

无底柱分段崩落法进路顶部压力变化规律的 PFC^{2D} 模拟^{*}

周杭, 侯克鹏, 梁维

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:以无底柱分段崩落法为研究对象,采用颗粒流数值模拟软件 PFC^{2D}研究了在大量放矿时采场底部及侧壁突发的高动态应力变化规律,并通过两种不同的回采顺序对放矿时放矿口附近的压力增高区、压力降低区范围的变化进行了模拟分析。结果表明:随着放矿的进行其侧壁压力峰值逐渐增大,顶部压力降低区的范围随着工作面的推进逐渐减小,直至消失。两翼向中间回采时采场底部将产生应力集中,其采场底部压力将远大于一翼向另一翼回采。

关键词:无底柱分段崩落法;PFC^{2D};动态压力;覆盖层

中图分类号:TD853.36⁺2 **文献标志码:**B **文章编号:**1001-0076(2017)02-0025-05

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2017.02.005

Access Road at the Top of the Pressure Change Law of Pillarless Sublevel Caving of PFC^{2D} Simulations

ZHOU Hng, HOU Kepeng LIANG Wei

(Engineering Institute of Land and Resources, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Sublevel pillarless caving as the research object, using particle flow numerical simulation software PFC^{2D} study a large amount of ore drawing tope bottom and sidewall dynamic pressure change rule, and by two different stopping sequence of ore drawing simulated analysis the change of the pressure reducing area and higher pressure area. The results showed that: with the ore drawing to the wall pressure peak value increases gradually, at the top of the pressure to reduce the scope as the working face advancing gradually decreases, and until it disappeared. Two wings to the middle of the bottom of the stope will produce stress concentration, the stope bottom pressure will be greater than the wing to another wing of extraction.

Key words: sublevel pillarless caving; PFC^{2D}; the dynamic pressure; cover

无底柱分段崩落采矿法,因其回采安全、结构简单、机械化程度高、采准工程量小、回采强度大、出矿效率高等优点,在金属矿山特别是大储量、厚大矿体中得到广泛应用。无底柱分段崩落法是在松散岩石的覆盖条件下进行放矿、落矿等回采工作的其回采进路所受的压力来源于覆盖其上的崩落矿岩和未崩落矿岩^[1],在出矿时突发产生的高动态应力总是比

相应的静态应力大得多,对贮矿工程结构影响很大^[2]。随着开采深度的增加,回采至下分段时采场内矿岩散体的厚度随之增加,采场底部上必将承受着来自于采矿场内充填的散粒体废石或散体矿石的压力,矿岩散体内部的力是通过散体相互接触所产生的力链所传递的,放矿时散体内原有的接触破坏产生新的接触,形成新的力链,并且颗粒堆内具有搭拱效

* 收稿日期:2016-07-02

作者简介:周杭(1992-),男,福建南平人,在读硕士研究生,从事采矿工程方面研究。

应,散体颗粒堆的研究仍处于初级阶段,尤其是颗粒材料堆的理论研究更为欠缺,由于其复杂性、随机性以及测试手段的局限性,目前没有任何一个理论和模型能够完善地解释颗粒系统中的各种特性^[3]。

基于上述分析 在大量放矿时,矿岩散体的流动使得采场底部上所受的应力及其规律一直没有令人满意的解释,使之在工程设计中具有较大的盲目性。

放矿时采场底部压力的变化是复杂的,随着开采的进行在时间上、空间上不断变化,因此增加的支持工作的复杂性。本文采用 PFC^{2D}软件建立无底柱分段崩落法模型,通过对两种不同回采顺序进行模拟,得出矿体顶部压力降低区和增高区随着工作面的推进的变化规律及矿体侧壁在放矿时动态压力的变化,对矿山回采进路的支持起到一定的参考作用。

1 模型的建立

1.1 模拟方案设计

PFC^{2D}在矿业工程中的应用有着广阔的前景,它不但可以就放矿的几何形态进行模拟,而且还能对放矿的运动和力的传递关系进行研究,适用于各种边界条件下的放矿问题,后者是离散元法用于放矿研究的最大优点^[4]。但碍于软件的局限性及计算机水平,还需要做很多工作来保障模拟的准确性与高效性^[5]。PFC^{2D}即二维颗粒流程序,朱焕春^[6]介绍 PFC^{2D}的基本原理及其在岩土工程基础理论和工程应用研究中的主要功能。PFC^{2D}仿真模拟的流程见图 1。

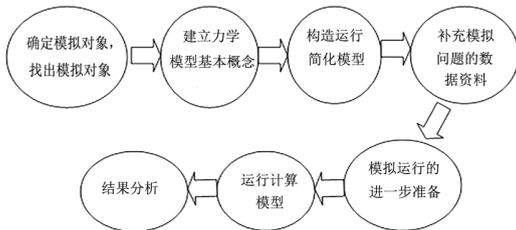


图1 PFC^{2D}操作流程

1.2 放矿颗粒流模型的建立

颗粒流模型理论的基本思想来源于分子动力学,是从微观结构上研究介质力学特性和行为的工具并将介质的力学行为反映为颗粒集合体的力学行为。在 PFC^{2D}中“颗粒”被认为是刚性的,符合牛顿第二运动定律。颗粒流的接触模型可分为接触刚度模型、接触滑动模型、粘结模型(接触粘结模型、平

行粘结模型),本文使用的是接触粘结模型。PFC^{2D}中颗粒的细观参数与通常意义上的宏观参数往往有很大出路,因此要通过大量的数值实验来获取颗粒的宏观参数^[7]。然而目前还没有完善的理论可以根据颗粒间的微观参数进而推算出介质的宏观力学参数,通常采用反复调整微观参数的分析方法来反算介质的宏观力学参数。数值模拟最终获得微观参数表 1、表 2。

表1 矿石散体微观参数表

$\rho/(\text{kg m}^{-3})$	R_{\min}/m	R_{\max}/R_{\min}	E_c/MPa	knks	σ_{cn}/kPa	τ_{cs}/kPa	μ
2 801	03	1.4	80	1.9	130	130	0.9

表2 废石散体微观参数表

$\rho/(\text{kg m}^{-3})$	R_{\min}/m	R_{\max}/R_{\min}	E_c/MPa	kn/ks	σ_{cn}/kPa	τ_{cs}/kPa	μ
2 900	0.3	1.4	69	1.8	120	120	0.7

1.3 放矿模型的建立

利用“墙体”作为模型的边界,在二维建模中模型宽度为 100 m,高度为 124 m(其中废石覆盖层高度 100 m,分段高度 20 m)。模型“墙体”分段建立,以便于对“墙体”的受力以每 50 步一次进行监测。对它们进行控制实现分步距放矿,放矿步距为 4 m,共计 12 个步距。模型总共生成 23 046 个颗粒。根据上述的微观参数标定对颗粒进行赋值并在重力加速度作用下达到平衡,最后对球体的应力、速度和位移进行初始化,得到放矿模型如图 2。其中矿体中轴线为 Y 轴,回采进路为 X 轴,两边各 50 m。

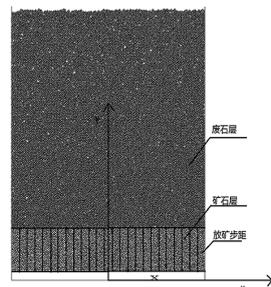


图2 放矿模型

1.4 模拟放矿方案

模型建立后,使模型中的颗粒到达平衡状态,考虑到模型生成的颗粒较多以及计算机的计算能力,在生成颗粒和系统平衡时分七次进行,每次生成一部分颗粒使系统达到相对平衡后再生成另一部分颗粒,因而系统的平均不平衡力有七次较大的波动,当

生成全部颗粒后将模型系统运行至最终平衡,系统平均不平衡力随时步的变化如图3。

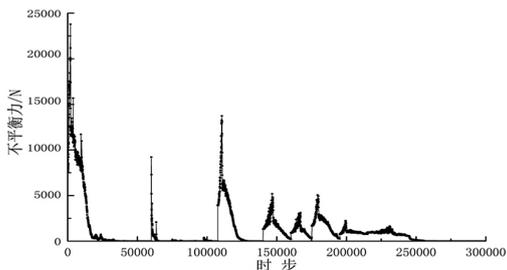


图3 系统平均不平衡力随时步的变化

当模型到达平衡后矿体顶部受力也将达到稳定,矿体顶部初始受力如图4所示。

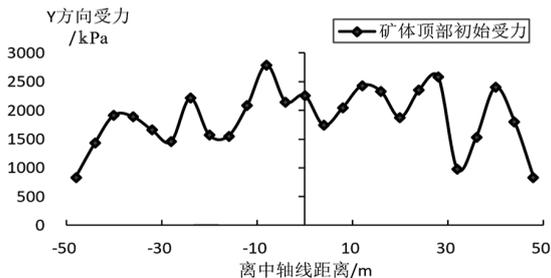


图4 矿体顶部初始受力

模型中矿体顶部初始受力并非均匀分布,并且很不平均。总体上呈现两边低中间高,这是由于采场内松散矿岩对矿壁之间的摩擦阻力和压力拱的作用所影响的。

本次模拟采用二种不同的放矿顺序:方案I,两边向中间同时放矿;方案II:从左到右放矿,通过删除相应的墙体以及颗粒来实现不同顺序放矿方式,如图5所示。

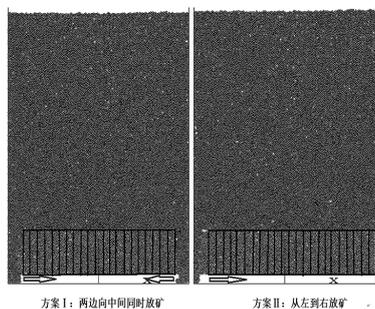


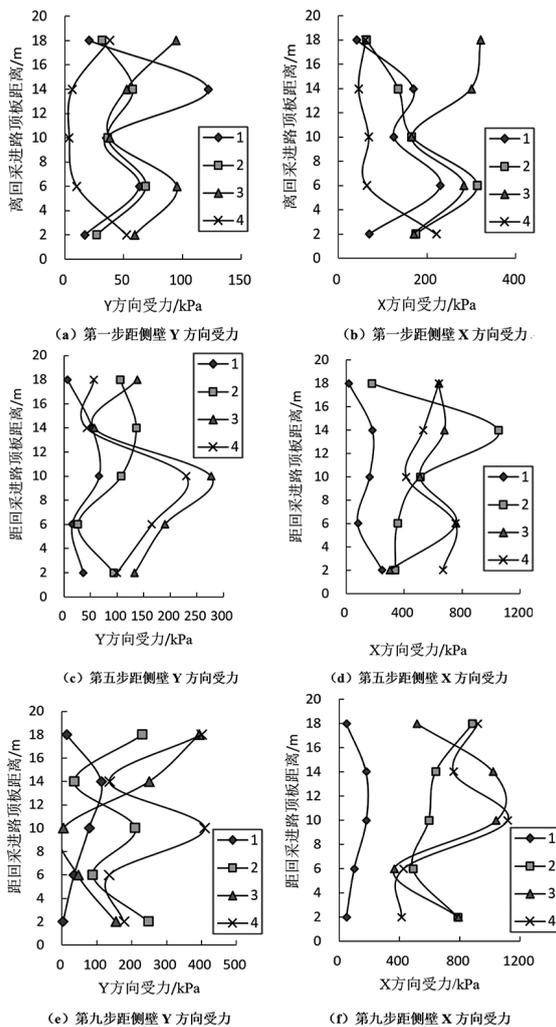
图5 不同放矿顺序

2 模拟放矿及受力分析

初始稳定后,开始放矿之前整个模型处于受力平

衡状态。当放矿一旦开始进行,模型中的受力平衡态即被打破,颗粒受合力与力矩作用,开始发生速度和空间位置的变化。利用 PFC 中命令,自动检测颗粒位置,当颗粒落入到进路空间位置区间时,通过删除这些颗粒,来模拟无底柱分段崩落法放矿的过程。根据调试,确定每循环 15 000 时步删除放出颗粒。

由于步距较多,篇幅所限只对方案II中记录的第一步距、第五步距、第九步距放矿开始至放矿结束过程中侧壁动态压力和矿体顶部在放矿时间内平均压力进行详细分析。方案I中第一步距、第五步距、第九步距放矿开始至放矿结束时侧壁压力曲线图与矿体顶部压力曲线图如图6、图7所示。



(a)、(b):1、第一步距放矿开始;2、294150 时步;3、31150 时步;4、第一步距放矿结束。(c)、(d):1、第五步距放矿开始;2、710150 时步;3、768150 时步;4、第五步距放矿结束。(e)、(f):1、第九步距放矿开始;2、1182200 时步;3、1221200 时步;4、第九步距放矿结束。

图6 方案I各步距放矿侧壁受力曲线图

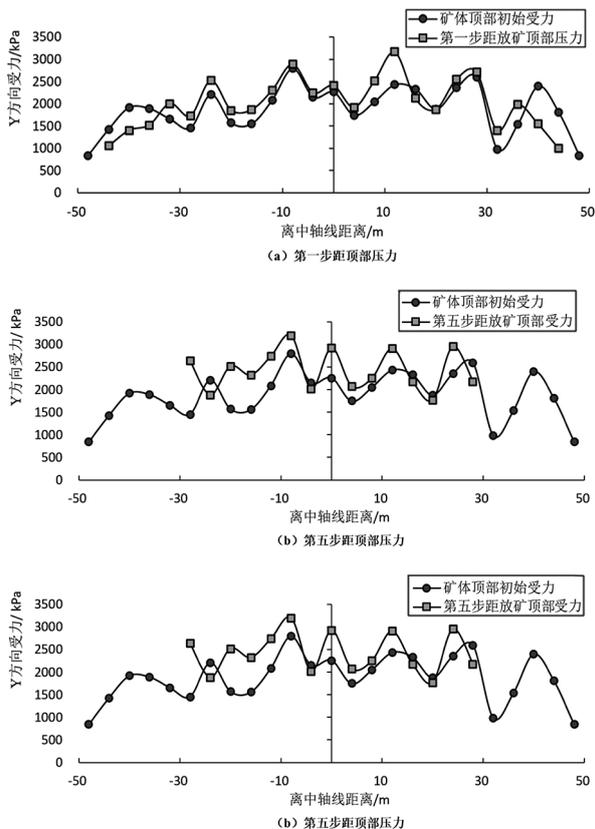


图7 方案I各步距放矿时顶部压力曲线图

由图6、图7结果可知:

- (1) 放矿时侧壁压力的最大值有突然增大、减小的现象,这是由于放矿时端部放矿口打开,在放矿口上方出现压力拱。放矿中在不同高度压力拱形成与崩解的过程,可知当侧壁某位置出现最大压力时,此位置正处于压力拱拱脚处。
- (2) 第一步距放矿时,随着放矿的进行侧壁 x、y 方向受力逐渐减小,当放矿结束后侧壁所有的测点 x、y 方向受力普遍小于初始应力,如图6(a)、(b)所示,这是因为第一步距放矿时其侧壁矿岩散体量较少,并不能形成完整的压力拱。
- (3) 随着回采的进行,放矿放至第五步距、第九步距时在放矿的动态过程中侧壁所受到的力是反复的,随着拱的形成与崩解使其侧壁压力产生突变。x、y 方向上各测点的力的大小都会波动并且在总体上逐渐增大。第五步距放矿时 x 方向最大压力值为 1 049kPa,是未放矿时侧壁 x 方向最大压力值的 4 倍。第九步距放矿时侧壁 X 方向最大压力值为 1 116 kPa是未放矿时侧壁 x 方向最大压力的 6 倍。

- (4) 矿体顶部压力并非均匀分布,但大致为中间

大两边小,呈现波动。随着放矿的进行矿体顶部压力逐渐转变为压力降低区、压力升高区、压力平稳区。压力降低区由放矿口向一边扩展,升高区在压力降低区之后,压力急剧上升至最大值。压力平稳区在压力升高区之后。第一步距放矿过程中压力降低区范围在工作面往后 3 个步距内,压力升高区为压力降低区后 6 个步距内。第五步距、第九步距放矿压力降低区基本消失,矿体中部产生应力集中现象。

方案II记录了各步距放矿矿体顶部 y 方向受力,随着放矿的进行矿体顶部受力曲线如图(8)所示。

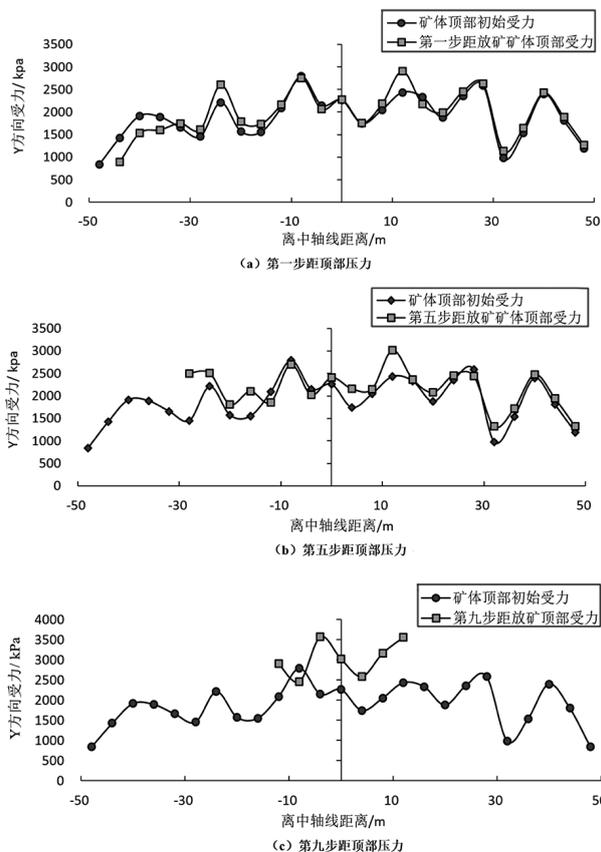


图8 方案II矿体顶部受力

由图8结果可知:

- (1) 第一步距放矿时存在压力降低区,其范围为工作面往后 3 个步距内。压力升高区范围为压力降低区后 6 个步距范围内。同方案一致,但压力平稳区范围增大。
- (2) 第五步距、第九步距放矿时压力降低区消失。
- (3) 放矿开始后模型右侧离中轴线 12 m 处受力出现突变,经前面分析,这是由于此时此处正处于压

力拱的拱角处。从第五步距、第九步距放矿时采场底部受力曲线图可以看出,模型右侧压力拱拱角位置不变,左侧拱角随着工作面的推进向右移动。

(4)随着放矿的进行,在矿体顶部中间位置压力有所增加,但增加程度明显小于方案I。

3 结论

(1)在放矿过程中,放矿口上方的矿岩散体发生松动,并且出现压力拱,拱的上方的矿岩散体压力传递到四周,在侧壁应力产生突变,在矿体顶部产生压力升高区及压力降低区。

(2)放矿过程中侧壁压力呈现波动并逐步增大最终达到初始压力的4~6倍,矿体侧壁的受力是一个循环加载的过程。方案I中,第一步距放矿时矿体顶部压力降低区范围在工作面往后3个步距内。压力升高区范围在压力降低区后6个步距内。第五步距、第九步距放矿时矿体顶部压力降低区消失,其矿体顶部压力均比矿体顶部初始受力大。由此可知随着工作面向中间推进,压力降低区逐渐减小直至消失,

矿体顶部受力在随后几个放矿步距内将逐渐增大。

(3)通过对比方案I与方案II矿体顶部受力曲线,方案I中两边矿体顶部压力升高区相遇时将产生应力叠加,其最大压力将达到方案II矿体中部压力的两倍。

参考文献:

- [1] 熊国华,赵怀遥.无底柱分段崩落采矿法[M].北京:冶金工业出版社,1988:136-137.
- [2] 戴兴国,古德生.出矿时产生高动态应力的计算[J].中南矿冶学院报,1992,23(4):387-388.
- [3] 孙利民,杨阳,梁江涛.散体力学研究现状及发展[J].开封大学学报,2011,25(2):74-77.
- [4] 王泳嘉,刘国兴,邢纪波.离散元法在崩落法放矿中应用的研究[J].有色金属.1987,39(2):21-26.
- [5] 田瑞霞,焦红光.离散元软件PFC在矿业工程中的应用现状及分析[J].矿冶,2011,20(1):79-80.
- [6] 朱焕春.PFC及其在矿山崩落开采研究中的应用[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1928-1931.
- [7] 王培涛.节理边坡岩体参数获取与PFC^{2D}应用研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(3):561-565.

技术示范,助推赣南矿业经济创新发展

2017年3月20—30日中国地质调查局郑州矿产综合利用研究所赣南矿产综合利用调查评价项目组赴赣州市及于都县、兴国县开展赣南矿业产业发展规划编制前期调研工作

项目组通过调研于都县、兴国县矿产资源管理局、发展和改革委员会、工业和信息产业局、环境保护局和当地有较大影响的矿山企业和矿产加工企业,收集规划编制所需数据资料,召开现场座谈会,为科学编制《于都县矿业产业发展规划》《兴国县非金属矿产业发展规划》提供坚实基础。

赣南矿业产业发展规划编制工作是“赣南矿产综合利用调查评价”项目任务之一,旨在针对赣南地区矿业发展需求,通过对区域高岭土、硅石、萤石、钨、铅锌等资源产业发展现状调查,以资源条件为基础,结合当地经济社会发展和生态环境保护需求,开展赣南地区、重点县(市)矿产资源开发产业发展规划研究,提出矿产资源开发利用、产业结构与布局、产业发展方向等规划建议,通过规划引领,促进当地矿业经济健康稳定发展。

(中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所 郭敏)