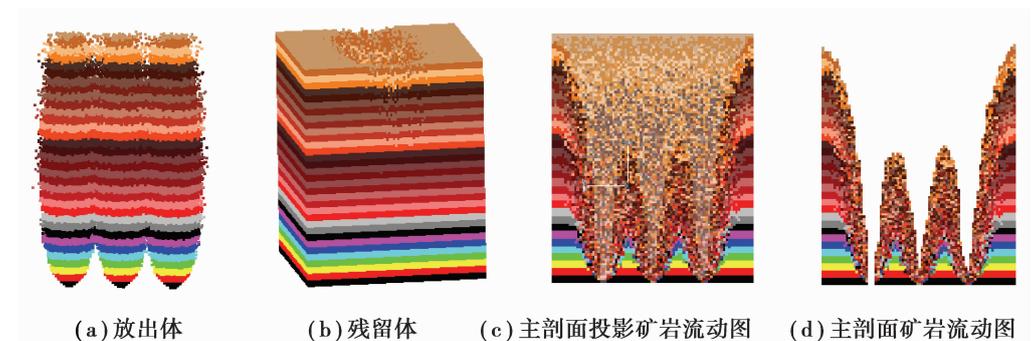


图 15 三点模型放矿模拟($d = 20\text{ m}$)

Fig.15 Oredraw simulation of three funnel model(distance of drawpoints $d = 20\text{ m}$)

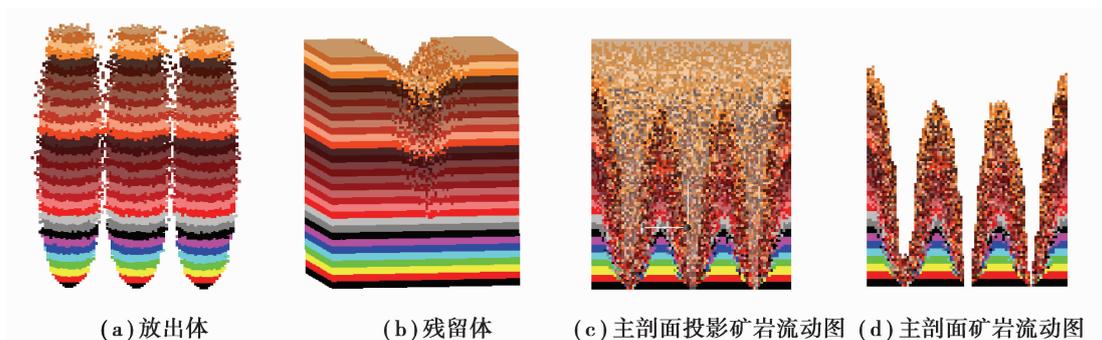


图 16 三点模型放矿模拟($d = 25\text{ m}$)

Fig.16 Oredraw simulation of three funnel model(distance of drawpoints $d = 25\text{ m}$)

表1 三点模型不同放矿点间距条件下放矿模拟结果
Table 1 Result of ore draw simulation under different distance of drawpoints

模拟方案	放矿点 间距 d/m	放出体 短半轴/ m	矿石 损失率/%	相邻漏斗 相互影响	备注
方案一	10	6.9	5.3	很快相互影响	采准工作量大
方案二	12	7.2	6.2	很快相互影响	采准工作量较大
方案三	15	8.3	7.2	较快相互影响	较合理
方案四	18	9.1	8.3	相互影响很慢	损失率较大
方案五	20	9.6	9.5	不相互影响	损失率较大
方案六	25	11.3	10.4	不相互影响	损失率大

由图16及表1可知,模拟方案一和方案二的矿石损失率较小,但放矿点间距小导致采准工程量较大;模拟方案五和方案六的放矿点间距较大,但矿石损失率较大;由模拟结果可知随着放矿点间距的增加,相邻漏斗流动矿岩相互影响逐渐减弱,而矿石损失率逐渐增加。所以,在放矿漏口尺寸为 $3.5\text{ m}\times 4.0\text{ m}$ 条件下,该放矿水平较合理的放矿点间距为 $14\sim 16\text{ m}$,此时相邻漏斗流动矿岩较快相互影响,但不会出现“烟囱”状放出体,矿石损失率和采准工程量在合理范围。

3 结 语

提出属性随机介质放矿理论,考虑放矿过程中矿岩品位等属性信息;从放矿水平布置出发,提炼出多漏斗放矿仿真模型,使用面向对象思想和编程语言设计模拟程序,得到了三维可视化环境下多漏斗出矿的属性矿岩流动特性。以矿石损失率趋小和相邻漏斗间矿岩散体流动相互影响趋快为目标,确定放矿底部结构优化参数,为放矿控制和放矿优化提供了参考和依据。

由于考虑了流动矿岩的品位信息,文中矿岩流动模拟方法不仅仅可用于放矿参数优化设计,还可以用于放矿计划编制,这可作为后续研究的内容。

参考文献:

- [1] Brown E T. Block caving geomechanics[M]. Queensland(Australia), Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 2002.
- [2] Castro R, Trueman R, Halim A. A study of isolated draw zones in block caving mines by means of a large 3D physical model[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2007, 44(4): 860-870.
- [3] 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 & Mining Science, 2008, 45(7): 1044-1051.
- [4] Melo F, Vivanco F, Fuentes C, et al. Kinematic model for quasi static granular displacements in block caving: Dilatancy effects on drawbody shapes[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2008, 45(5): 245-259.
- [5] Melo F, Vivanco F, Fuentes C. Calculated isolated extracted and movement zongs compared to scaled models for block caving[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2009, 46(6): 731-737.
- [6] Yashar P, Hoomam A N, Tannant D D. A multi-step approach for block-cave production scheduling optimization[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(3): 739-750.
- [7] Yashar P, Hooman A N, Tannant D D. A multi-step approach for block-cave production scheduling optimization[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(5): 739-750.
- [8] 刘兴国.放矿理论基础[M].北京:冶金工业出版社,1995.
LIU Xingguo. Foundation of ore drawing theory[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995. (in Chinese)

- [9] 李荣福.类椭球体放矿理论的理想方程[J].有色金属(矿山部分),1994(5):38-44.
LI Rongfu. Ideal equation of quasi-ellipsoid ore drawing theory[J]. Nonferrous Metals, 1994(5): 38-44. (in Chinese)
- [10] 李荣福.类椭球体放矿理论的检验[J].有色金属(矿山部分),1995(1): 37-42.
LI Rongfu. Inspection of quasi-ellipsoid ore drawing theory[J]. Nonferrous Metals, 1995(1): 37-42. (in Chinese)
- [11] 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.
REN Fengyu. The random medium theory of Oredrawing and its application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994. (in Chinese)
- [12] 荆永斌,刘晓明,毕林.复杂矿床三维可视化建模关键技术[J].中南大学学报,2014, 45(9):3104-3110.
JING Yongbin, LIU Xiaoming, BI Lin. Key techniques for 3D visual modeling of complex mineral deposits[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(9): 3104-3110. (in Chinese)
- [13] 毕林,王李管,陈建宏,等.基于八叉树的复杂地质体块段模型建模技术[J].中国矿业大学学报,2008,37(04):532-537.
BI Lin, WANG Liguan, CHEN Jianhong, et al. Study of octree-based block model of complex geological bodies[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(4): 532-537. (in Chinese)
- [14] 黄刚海,焦玉勇,张秀丽.岩质工程地质体三维球颗粒计算模型可视化建模[J].岩土工程学报,2014,36(4):782-786.
HUANG Ganghai, JIAO Yuyong, ZHANG Xiuli. Visual modeling for 3D spherical particle for geological body model of rock engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 782-786. (in Chinese)
- [15] Liu Z, Zhou N, Zhang J X. Random gravel model and particle flow based numerical biaxial test of solid backfill materials[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(4): 463-467.
- [16] 何国清,杨伦,凌赓娣,等.矿山开采沉陷学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1991.
HE Guoqing, YANG Lun, LING Gengdi, et al. Mining subsidence [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1991. (in Chinese)
- [17] 朱忠华,王李管,毕林,等.基于随机介质理论的自然崩落法崩落矿岩流动特性研究[J].东北大学学报,2016.37(6): 869-874.
ZHU Zhonghua, WANG Liguan, BI Lin, et al. Study on flow characteristics of discrete ore rock of block caving based on stochastic medium theory[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016,37(6): 869-874. (in Chinese)
- [18] 朱忠华,王李管,谭正华,等.三维平台下基于资源价值模型的自然崩落法放矿方案优化[J].黄金科学技术,2016, 24(1): 80-85.
ZHU Zhonghua, WANG Liguan, TAN Zhenghua, et al. Oredraw scheme optimization of block caving based on ore resource value model under 3D platform[J]. Gold Science and Technology, 2016, 24(1): 80-85. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)