

文章编号:1673-0062(2017)01-0006-05

自然崩落法放矿计算机模拟数据模型研究

朱忠华^{1,2}, 杨月平¹, 陶干强^{1*}, 蒲成志¹

(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,湖南 长沙 410083)

摘 要:在融合面向实体的数据模型和网格数据模型的基础上,引入参数化对象,设计了一种参数化、网格化的数据模型(PDENDM)用以模拟自然崩落法放矿过程,解决三维可视化环境下考虑时态和经济因素的放矿管理难题,包括放出体发育过程、多漏口放矿及配矿问题.运用面向对象的思想建立 PDENDM 模型的主要数据结构. PDENDM 采用面向实体的元素描述矿岩体及离散颗粒的实体特征,用网格元素描述系统内部网格的空间拓扑关系,并用参数描述实体轮廓、定位信息和其他属性信息,并结合实例分析 PDENDM 在自然崩落法放矿模拟中的作用.研究表明:该模型能够实现自然崩落法放矿过程的空间分析、时态分析,清晰地描述了不同放矿高度下单漏口放矿放出体形态发育及属性的变化,解决了矿岩颗粒流动及放出体发育等放矿研究中的关键问题,为后续多漏口放矿及配矿问题的解决奠定了良好基础.

关键词:放矿模拟;数据模型;自然崩落法;放矿管理;放矿控制

中图分类号:TD672;TP391 **文献标志码:**A

Study on Data Model for Oredrawing Simulation of Block Caving

ZHU Zhong-hua^{1,2}, YANG Yue-ping¹, TAO Gan-qiang^{1*}, PU Cheng-zhi¹

(1.School of Nuclear Resource Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2.Research Center of Digital Mine, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: To take oredrawing simulation of block caving, a new networked, hybrid and parametric discrete entity-network data model (PDENDM) was designed, which integrates entity-oriented data model and network data model and has some parameter elements. The object-oriented data structures of PDENDM were given. PDENDM describes the features of ore-rock body and discrete particles with entity-oriented elements and the spatial topology of inner network with network elements. It defines the entity outline, position information and other attribute

收稿日期:2016-09-05

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项目(2016XQD28);衡阳市科技发展项目(2016KS28)

作者简介:朱忠华(1981-),男,讲师,博士,主要从事数字矿山及数值模拟技术的研究, E-mail: zzhnihao545@126.com. * 通讯作者:陶干强, E-mail: nhutgq@126.com

information with parameters. Finally, the model was applied to ore drawing control simulation of block caving in 3D visualization environment. Research results show that the model is suitable for spatial, temporal analysis of ore drawing of block caving. It describes the development of draw-out body and attribute changes. It solves the key problems of ore drawing, laying a good foundation for multi-funnel ore drawing and subsequent ore matching work.

key words: ore drawing simulation; data model; block caving; ore drawing management; ore drawing control

0 引言

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,应用较好可以大幅降低采矿成本,产生很高的经济效益。其特点是崩落矿石和覆岩直接接触,在覆岩下出矿。若采场结构参数设计不合理,或者放矿管理不当,将引起较大的回采矿石的贫化及损失,造成矿产资源浪费和矿山企业经济效益下降。合理进行放矿控制,减少废石混入、提高出矿品位和矿石回收率,一直是崩落采矿法应用研究的一个中心课题,放矿问题解决的好坏,直接与崩落采矿法应用成败相关联。

在放矿理论研究方面,我国的研究走在前沿,形成了椭球体放矿理论、类椭球体理论和随机介质放矿理论^[1]。放矿工作的特点和复杂性要求进行放矿控制计算机模拟,但是在放矿控制计算机模拟方面,国内的研究还不足,其集中在以随机介质理论为基础模拟矿岩模块的移动概率场^[2];软件系统的开发还局限于二维,数据库管理也较落后,如国内唯一使用较好的自然崩落法放矿管理系统,即中条山铜矿峪矿使用FOXBASE编写的二维系统^[3];在三维可视化环境下,国内没有成形的放矿管理软件系统可用。国外比较成熟的放矿管理软件是PC_BC,然而由于其价格和操作习惯等原因,PC_BC在国内的用户很少。不少对此有实际需求的矿山及设计院转而使用颗粒流软件PFC2D,它可以模拟矿岩的流动,但其对描述属性欠佳,故就不能进行品位计算和经济性评价,不能满足放矿管理的实际需求。国内放矿控制计算机模拟研究的滞后和放矿管理软件系统的缺乏,一定程度上制约了崩落法矿山的放矿生产和管理,这种滞后和矿山实际需求之间的矛盾,使得放矿管理软件系统研发的迫切性凸显。放矿管理软件系统研发基础的重要环节就是数据模型的选取和数据结构的设计^[4],这也是本文研究的出发点。

1 自然崩落法放矿模拟系统对数据模型的要求

1.1 自然崩落法放矿的时空特征

1) 时态特征。自然崩落法放矿过程中,随着矿岩从漏口放出,矿岩在矿堆中呈随机流动,矿堆的形态、矿岩颗粒体及矿岩接触面都呈现出一个随时间变化的动态过程。

2) 空间非均质。矿堆在空间上呈现非均质特性,矿岩的品位、块度及流速均反应出这种非均质特性,且随着放矿的进行,矿石和岩石混织在一起,这种非均质的体现的更加明显。

3) 不可逆性。矿石在崩落围岩的覆盖下出矿,矿岩在重力及相互摩擦力的作用下,总体呈现一种从初始位置向漏口的流动,这种流动是单向和不可逆的。

4) 经济属性。放矿控制的目标是降低矿石损失贫化率,并最终和金属价格挂钩,通过配矿和放矿管理,提高矿山的经济效益,放矿工作的重要性也在于此。放矿工作的经济属性通过矿石品位、贫损率、和金属价格体现,不同的矿石品位和金属价格对应不同的出矿范围和放矿高度,而贫损率的增加将导致矿山盈利能力的减弱。

5) 海量数据。放矿管理面对的对象是矿岩体及相关人工工程(井巷工程、漏斗、拉底结构),矿岩体本身尺寸较大,且与相关人工工程有空间上的关系,矿岩的崩落、流动和放出都受这些关系的制约。此外,放矿的时态特征和矿岩离散体在空间上的非均质特性都给放矿控制带来较大的复杂性。同一放矿点在不同分层、相同分层在不同的时间上都显现不同的性质,放矿的时态特征也需要存储矿岩的历史记录,这些都带来数据量的急剧增加。

1.2 数据模型设计的原则和要求

一个完整的放矿控制软件系统实体由几何信息、属性信息和可视化信息三部分组成。其模型需满足以下基本要求:

1) 既能反应矿堆与离散实体空间位置及拓扑关系,又能描述矿岩颗粒属性的变化;既能描述

矿堆外形及属性的变化,又能描述矿堆内部空间及属性的变化;

2)既能真实地描述放矿过程的空间特性,又能描述放矿过程的时态特性.放矿过程中矿岩体形态、矿岩颗粒空间位置、属性及组成放出体的矿岩颗粒点之间的拓扑关系都是随时间而变化的,设计的数据模型要能便于描述这种变化.

3)方便根据语义层次地组织空间数据,如可以按放矿状态分层分块组织矿岩体、放出体等.

4)具有较小的数据冗余,便于进行空间分析和操作,便于查询、分析、改动和存储.

5)数据效率高,渲染速度快.

2 典型适宜矿山的数据模型

矿山是一个非均质的、拥有海量数据的三维甚至多度的复杂系统,矿山研究的对象是整个矿山的三维空间实体,主要包括矿山地质环境、地质体、矿山人工工程.近年来,地质、土木、采矿及计算机领域的专家学者对三维空间数据模型进行了卓有成效的研究.典型的适宜矿山特定环节的空间数据模型有 TIN 模型、DEM 模型和 DTM 模型、边界表示(B-rep)模型、三维栅格数据模型、三棱柱模型、TEN 模型、网络模型及混合数据模型等.TIN 模型通过不规则的三角面片构造地质模型,精确地表达地质体的边界^[5].DEM 模型和 DTM 模型分别称为数字高程模型和数字地面模型,DEM 模型和 DTM 模型的数据结构可以由 TIN 模型实现,也可以由格网实现^[6].TIN 模型和 DTM、DEM 模型可以较好地模拟地表、地层、断层、顶底板及层状矿体,但对矿体、空区、井巷等三维实体进行模拟时遇到困难.B-rep 模型将空间中任一实体分解为点、边、环、面、体等几类基本几何元素的组合,实体的边界由一系列面的并集来表示.B-rep 模型的核心信息是面,因而对几何物体的整体描述能力较差,无法记录组成几何体的基本体素的元素的原始数据^[7].三维栅格数据模型对目标地质体进行三维栅格化,文献[8]采用的块段模型实则就是三维栅格模型,实现了用八叉树结构表达.相比表面模型,块段模型可以模拟三维实体内部结构,并且可以包含实体内部空间的属性信息,但在实体边界上模拟效果不佳.三棱柱模型以三棱柱作为基本体元来表达空间对象,分 TP 和 GTP 模型,文献[9]基于 GTP 模型实现了三维地层的建模.TEN 是用四面体描述空间实体的数据模型,可以较好地模拟复杂边界实体^[10].网络模型在矿山最典型的应用就是矿井通风网络,文献[11]对通风网络拓扑及调控算法进行了研究.

此外还有一些学者进行了混合数据模型的研究,主要有:Section-TIN 混合模型、B-Rep-CSG 混合模型、Octree-TEN 混合模型、Wire Frame-Block 混合模型及 Octree-CSG 混合模型等^[12].

以上模型各有优缺点和适用面,但都不完全满足放矿控制软件系统对数据模型的要求.

3 参数化离散实体与网络复合数据模型

根据以上分析,本文设计了一种适用于自然崩落放矿管理系统的三维矢量数据模型,即参数化离散实体与网络复合数据模型(parametric discrete entity and network data model, PDENDM).建立了矿岩堆的 PDENDM 之后,由于该模型隐含了属性模型和流动模型,可以进行放矿模拟.

3.1 PDENDM 模型的元素组成

PDENDM 以矿岩离散颗粒为基础,兼顾流动模型和属性模型.该模型由实体元素、流动元素和属性元素组成.其中,实体元素作为流动元素和属性元素的承载,是该模型的主体.该模型元素组成如图 1 所示,各元素定义如下:

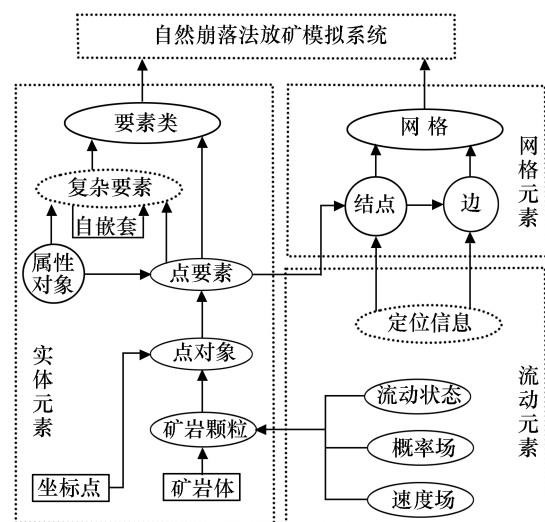


图 1 PDENDM 模型元素组成图

Fig.1 Structure diagram of parametric discrete Entity and network data model

1)坐标点:坐标点 (x, y, z) 表示三维空间中的一个位置.

2)离散参数:三维浮点数组,决定离散颗粒体大小.

3)颗粒点定位对象:三维整型数组.

4)颗粒点对象:放矿控制系统中颗粒点对象包含一个坐标点对象和属性对象,代表一个矿岩

离散点。

5) 属性对象:描述空间实体的属性信息,包括矿种、品位、比重、状态等信息,是一个 N 元组,通过 ID 关联到对应的实体对象。

6) 要素类:具有相同属性结构的同类要素的集合。

7) 结点:结点对象是一个网络拓扑几何对象,是边的端点,包含相关联边列表。

8) 边:边是几何网络的组成元素,其两端为结点。

9) 流动概率场对象:由流动模型确定,再根据定位信息确定空间位置。

3.2 基于矿岩颗粒的放矿流动模型

放矿模拟的流动模型,主要基于随机介质理论,相关学者做了很多研究,提出了九块递补模型、六块递补模型及七块递补模型^[13]。受 D.Jolley 九块模型的启发,提出基于矿岩颗粒的放矿模拟流动模型。矿岩颗粒的流动概率场方程为:

$$P_m(i, j, k) = \frac{1}{16^k} C_{2k}^{i+j+k} C_2^{i+j+k} k \quad (1)$$

式中, C 为组合符号, i, j, k 是离散颗粒的定位参数。根据德莫哇佛—拉普拉斯极限定理,当 $2k$ 足够大时,该式趋于二维正态分布:

$$P_m(i, j, k) \approx \frac{1}{\pi k} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{k}\right) \quad (2)$$

该模型中流动和递补的是作为矿岩颗粒的点对象,相比 D.Jolley 模型中的块体,点对象具有更简洁的数据结构,更好的显示效率。

3.3 PDENDM 的数据结构设计

数据模型是对客观世界的抽象,而数据结构是数据模型在计算机内的具体实现,是空间数据在计算上存储、管理和处理的逻辑结构和表达。在图 1 所示的逻辑结构图的基础上,运用面向对象的程序设计思想,建立模型中各个元素类的数据结构。实体元素类主要数据结构定义如下:

1) 坐标点包含坐标点 ID、三维坐标 (x, y, z) 。

2) 点对象包含点对象 ID、所属漏斗名称、坐标点 ID 和定位参数对象。

3) 矿岩体对象包含矿岩体编号、矿岩体尺寸、矿石元素。

4) 矿岩颗粒对象包含颗粒 ID、对应初始点对象 ID、当前点对象 ID、初始位置、当前位置、初始定位参数、当前定位参数、矿石品位、矿石(岩石)标记、放矿状态(是否放出)。

5) 定位参数对象,离散矿岩颗粒体的定位信息

(i, j, k) , 用 int 型三维数组表示,是矿岩颗粒的标识信息,初始定位参数在放矿矿岩流动过程中保持不变。

6) 属性对象.包含属性 ID、名称、类型,通过 ID 与对应的实体对象建立关联。

7) 要素类.包含要素类 ID、名称和描述。

网络元素的数据结构定义如下:

1) 结点类包含结点 ID、边 ID 列表、可扩展的附加信息结构。

2) 边类包含边 ID、开始结点 ID 和终止 ID。

3) 网络类包含网络 ID、网络名称、边 ID 列表和结点 ID 列表。

流动元素的数据结构定义如下:

1) 定位信息包含颗粒 ID、定位参数。

2) 流动场对象包含颗粒 ID、流动概率、流动速度和流动状态。

4 数据模型的应用

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,成矿元素以铜为主,伴有金、银、钼、硫等有用组分。矿化带长大于 2 300 m,宽 600~800 m,面积约 1.09 km²,呈穹窿状。普朗铜矿矿体厚大,但平均品位不高,拟采用自然崩落法开采,设计生产规模为 1.25×10⁷ t,计划 2017 年投产。

为模拟放矿过程,将本文数据模型用于普朗铜矿放矿模拟。采用无贫化放矿理论作指导,若上部覆盖岩层进入出矿口区域,即表示贫化产生,此时停止放矿。装矿口尺寸按照初步设计推荐的 4.2 m×3.9 m,放矿模拟计算分成六组,分别模拟放矿高度 h 等于 20、40、60、80、100、150 m 条件下单漏斗口放矿。模拟过程中计算和渲染效率比块段模型要高,模拟结果与初步设计的数据接近,真实反应了三维可视化环境下放矿过程。模拟结果见图 2 和表 1。

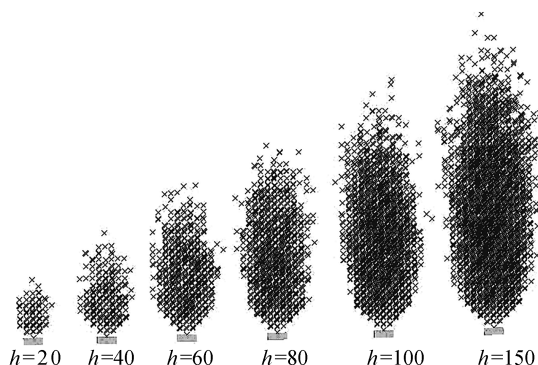


图 2 单漏斗出矿的放出体(单位:m)

Fig.2 The development of drawout-body under single funnel(uit:m)

表1 单漏口放矿放矿体发育

Table 1 The result of drawout-body development under single funnel

放矿高度 h/m	20	40	60	80	100	150
放出体 Cu 品位/%	0.49	0.51	0.48	0.53	0.50	0.51
长半轴长度/m	10.56	20.34	30.75	41.05	50.78	75.68
短半轴长度/m	6.9	9.7	11.7	12.6	13.1	13.4
偏心率	0.76	0.88	0.92	0.95	0.96	0.98

5 结 论

1)设计了自然崩落法放矿管理系统计算机模型的数据模型 PDENDM,该模型综合考虑了放矿过程的空间位置关系、属性特征及时态特征。

2)PDENDM 模型以矿岩离散颗粒为基础,建立网格模型和放矿流动模型,实现了三维可视化环境下单漏口放矿模拟,为自然崩落法放矿管理系统后续多漏口放矿、配矿工作及数据库设计奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] 冯兴隆.自然崩落法矿岩工程质量数字化评价及模拟技术研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [2] 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.
- [3] 张树茂.放矿图形的程序设计及应用[J].有色金属(矿山部分),2003,55(1):17-18.
- [4] 熊书敏,王李管,黄俊歆,等.地下矿可视化生产管控系统参数化数据模型[J].中南大学学报,2012,43(1):272-277.
- [5] 宋哲,刘衍聪,牛文杰.GIS 中 TIN 模型的实现算法[J].计算机应用,2003,23(12):94-96.
- [6] 王润怀.矿山地质对象三维数据模型研究[D].西安:西南交通大学,2007.
- [7] 黄牧,施焯辉,李大鹏.一种基于 B-rep 的地质模型建立方法[J].工程勘察,2013,11:67-70.
- [8] 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].中国矿业大学大学学报,2008,37(4):532-537.
- [9] 车德福,陈学习,吴立新,等.基于广义三棱柱体元的三维地层建模方法[J].辽宁工程技术大学学报,2006,25(1):36-38.
- [10] 刘衍聪,宋哲,牛文杰.基于 TEN 的 3D GIS 数据模型及其生成算法[J].计算机应用,2004,24(7):154-156.
- [11] 魏连江,周福宝,朱华新.通风网络拓扑理论及通路算法研究[J].煤炭学报,2008,33(8):926-930.
- [12] 程朋根,龚健雅.地勘工程 3 维空间数据模型及其数据结构设计[J].测绘学报,2001,30(1):74-81.
- [13] 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[J].东北大学学报,2016,37(6):869-874.