

基于 FLAC^{3D} 数值模拟厚大矿体 开采方案与采场稳定性研究

贺永俊¹, 杨珊²

(1. 山西省勘察设计研究院, 山西 太原 030013; 2. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对淮南某厚大铁矿 -500 m 中段采场回采, 应用 FLAC^{3D} 建模并进行开挖模拟. 对不同开采方案中采场稳定性进行研究分析表明: 采场开挖后, 在采场四周角落处应力集中最大, 易产生剪切破坏, 在顶板中央发生位移变形最大, 采场顶板容易垮塌; 采场长宽为 30 m × 30 m 时, 采用两矿房或三矿房同时回采, 采场保持稳定, 最大应力集中系数为 1.5, 矿岩自身强度满足自稳要求; 采场长宽为 40 m × 40 m, 三矿房同时回采时, 由于采空区暴露面积过大, 集中系数达 1.7, 顶板受拉且充填体受压发生剪切破坏, 矿岩不足以维持自稳状态. 在大规模开采条件下, 最终选定采场参数 30 m × 30 m 三矿房同时回采为矿山开采方案.

关键词: 厚大矿体; FLAC^{3D} 模拟; 暴露面积; 采场稳定性

中图分类号: TD851 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2015)01-0008-07

Study of heavy ore body mining project and stope stability based on FLAC^{3D} numerical simulation

He Yongjun¹, Yang Shan²

(1. Survey and Design Institute of Shanxi Province, Taiyuan 030013, China;

2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

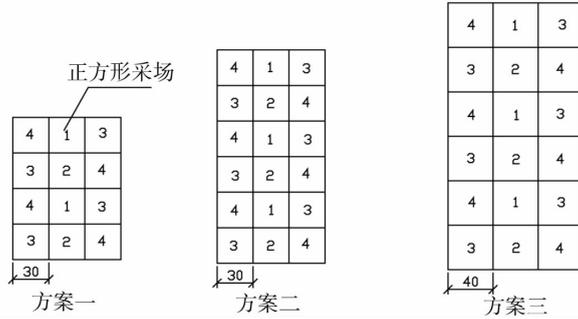
Abstract: In view of the Huainan a heavy iron mine -500 m mining, FLAC^{3D} was applied to build the modeling and simulate the excavation to analysis two kinds of mining scheme of stope stability. It shows that when the stope length to width positioning 30 m × 30 m, stope keep stable with two rooms and three rooms mining at the same time, and the maximum stress concentration factor is 1.5, rock strength meet the stability requirement. When the stope length to width positioning 40 m × 40 m and three stope mining, stress concentration factor is 1.7, the roof and filling body face shear failure under tension and compression because mined out exposed area is too large. In order to improve the mine production capacity, the scheme is selected that two stope structure parameter with 30 m × 30 m and three stope mining as the mining project of mine excavation.

Keywords: heavy ore body; FLAC^{3D} simulation; exposed area; stability of stope

在地下矿山大规模生产的条件下, 采场稳定性研究已成为影响矿山安全回采的重要课题, 在国内外工程实践中, 多采用模拟实验法及经验类比法对采场地压控制进行评价分析, 随着地下采矿岩石力学及数值模拟技术等相关理论研究的发展, 数值模拟在地下矿山采场稳定性分析中得到快速发展和应用^[1-3]. 为此, 针对厚大矿体大规模开采复杂条件下采场稳定性分析, 应用 FLAC^{3D} 数值模拟进行研究, 指导矿山进行

安全合理回采.

淮南某铁矿区主矿体是本矿床中规模最大矿体, 占总金属资源量的 99%, 矿体水平投影为不规则的矩形, 矿体走向宽度均上千米, 平均厚度为 700 m. 矿岩稳固性较好, 由于矿体厚大, 为提高生产能力, 采用阶段空场嗣后充填法开采, 首采中段为 -500 m 中段. 开采方式为: 将矿体沿横向划分若干条形矿柱, 开采时以平行矿柱为单位连续进行, 并逐渐向后退采; 在条形矿柱内划分正方形采场, 中段高度为 50 m; 采场宽度选择有 30 m 与 40 m, 同时回采采场数量分 2 种方案, 即中间条形矿柱为两矿房同时开采, 两侧条形矿柱共四矿房同时开采, 另为中间条形矿柱三矿房同时开采, 两侧条形矿柱六矿房同时开采. 如图 1 所示.



注:图中 1 为第一步开采采场, 2 为第二步开采采场, 依此类推.

图 1 开采方案

为了确定采场结构参数与开采过程中的采场稳定性情况, 研究每步骤回采后采场围岩的应力及塑性区拉应力区状态, 应用 FLAC^{3D}建模进行数值模拟, 对开采过程中采场稳定性进行研究分析. 对 3 种开采方案矿体开挖过程中应力应变变化情况进行分析比较, 确定最终开采方案.

1 数值模型的建立

1.1 确定材料参数

根据现场取样和岩石力学试验结果, 计算中采用 Mohr - Coulomb 屈服准则判断岩体的破坏, 关系如下:

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} - 2C \sqrt{\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}} \quad (1)$$

其中, σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力, C 为凝聚力, φ 为摩擦角.

通过现场勘查和试验, 并综合矿区实际地质条件并应用工程折减法分析, 考虑到岩石力学实验中所用的试件与工程中岩体的差别, 对实验数据需要进行折减. 岩体力学参数的折减方法很多, 利用经验公式确定岩体力学参数是最常用的方法^[4-5]. 也就是确定折减系数 Φ , 使得: $S_R = \Phi \times S_f$, 其中 S_R, S_f 分别为岩石和岩体强度指标. 折减系数如下:

弹性模量: $K_E = 1/4$, 泊松比: $K_\mu = 1.0$, 内摩擦角: $K_\phi = 0.6$, 粘结力: $K_C = 0.6$.

得到矿岩和充填体力学参数, 如表 1 所示.

表 1 岩体和充填体力学参数

项目	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	粘聚力/MPa	摩擦角/(°)	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
矿体	2 590	34.50	3.69	45.2	0.25	3.04	60.00
充填体	2 100	1.25	0.52	38.7	0.19	0.65	2.11

根据中国地质科学院地质力学研究所进行的地应力测量研究报告成果, 在测量深度范围内(孔深 270 ~ 820 m), 最大水平主应力值在 16.48 ~ 32.15 MPa 范围内, 最小水平主应力值在 8.97 ~ 18.96 MPa 范围内; 但随着深度的增加, 该地区的应力结构有所改变, 呈现出垂向应力逐渐占主导作用的趋势特征. 对该孔实测数据进行线性回归分析, 其中最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力均随深度变化而线性增加, 其规律用下述方程描述:

$$\sigma_{hmax} = 15.8 + 0.015H; \quad (2)$$

$$\sigma_{h_{mix}} = 7.97 + 0.014H ; \quad (3)$$

$$\sigma_z = 0.0264H . \quad (4)$$

式中 σ 为应力, MPa.

1.2 模型建立

根据圣维南原理,为了使得模型更逼近实际情况,满足模型边界条件,所建模型应足够大,从而模型其他部位受开挖区域影响较小,因此,选择尺寸应当在是开挖矿体尺寸5倍左右大小^[6-7]. 模型按走向长1200 m,垂直走向600 m,高度700 m,为全矿体模型,开挖方案按图1所示的3种方案进行,即①30 m × 30 m 采场,两矿房同时开挖;②30 m × 30 m 采场,三矿房同时开挖;③40 m × 40 m 采场,三矿房同时开挖. 模型大小与开挖范围如表2所示:

表2 模型特征

模型大小		长度/m	宽度/m	高度/m
		模型大小	1200	600
开挖范围	一	180	90	50
	二	120	90	50
	三	240	120	50

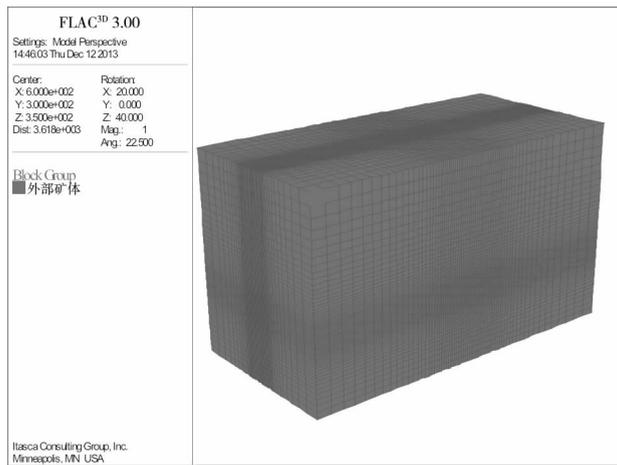


图2 三维计算模型

2 计算结果与分析

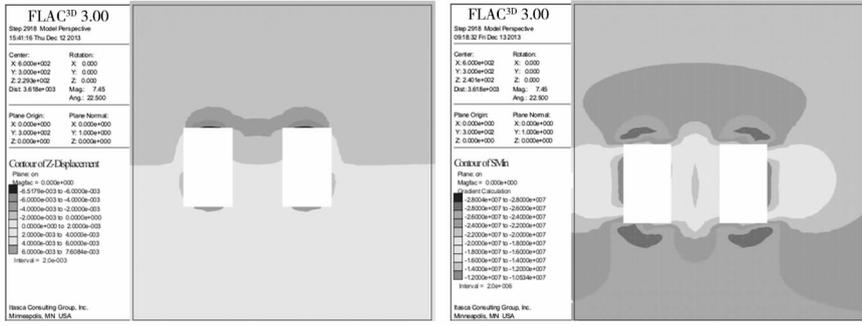
针对以上参数建立的矿体模型,采用FLAC^{3D}对矿体开挖进行数值模拟,计算结果如图3~图5所示,图3~图5表示各方案开挖过程中每步骤竖直位移、最大主应力及最后一步开挖最小主应力与塑性区分布^[8-9].

2.1 方案一位移与主应力变化分析

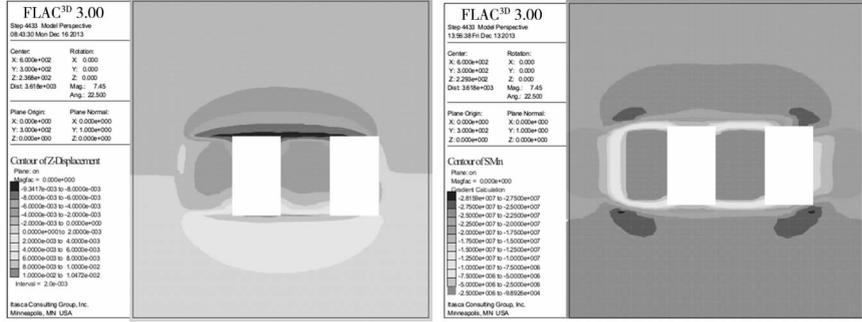
从图3看出,蓝色为应力增大区域,主要分布在顶、底板应力释放区后部;随着开挖步数增加,应力集中与竖直位移不断增大,最大位移发生在顶板中央,到第四步开挖,最大数值位移达到2 cm,到第四步开挖最大主应力集中系数在1.5左右(应力集中系数即为开挖后岩体中某点主应力大小与其未开挖前该点处初始主应力大小之比),采场四角落处应力集中最大,所受最大压应力值为32 MPa;再从第四步图3(e)最小主应力及塑性区图可知,采场两侧在开挖过程中出现应力释放,在塑性区图中,红色区域表示采空区围岩发生过剪切变形,但并未发生破坏^[10-11],说明按方案一进行矿体开挖,采场能够维持自稳.

2.2 方案二位移与主应力变化分析

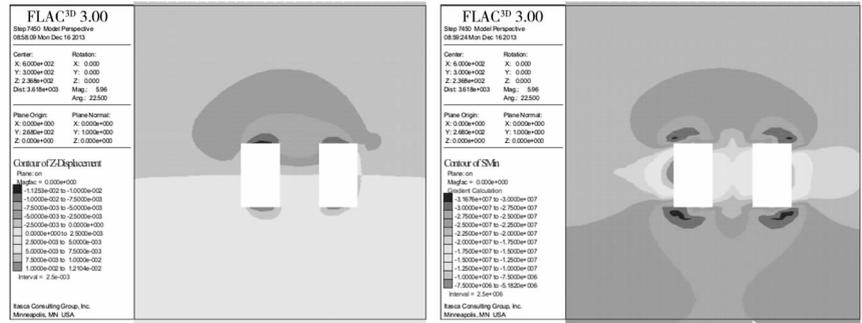
从图4看出,蓝色为应力增大区域,同样也分布在顶、底板应力释放区后部;同方案一相同,随着开挖步数增加,应力集中与竖直位移不断增大,到第四步开挖最大主应力集中系数在1.53左右,采场四角落处应力集中最大,所受最大压应力值为32.2 MPa,说明采空区面积增大后,应力集中比方案一要明显,但是总体上增加不大;再从第四步图4(e)最小主应力及塑性区图可知,采场周围在开挖过程中出现应力释放,如最小主应力图棕色区域所示,塑性区图中表明采场周围出现塑性区,红色区域表示采空区围岩发生过剪切变形,但并未发生破坏,说明按方案三进行矿体开挖,采场同样也能够维持自稳^[12-13].



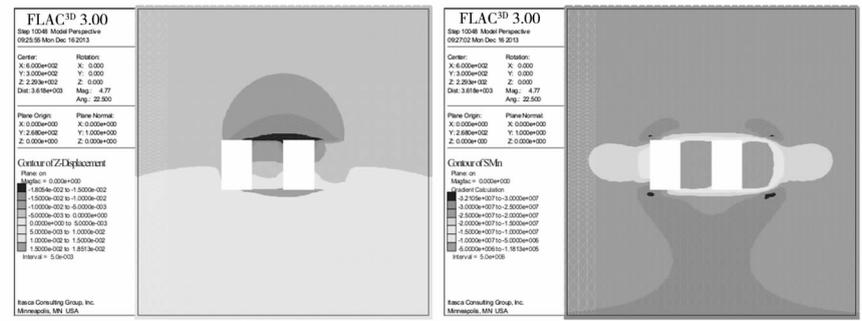
(a) 开挖第一步垂直位移与最大主应力图



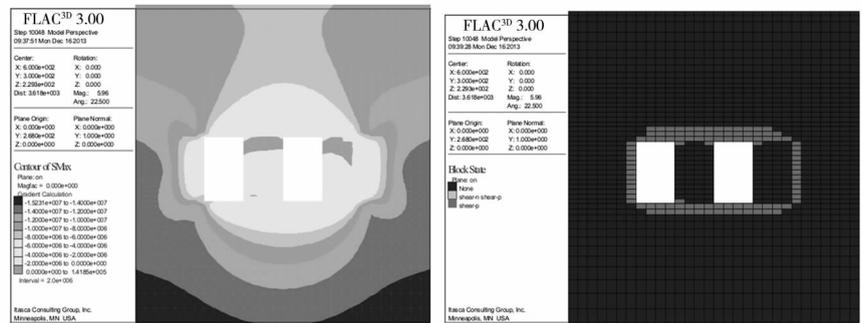
(b) 开挖第二步垂直位移与最大主应力图



(c) 开挖第三步垂直位移与最大主应力图

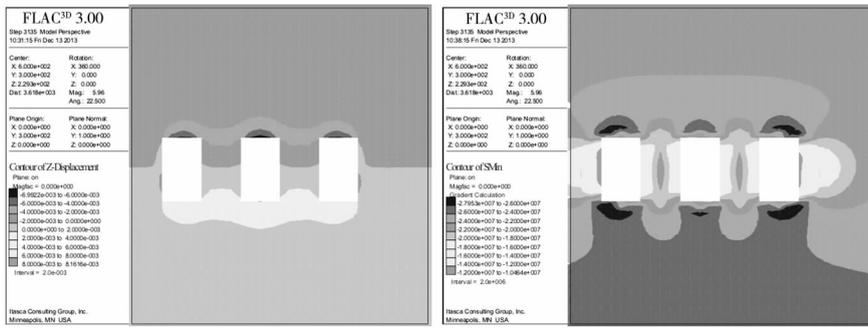


(d) 开挖第四步垂直位移与最大主应力图

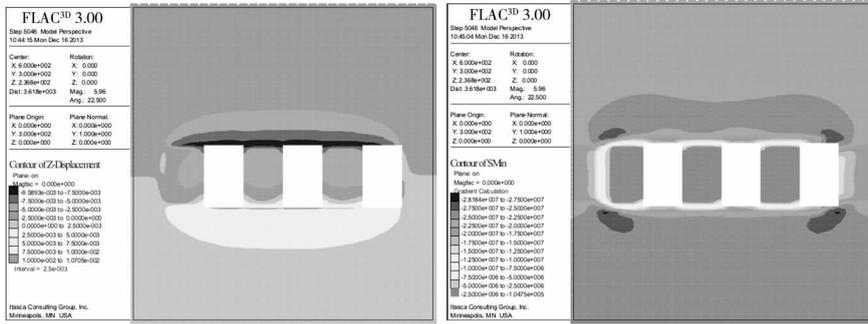


(e) 开挖第四步最小主应力与塑性区图

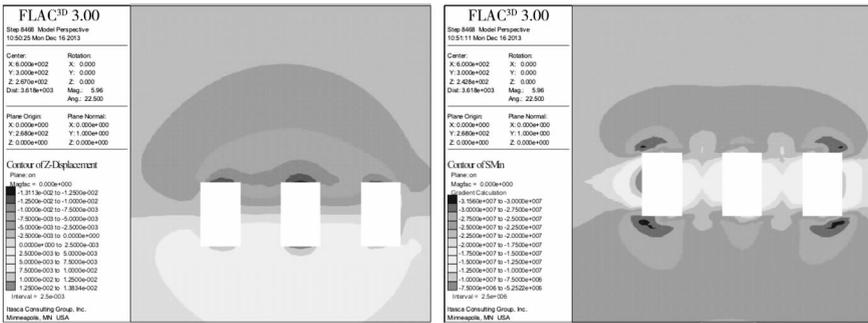
图 3 开采方案每一步骤计算结果



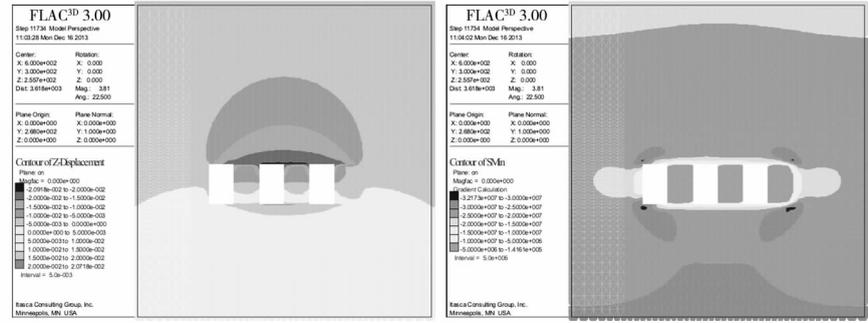
(a) 开挖第一步垂直位移与最大主应力图



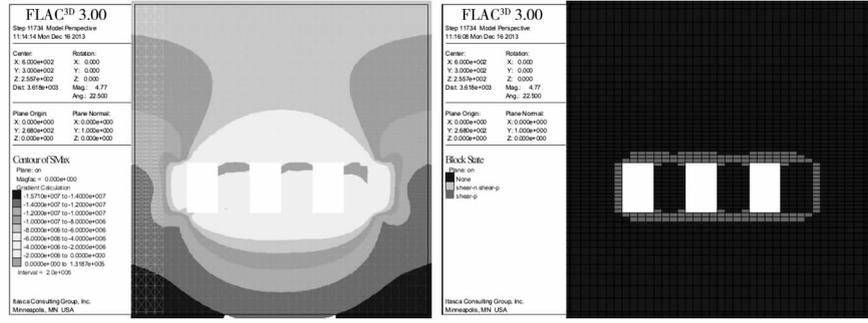
(b) 开挖第二步垂直位移与最大主应力图



(c) 开挖第三步垂直位移与最大主应力图



(d) 开挖第四步垂直位移与最大主应力图

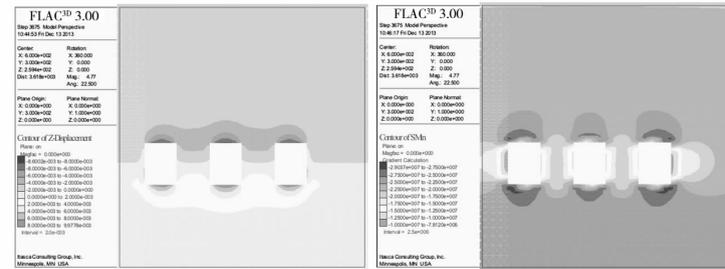


(e) 开挖第四步最小主应力与塑性区图

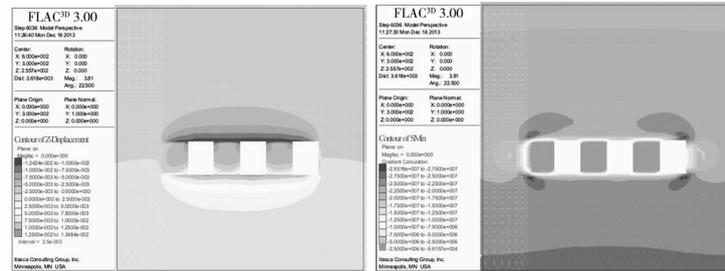
图4 开采方案二每步骤计算结果

2.3 方案三位移与主应力变化分析

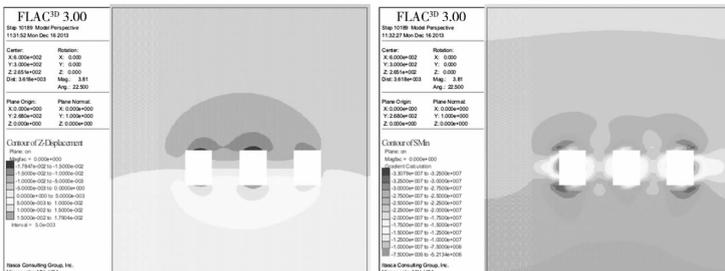
从图 5 看出,方案三应力集中较大,到第四步开挖最大主应力集中系数在 1.7 左右,采场四角落处所受最大压应力值为 34 MPa,说明方案三应力集中比前 2 个开挖方案明显;再从第四步图 5(e)中最小主应力可知,采场顶板出现拉应力,在前 2 个方案中未出现拉应力;第四步图 5(e)中最塑性区显示,采空区周围显现棕色区域,说明围岩正在发生剪切破坏变形^[14-15],而在开挖后采场应力变化过程中,采空区四周围岩出现棕色区域,说明正在发生塑性破坏,因此采用方案三进行矿体开挖,采场不能维持自稳。



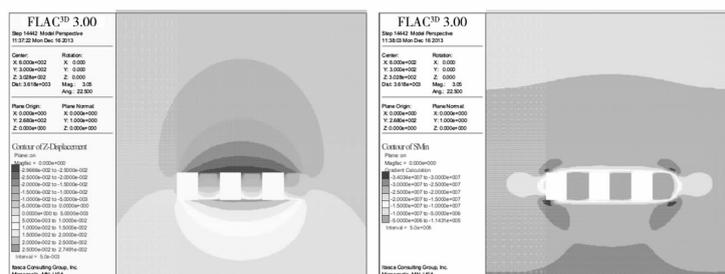
(a) 开挖第一步垂直位移与最大主应力图



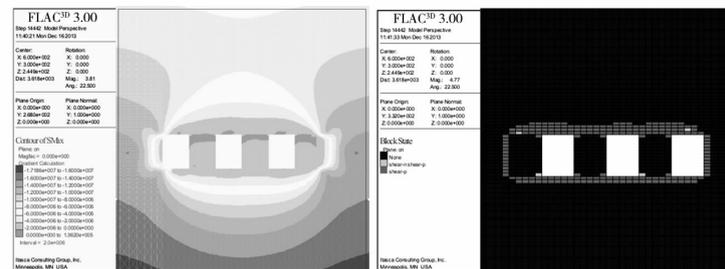
(b) 开挖第二步垂直位移与最大主应力图



(c) 开挖第三步垂直位移与最大主应力图



(d) 开挖第四步垂直位移与最大主应力图



(e) 开挖第四步最小主应力与塑性区图

图 5 开采方案三每步骤计算结果

3 结论

1)采用方案一与方案二进行矿体开挖,采空区四周围岩基本不发生剪切破坏,位移变化在矿岩塑性变形范围内,采场可以维持自稳状态,采场周边出现的最大应力集中系数在1.5左右。

2)采用方案三进行矿体开挖,由于采空区暴露面积过大,主应力集中明显偏大,应力集中系数达到1.7,尤其在采场四周角隅处容易发生剪切破坏,采场稳定性受到影响,顶板及充填体受到拉应力作用,顶板容易发生破坏,而充填体也将失稳破坏。

3)综合以上研究分析,选定方案二为矿体开挖方案,方案一的不足是,开采过于保守,矿山生产能力受到限制,因此为保证采场稳定,同时确保大规模生产,采用方案二进行矿体开采是可行的。

4)文章对厚大矿体进行采空区稳定性研究,提出如下建议:深入进行矿区原岩应力测量与矿区地应力的分布规律研究,指导开采设计与优化开采顺序;为避免大规模低压显现,导致开采危害,应针对性地布置检测网点,重点在采场四周角落处布置检测,及早对采场和采空区稳定性及低压显现规律进行掌控分析,指导矿山安全开采。

基于FLAC^{3D}数值模拟研究,可对矿山开采安全性做出评价,优化采场开采顺序与采场结构参数,确定矿山合理安全的开采方案。

参考文献:

- [1] Itasca Software Comp. Theory and back ground, constitutive model; theory and implementation[P]. User Manual of FLAC^{3D} 2.0, 2002.
- [2] 蔡美峰. 金属矿山采矿设计优化与地压控制——理论与实践[M]. 北京:科学出版社, 2001:133-134.
- [3] 彭文斌. FLAC^{3D}实用教程[M]. 北京:机械工业出版社,2008:14-15.
- [4] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique,1999, 49(6): 835-840.
- [5] 赵尚毅,郑颖人,张玉芳. 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学,2005,26(2):332-36.
- [6] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3):387-403.
- [7] 陈宗基. 应力释放对开挖工程稳定性的重要影响[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(1):1-10.
- [8] Hock E. Practical rock engineering[M]. Rotterdam: A. A; Balkema Publishers, 2000:83-84.
- [9] 杨典森,陈卫忠,杨为民,等. 龙滩地下洞室群围岩稳定性分析[J]. 岩土力学,2004,25(3): 391-395.
- [10] 刘晓明,罗周全,杨承祥,等. 基于实测的采空区稳定性数值模拟分析[J]. 岩土力学,2007, 28(增1): 521-526.
- [11] 王新民,王长军,张钦礼,等. 基于ANSYS程序下的采场稳定性分析[J]. 金属矿山, 2008(8):17-25.
- [12] 高谦. 地下大跨度采场围岩突变失稳风险预测[J]. 岩土工程学报,2000,22(5):523-527.
- [13] Huber D, Vandapel N. Automatic three - dimensional underground mine mapping[J]. International Journal of Robotics Research, 2006, 25(1):7-17.
- [14] John D L. Cavity monitoring system and slope analysis[C]//Proceedings of Mass Mine Chile. santiago:[s. n.], 2004:56-62.
- [15] 李仲奎,戴荣,姜逸明. FLAC^{3D}分析中的初始应力场生成及在大型地下洞室群计算中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 24(增):2387-2392.