文章编号:1673-0062(2008)04-0046-05

急倾斜矿体充填法回采的 FLAC^{3D} 模拟

章求才,贺桂成

(南华大学 核资源与安全工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:针对四川省宁南县银厂沟矿和骑骡沟矿开采,采用三维有限差分程序FLAC^{3D}法,建立了两种不同水平回采厚度的上向分层充填法开采的数值模拟模型,研究了采场上覆岩层的稳定性.研究表明:矿体厚度对采场的稳定性起着决定性作用;适当地选择采空区的暴露面积是控制采场围岩灾变的有效途径;三维有限差分法能较好地模拟上向分层充填法的开采动态,模拟结果也为类似条件下矿山的开发提供了重要的参考.

关键词:急倾斜矿体;上向分层充填法;FLAC^{3D};矿体回采厚度;采场暴露面积

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:B

FLAC^{3D} Modeling of the Backfill Method Mining for Steeply Dipping Ore-body

ZHANG Qiu-cai, HE Gui-cheng

(School of Nuclear Resources and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: The 3D finite difference program, FLAC^{3D}, was used to establish two mining models of upward slicing and backfill method of different horizontal mining thickness for Yinchanggou and Qiluogou in Ningnan County, Sichuan Province, and the stability of the surrounding rock mass was analyzed. The results show that the mining thickness plays a decisive role in the stope stability, and that the appropriate goaf's exposing area is an efficient approach to control the risk evaluation of the surrounding rock masses for stope, and that the 3D finite difference program, FLAC^{3D}, is effective in modeling the mining process of upward slicing and backfill method and the modeling results can be used as the important reference for the development of metal mines under the similar conditions.

Key words: steeply dipping ore-body; upward slicing and backfill method; FLAC^{3D}; ore-body thickness; stope exposure area

收稿日期:2008-10-13

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20060540001);湖南省2007年度安全生产科技发展计划资助项目(07-18)

作者简介:章求才(1982-),男,江西黎川人,南华大学核资源与安全工程学院助教,硕士研究生.主要研究方向:岩土工程技术.

0 引言

充填采矿法具有能有效控制围岩移动、确保地表不发生沉陷、处理大量固体废物等一系列优点,在我国和世界其他采矿大国得到越来越广泛的应用. 目前我国有色金属地下矿山的 45%、黄金矿山的 37% 均采用充填法回采[1]. 纵观国内外充填采矿法的最新进展,关于充填新工艺、新材料、新方法方面的研究和应用成果层出不穷[2]. 相对而言,从回采过程的角度研究充填法开采引起的围岩移动与采空区上、下盘稳定性控制方面的报道却较少,特别是针对急倾斜矿体充填采矿法回采的报道则更少. 因此,有必要对急倾斜矿体充填采矿法回采引起的围岩移动与采空区上、下盘破坏规律进行研究.

由于矿山采场地质条件复杂,很难建立一个实验室来研究回采过程中采场围岩的运动规律. 近年来,随着数值模拟技术的发展和广泛应用,它已发展成为研究矿山开采问题的一种可靠、有效的途径和方法. 然而,这些数值分析方法的理论本身以及采用的算法都有各自的局限性. 例如有限元和边界元都采用了小变形假设,且需大量的内存. 近十年发展起来的 FLAC^{3D}(3D Fast Lagrangin Analysis of Continua),则是在较好地吸取了上述方法的优点和克服了其缺点的基础上发展起来的一种新型的数值分析方法. 该软件是一个用于分析和解决工程力学问题的三维显式差分法程序,主要适用于模拟围岩的变形情况和围岩达到屈服极限以后所产生的塑性流动情况,特别适合于模拟大变形和扭曲,能使计算结果与实际情况更加吻合. 目前 FLAC^{3D}软件在我国尤其是在采矿工程界得到了广泛的认可和应用[3-6],并取得了具有工程指导意义的应用成果.

文章即针对四川省宁南县银厂沟矿和骑骡沟矿矿山进行了 FLAC^{3D}数值模拟,其结果与实际情况相符,为合理回采地下矿产资源提供了参考依据.

1 急倾斜矿体充填采矿法回采的 FLAC^{3D}模拟

1.1 工程概况

四川省宁南县拥有丰富的矿产资源,银厂沟矿区和骑骡沟矿区是宁南县主要铅锌矿区. 两矿区的矿体均为急倾斜矿体,矿体平均厚度 1.2 ~ 6 m、倾角 54° ~ 60°,矿体稳固性较好,上、下盘围岩较稳固. 开采技术条件简单,水文地质条件简单. 上盘为深灰色中厚层状碎裂白云岩、砂屑白云岩,厚 1.4 ~ 1.52 m,岩性坚硬,总体稳固性好,但风化后强度有所降低、遇水后稳固性变差;下盘围岩为中厚层状细晶 - 粉晶白云岩,厚 1.5 ~ 2 m,岩石坚硬至半坚硬,总体稳固性较好,但裂隙发育地段极易冒落.

根据矿体赋存特点和开采技术条件,结合国内外开采急倾斜矿体的实际经验,拟采用上向低分层无矿柱尾砂充填采矿法. 围岩、矿体及充填料的力学参数见表 1.

表 1　围岩、矿体及充填料的力学参数

Table 1　Mechanical parameters of the surrounding rock mass and ore - body and filling materials

名称	容重/(kN · m^{-3})	弹模/GPa	粘聚力/MPa	内摩擦角/°	泊松比
砂屑白云岩	29	20	25	32	0.28
细晶白云岩	29.8	27.8	31	38	0.30
矿　体	28.4	32.1	24	30	0.25
充填材料	20	0.57	0.6	41.5	0.18

1.2 屈服准则

模型把矿体及围岩视为理想弹塑性体,屈服条件为 Mohr—Coulomb 屈服准则,其函数形式为

$$\frac{1}{3}I_1\sin\varphi + \sqrt{J_2}\sin\theta_0 + \frac{\sqrt{J_2}}{\sqrt{3}}\cos\theta_0\sin\varphi - C\cos\varphi = 0 \quad (1)$$

式中:θ_0 为 Lode 角($-\pi/6 \leqslant \theta_0 \leqslant \pi/6$);$C$、$\varphi$ 为矿体及围岩的粘聚力和内摩擦角;I_1 为应力张量第一不变量;J_2 为应力偏量第二不变量.

1.3 FLAC^{3D}模型

本文采用 FLAC^{3D}(3.0 版)进行模拟计算. 模型的几何参数主要依据《银厂沟、骑骡沟铅锌矿区探采结合工程》可行性研究报告,充分考虑了围岩受回采扰动的影响及边界条件的影响而确定的. 模型长为 200 m、宽为 200 m、高为 100 m.

根据水平回采厚度的不同,建立了 2 个数值

计算模型. 模型 I 的水平回采厚度为 2.5 m,模型 II 的水平回采厚度为 5 m;矿体倾角均为 55°;沿走向方向采场埋深为 100 m;开采的垂直高度均为 50 m(20 ~ 70 m). 模型的初始应力为自重应力,模型在回采前进行了自平衡处理(自平衡以最大不平衡力历史为判断依据),并在进行模拟计算的过程中,模型边界约束条件设定如下:取前、后、左、右四侧为限制水平方向位移的滑动支座,底部为限制水平方向与垂直方向位移的固定支座,如图 1 所示.

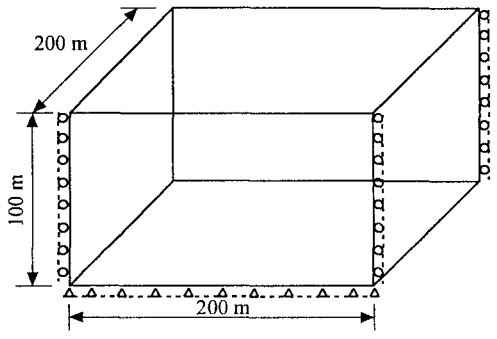


图 1 FLAC^{3D}模型及边界约束条件

Fig. 1 FLAC^{3D} model and boundary conditions

为了便于分析比较,模型 I、模型 II 均采用相同的网格划分,采用不等分方式划分单元,对矿体及其附近围岩采用细划分,其他单元按比例放大. 计算模型共划分有 26 640 个长方体单元,29 526 个节点. 模型的几何形态及单元划分如图 2 所示.

1.4 回采及充填过程的模拟

根据《银厂沟、骑骡沟铅锌矿区探采结合工程》可行性研究报告所拟定的回采方案,模型模拟的回采过程为:沿倾斜方向上向低分层回采,分层回采效果在模拟过程中用时间步时代替,每分层回采的垂直高度为 2.5 m.

回采顺序为:回采完第一分层后立即进行第二分层的回采,待第二分层回采完毕后再用充填料把第一分层回采形成的采空区进行充填,此后每回采完上一分层立即对下一分层进行充填,依此循环进行,到第 17 步分层回采完毕后,此时回采的垂直高度为 62.5 m,充填的垂直高度为 60 m. 此后继续分层回采,但不再进行充填,即在垂直高度为 60 ~ 70 m 的高度作为采空区的控顶高度. 因此,整个模拟过程共进行了 20 步分层回采,16 步分层充填.

2 FLAC^{3D}模拟结果分析

通过采用模型 I 和模型 II 进行模拟计算,得到了采场横剖面(沿采场走向方向开采深度 50 m)内的水平位移等值线、最大与最小主应力等值线以及塑性破坏状态图.

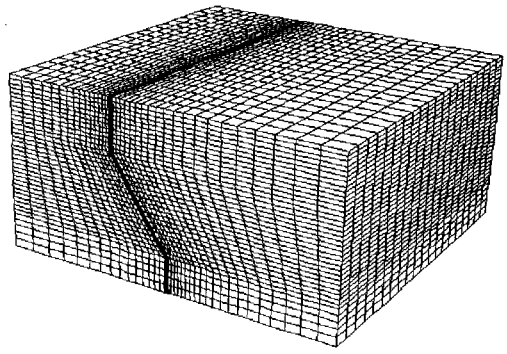


图 2 三维有限差分计算网格

Fig. 2 Mesh of three dimensional finite difference

2.1 围岩的变形

图 3 为模型 I 和模型 II 回采结束后采场横剖面内的水平位移等值线图. 由图可知:在采场围岩中,模型 I 的水平位移的最大值为 25 mm,模型 II 的水平位移的最大值为 27.5 mm,约为前者的1.1 倍;模型 I 采场竖向有明显的回采的影响范围为 12 m,模型 II 竖向开采的影响范围为 17 m,约为前者的 1.42 倍. 说明采场水平位移的最大值及开采影响范围并不与水平开采厚度成线性关系. 但是,模型 I 和模型 II 水平向的位移等值线的变化趋势是基本相同的:竖直向的位移等值线在采场内是基本对称的,在上盘的中部位置位移大,在充填区的顶端和采空区上部未开采的区域位移较小;模型 I 和模型 II 的下盘几乎没有发生水平位移. 模型 I 顶板位移的最大值为 25 mm,而模型 II 的最大值为 27.5 mm,与采空区水平位移的变形情况相似.

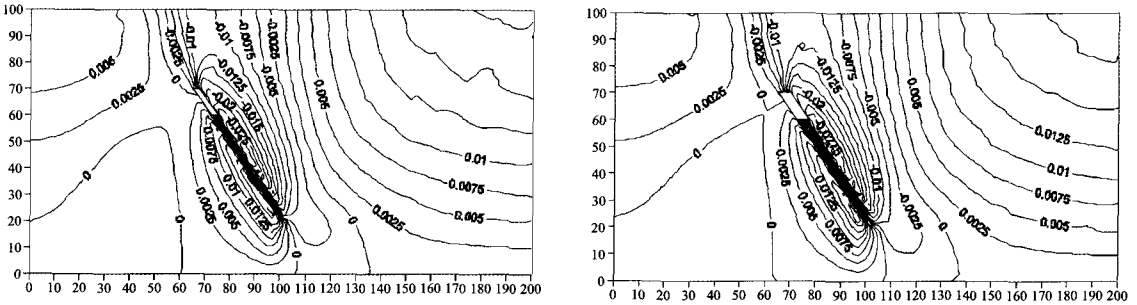
在充填区域内,模型 I 和模型 II 的上、下盘均产生了水平位移,尤其是下盘水平位移相对采空区来说变形明显,且两者的位移等值线的变化趋势几乎相同;但是模型 II 的水平位移值及影响范围均比模型 I 大,与采空区一样.

因此,在充填采矿法回采过程中,要及时充填采空区,同时要注意充填料的强度. 所选充填料强度的高低决定了采空区上、下盘受回采扰动影响的程度,若所选充填料的强度过低,则导致上盘冒

顶和下盘底鼓；若所选充填料的强度过大，则会增加采矿成本.

2.2　围岩的最大、最小主应力

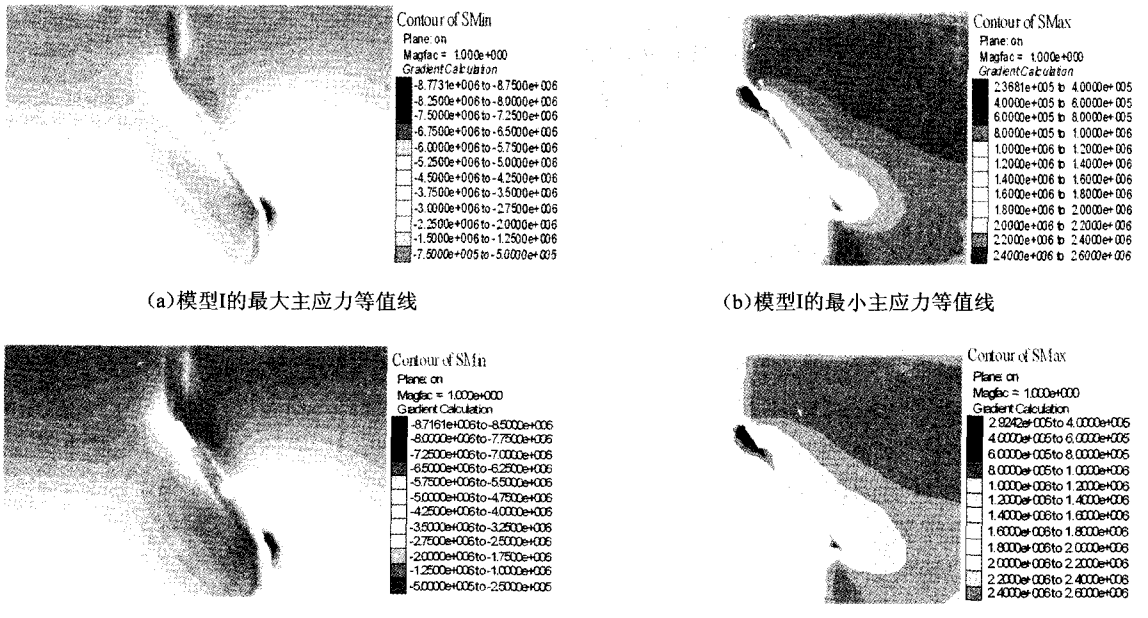
图 4 为模型 I 和模型 II 回采结束后采场横剖面内的最大、最小主应力等值线图. 由图可知：模型 I 在采空区内的最大主应力的最大值为5.25 MPa，模型 II 在采空区内的最大主应力的最大值为 5.75 MPa，约为前者的 1.1 倍，且两者均发生在采空区下盘的中部位置；模型 I 在采空区内的最小主应力的最大值为 2.368 1 MPa，模型 II 在采空区内的最小主应力的最大值为 2.924 2 MPa，约为前者的 1.23 倍. 由此可知，两种不同开采模型的最大、最小主应力的最大值的数值相差不大，且两者之间的比值也相差不大，说明两种不同开采模型受开采扰动后产生应力重分布的最大、最小主应力的分布规律及变化趋势是一致的.



(a)模型I的水平位移等值线　　(b)模型II的水平位移等值线

图 3　横剖面水平位移等值线图

Fig. 3　Contour of horizontal displacement of the cross section



(a)模型I的最大主应力等值线　　(b)模型I的最小主应力等值线

(c)模型II最大主应力等值线　　(d)模型II的最小主应力等值线

图 4　横剖面主应力等值线图

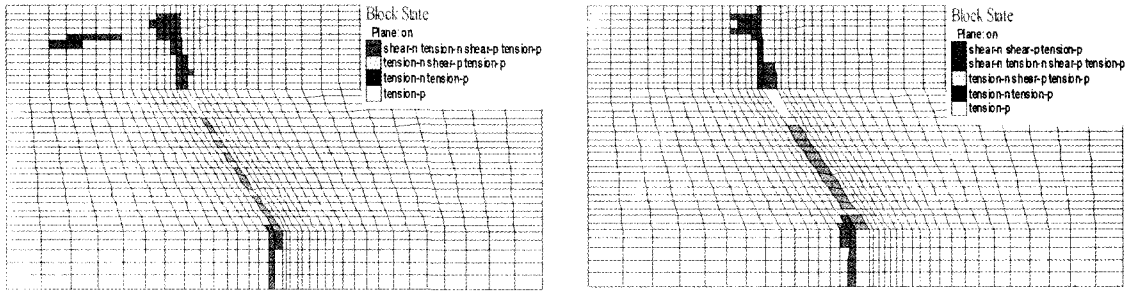
Fig. 4　Contour of principal stresses of the cross section

模型 I 的最大主应力的最大值与其最小主应力的最大值的比值为 2.2∶1；模型 II 的最大主应力的最大值与其最小主应力的最大值的比值为 1.96∶1. 由此可知，在同一种开采模型中，随开采厚度的增加，最大、最小主应力之间的比值越来越接近.

由图 4 中最小主应力等值线图可知:由于充填料的存在,使得采空区的下盘形成了应力拱,拱脚位于未开采的顶板和充填体上. 说明充填体的存在为应力拱的形成提供了有利的支承作用,有效地阻止了下盘进一步破坏,同时也有效的控制了采场的稳定. 而且模型 II 的应力拱的形状比模型 I 的应力拱的形状要明显,其影响面积较大. 说明采场水平开采厚度越大,在下盘越易形成最小主应力拱,有利于下盘稳定. 但是这种稳定与控顶宽度及水平开采厚度有关,当超过一定限度后,最小主应力拱将会失稳破坏,使矿山压力显现,最终形成灾变.

2.3 围岩的破坏

图 5 为模型 I 和模型 II 回采结束后采场横剖面内的塑性破坏状态图. 由图可知:模型 I 和模型 II 在采空区上、下盘均未出现塑性破坏状态,说明这两种开采模型在开采过程中,采场是稳定的,模型参数是合理可靠的. 但是,在采场沿矿体倾斜方向的顶部和充填区域的充填材料出现了拉、剪破坏,尤其在充填区域底部的下盘位置拉、剪破坏很明显. 说明在上向分层充填法开采中,由于应力拱的存在,造成采空区沿矿体倾斜方向的顶部出现了明显的应力集中现象,使得此处的围岩在压应力的作用下形成剪切破坏,是围岩发生灾变的重点控制区域.



(a)模型I的塑性破坏状态 (b)模型II的塑性破坏状态

图 5 横剖面塑性破坏状态图

Fig. 5 Plastic state of the cross section

3 结语

1) 矿体厚度对采场稳定性起着决定性的作用. 矿体厚度增加,采场上、下盘所受扰动的程度加剧,易形成应力拱,使采场顶部和底部产生应力集中现象,是采场围岩冒落的重要原因.

2) 选择合理的采空区暴露面积是控制采场围岩灾变的有效途径. 不适当地增加采空区的暴露面积,增加了采空区大面积跨落灾变的可能性,如果没有有效的监测预报,就可能发生采场重大灾害. 3) 数值模拟研究表明,FLAC^{3D}能有效地模拟回采过程,其研究结果为矿产资源的合理、安全、经济的开发提供了参考依据.

4) 银厂沟矿区和骑骡沟矿区选取的上向分层充填法回采是合理的,当矿体厚度在 2.5 ~ 5 m 之间,控顶高度在 10 m 左右,采场走向长度在 100 m 左右时,回采作业是安全的.

参考文献:

[1] 刘同有. 充填采矿技术与应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2001.

[2] Stone D. Minefill 2001: Proceedings of the 7th International Symposium on Mining with Backfill[M]. Littleton, Colorado: SME, 2001.

[3] 寇晓东,周维垣,杨若琼. FLAC^{3D}进行三峡船闸高边坡稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(1): 6 - 10.

[4] 谢和平,周宏伟,王金安,等. FLAC 在煤矿开采沉陷预测中的应用及对比分析[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(4):397 - 401.

[5] 王金安,谢和平,M. A. Kwasniewski,等. 建筑物下厚煤层特殊开采的三维数值分析[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(1):397 - 401.

[6] 杨小聪,陈忠辉. 安庆铜矿开采过程的数值模拟[J]. 有色金属,2002,54(2):82 - 87.