

基于 ANSYS 的 二步采场分段开挖过程模拟及稳定性分析

李启月¹, 陈亮¹, 谭勇², 刘冰川¹

1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083
2. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075

摘要 为确保高应力大阶段二步采场高效安全回采, 采用 ANSYS 对二步采场分段开挖过程进行稳定性分析, 得到了各分段采场顶板和充填体的应力分布规律。结果表明, 采场顶板处产生的最大拉应力 (0.21~0.36MPa) 大于矿体的抗拉强度值 (0.17MPa); 充填体距离采场顶板 1m 位置处有最大压力 (0.90~2.00MPa), 接近其抗压强度值 (2.00MPa); 随着开采分段向上推进, 采场顶板的拉应力和充填体内的压应力均有降低趋势。针对数值模拟中二步采场存在的安全隐患, 提出采用预护顶中深孔下向凿岩分段充填法回采二步矿房, 预护顶采用预应力树脂锚杆+钢带(金属网)+喷浆联合支护方式, 并根据数值模拟中获得的松动圈半径确定了支护参数。将支护方案应用到工程试验, 试验采场安全效果较好。

关键词 二步采场; 稳定性分析; 数值模拟; 支护参数确定

中图分类号 TD355

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.22.007

Simulation of the Second-pillar Mining Stope Excavation and Its Stability Analysis Based on ANSYS

LI Qiyue¹, CHEN Liang¹, TAN Yong², LIU Bingchuan¹

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China

Abstract In order to guarantee the safety and mining efficiency of the high-stage second-step stopes in the high-stress situation, finite element program ANSYS is used to analyze the stability of the stopes for section-by-section excavation. And the stress and strain distribution of roof and filling body is obtained from the simulation. The result shows that the maximum tensile stress (0.21—0.39MPa), located at the roofs, is more than tensile strength (0.17MPa) of ores. The maximum pressure (0.90—2.00MPa), located at the filling body which is one meter away from the roof, approximately reach to the limitation of its pressure strength (2.00MPa). Tensile stress at roof and pressure stress of filling body with mining upwards present a declining trend. According to the hidden danger of the second-step stopes presented by numerical simulation, it is put forward to adopt medium-length hole downward sublevel drill and fill stoping with pre-protecting roof. And the combined supporting method that combines pre-stressed resin bolt, steel band (metal net) and gunite, is used to pre-protect the roof. Support parameters are adopted based on the radius of loosening zone, which is confirmed through the numerical simulations. Effective support measures is put forward and applied to engineering tests, and then its result confirms the high safety and mining efficiency of the stope.

Keywords second-step pillar; stability analysis; numerical simulation; determination of support parameters

0 引言

在深部金属矿床开采中, 不留矿柱的两步开采充填采矿法作为提高资源回采和控制地压管理的有效途径, 其开采安全问题是制约矿山发展的关键因素。特别是在高应力大阶段采场中, 开挖对采场的稳定性影响大, 每步开挖都会引起应

力积聚和释放, 造成采场围岩和充填体变形或破坏。在二步采场中, 采场破坏的表现形式主要为两种, 其一为顶板冒顶, 占巷道和采场破坏量的 70%; 其二为充填片帮和失稳。由此可见, 顶板和充填体稳定性是二步矿房安全回采的主要影响因素。因此, 对采场顶板和充填体进行稳定性研究显得尤为

收稿日期: 2013-03-18; 修回日期: 2013-04-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2010CB732004); 国家自然科学基金项目 (50934006, 10872218)

作者简介: 李启月, 副教授, 研究方向为采矿方法与工程爆破, 电子信箱: qyli@126.com

重要^[1,2]。

目前,采场稳定性分析研究可分为经验法^[2,3],可靠度理论分析^[2,4],数学模型解析法^[5-7]及数值模拟分析法。由于存在充填体,二步采场的结构及受力复杂,如果仅仅凭借经验、可靠度理论或通过模型法来分析采场的稳定性,不能保证二步采场回采安全。随着岩石力学理论以及有限元分析软件技术的发展,运用数值模拟分析采场稳定性已经是一种行之有效的方法。因有限元 ANSYS 软件具有多场耦合分析功能,能有效模拟实际岩土工程的分期施工过程,在国内外岩土工程中得到广泛应用。大量研究指出,通过对不同的采场结构参数和不同的回采顺序的模型进行数值模拟,分析模型中的应力应变变化规律,最终得到采场最优结构参数和回采顺序^[8-10]。

然而,目前国内在该领域主要是研究同一水平面上,随着开采推进采场稳定性及应力应变的变化规律,而对垂直方向上二步采场分段开挖过程稳定性模拟及应力应变的变化规律研究的文献还不常见。因此,本文以新城金矿 V# 矿体-580 中段为背景,运用 ANSYS 对二步采场分段开挖过程进行模拟,对保障矿山开采的安全、经济和高效具有重要的现实意义。

1 工程概况

新城金矿 V# 矿体破碎厚度大、走向短、矿体下盘稳定性一般, f 系数为 6~8,允许暴露面积较小。由于矿体埋藏深且矿岩异常破碎,所以采用两步充填开采方式。采场划分一步矿房与二步矿房,一步、二步矿房交错布置,在-580~-540m 中段,采取采场垂直矿体走向布置的回采方式,采用机械化上向水平分层充填采矿法回采一步矿房。为了提高回采效率和强度,现拟采用中深孔上向凿岩分段充填采矿法回采二步矿房。中深孔上向凿岩分段充填采矿法是把-580~-540m 中段分为 5 个分段(-580、-570、-560、-550、-540 分段),由下往上

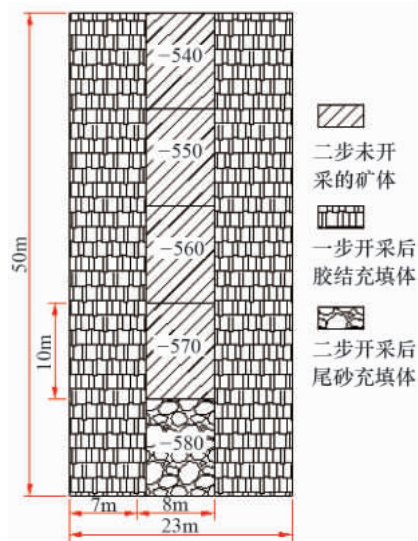


图 1 分段开采结构

Fig. 1 Structure diagram of Sublevel mining

分段回采,采用尾砂充填采空区,分段高 10m,宽 7m,长 60m,如图 1 所示。虽然中深孔采矿技术确实能解决矿山生产能力、回采效率和回采强度等技术问题,但是这些方法与技术若在厚大破碎金矿体中应用,必须先解决回采的安全性问题。

2 数值模拟及结果分析

2.1 数值模型

开采范围取为长 23m (1 个二步采场和 2 个一步采场)、高 50m (5 个分段)、宽 60m,整个计算模型取 3~5 倍的开采范围(69m×150m×60m)。建立以 x 方向为矿体走向(最大水平主应力方向), z 方向为矿体水平厚度方向(最小水平主应力方向), y 方向为矿体垂直方向(垂直主应力方向)的计算模型,如图 2 所示。

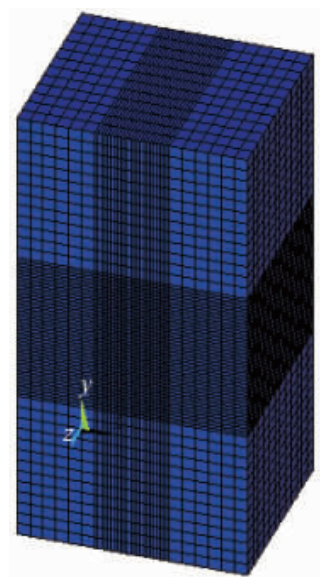


图 2 模型网格划分

Fig. 2 Grid of the model

选用支持输出初始应力文件的单元类型 SOLID45,整个模型共有 31920 个单元,36036 个节点。

2.2 计算参数与屈服准则

岩石力学抗剪试验采用英国 INSTRON 公司的电液伺服材料控制机 1346 型,抗压试验和劈裂拉伸试验采用英国 INSTRON 公司的电液伺服万能试验机 1342 型。测试矿体样本为黄铁绢英岩花岗质碎裂岩,取样地点在 580 中段,胶结充填样本采用灰砂质量比为 1:10、浓度为 72%~74%并养护一个月后的尾砂。新城金矿实测折算的岩石力学参数如表 1 所示。

假设矿岩为理想弹塑性体,考虑三维主应力对土抗剪强度的影响,以及内摩擦角和黏聚力引起的屈服和体积膨胀作用,采用 Drucker-Prager(DP)屈服准则判断岩体的破坏。

表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock mass

名称	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	重度 $\gamma/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	抗压强度 σ_c/MPa	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	抗拉强度 σ_t/MPa
矿体	6792	0.251	2587	23.58	1.32	45.0	0.17
胶结充填	231	0.190	2020	2.00	0.40	38.7	0.07
尾砂充填	120	0.350	1800	—	0.28	50.0	—

2.3 施加边界约束及荷载

针对新城金矿井下实际开采情况,计算模型中的边界条件为:模型底部施加固定约束, x,z 方向均施加水平法向约束。根据新城金矿深部原岩地应力实测分布规律,按式(2)给模型施加梯形原岩地应力。假设充填体未充分接顶,即充填体 $y=50\text{m}$ 处无施加应力。整个计算模型不考虑爆破扰动及地下水活动影响。

$$\begin{cases} \sigma_x = -0.02 + 0.0567H \\ \sigma_z = -0.14 + 0.0301H \\ \sigma_y = 0.01 + 0.0273H \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\sigma_x, \sigma_z, \sigma_y$ 分别为最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力,MPa; H 为埋深,m。

2.4 开挖过程实现

结合新城金矿二步回采的特点,需对二步采场开采每个分段(-580、-570、-560、-550、-540分段)进行模拟。为了正确模拟二步采场开采过程,按如下步骤进行分段之间的回采模拟:

- (1) 创建材料模型,进行网格划分,施加构造应力及重力场;
- (2) 进行分析求解,用 ISTRRESS 命令输出初始应力文件;
- (3) 重复步骤 1 创建一个相同的材料模型,用 ISFILE 命令输入初始应力文件,进行分析求解,获“只有应力而无应变”的初始模型;
- (4) EKILL -580 分段单元,进行模型计算,确定计算结果收敛;
- (5) 查看后处理中位移和应力图,根据位移和应力的对二步采场进行稳定性分析;
- (6) EALIVE -580 分段单元,改-580 分段材料参数为尾砂充填材料参数;
- (7) 重复步骤 4、5、6 依次实现开采-570、-560、-550 和-540 分段矿体。

2.5 数值模拟结果及分析

依据数值模拟结果图,分别从应力、位移、塑性区 3 个方面分析采场的稳定性。

(1) 图 3(a)~(e)依次为-580、-570、-560、-550、-540 分段开采过程的数值模拟最大主应力云图。图 4 是取采场顶板距一帮充填体依次间隔为 1m 远节点的最大主应力随开采分段推进的变化规律(共 8 个点),图 5 是取充填体距顶板依次间隔为 1m 远的点的最小主应力随开采分段变化规律(共 11

点)。由图 3~图 5 得出:①从数值模拟结果看,回采二步矿房时采场的应力重分布,在采场拐角处有应力集中,采场顶板受拉,底板有鼓起,充填体受压应力。②最大拉应力发生在采场顶板处,受拉厚度约为 1m,即采场顶板松动圈的半径 r 为 1m;各分段的最大拉应力值在 0.21~0.36MPa 之间,大于新城金矿矿体的抗拉强度值(0.17MPa)。③最大压应力发生在距离采场顶板 1m 位置的充填体内,各分段最大压应力值在 0.9~2.0MPa 之间,非常接近新城金矿充填体抗压强度值(2MPa)。④随着开采分段向上推进,顶板处各节点的拉应力均有降低,这是由于分段开采扰动影响,积聚在岩体中的应力逐步得到释放。⑤各分段中顶板中心节点处的拉应力要比偏离顶板两端 1~2m 处节点的拉应力值小,所以最易被拉断位置不是中心位置,而是偏离两端 1~2m 的顶板位置。⑥随着分段回采推进,充填体与二步矿体的摩擦作用面积依次减小,充填体所受的压应力也依次减小,模型中假设充填体未充分接顶,所以-540 分段中的充填体只受自身重力的影响。

(2) 在顶底板的位移状态中,垂直位移要比水平位移重要,因为过量的垂直位移将导致顶板冒落。在充填体的位移状态中,由于在分段二步采空区内充填体的暴露面积很大,过大的水平位移将导致充填体片帮,所以在位移分析中,重点分析采场顶板底板的垂直位移和充填体的水平位移。如图 6 所示,采场顶板 y 方向有一定的位移,累积位移达到 8cm;底板位移是底部有鼓起位移,为 3.8cm;充填体 x 方向最大位移值为 4.8cm。根据新金矿回采安全经验值,采场顶底板和充填体的位移量不会影响回采安全。

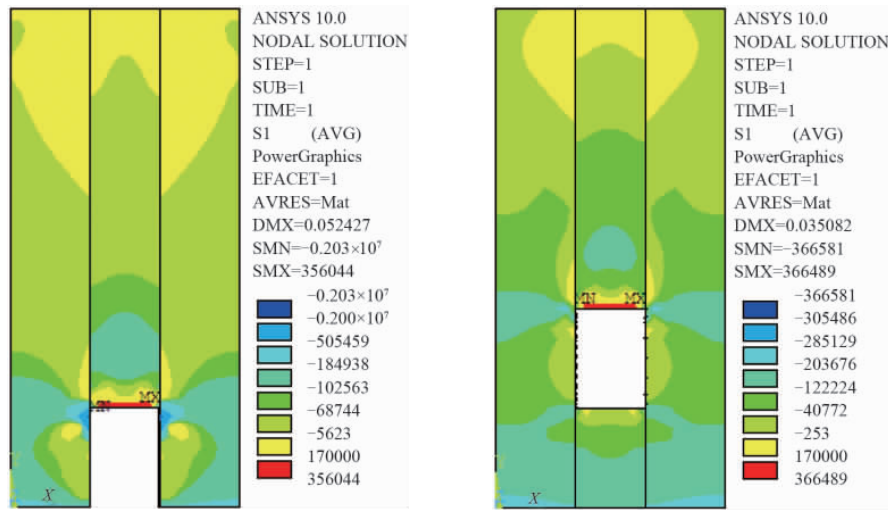
(3) 岩体进入塑性状态后,其强度和承载能力将大大降低。因此,塑性区的大小是判断其稳定性的一个重要标志。图 7 所示为-570 分段开挖塑性区域分布图,从中可以看出,除在采场顶板端部塑性区稍大外,其他地方几乎不存在塑性区。

2.6 措施

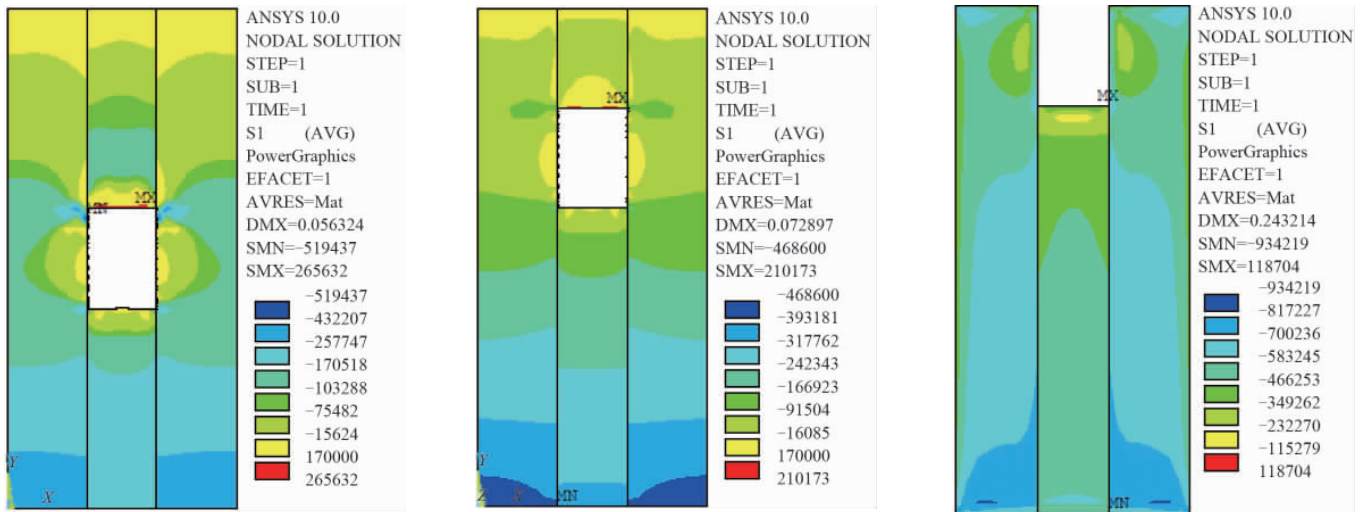
结合数值模拟结果,对试验采场提出以下安全措施。

(1) 针对数值模拟中采场顶板出现的拉应力值大于矿体的抗拉强度值,回采二步矿房采用预控顶中深孔下向凿岩分段充填采矿法。综合考察新城金矿矿岩的地质条件,为了确保回采工作高效经济安全,采用预应力树脂锚杆+钢带(金属网)+喷浆联合支护方式,并辅以木立柱临时技术。

(2) 针对数值模拟中充填体受到的压力临近其抗压强度值,且充填体距离顶板 1m 位置处最易产生片帮破坏,将偏离顶板 3m 内的充填体采用梅花状布置的锚杆支护。



(a) -580 分段 (b) -570 分段
(a) -580 sublevel (b) -570 sublevel



(c) -560 分段 (d) -550 分段 (f) -540 分段
(c) -560 sublevel (d) -550 sublevel (f) -540 sublevel

图 3 各分段最大主应力云图(单位:Pa)

Fig. 3 Distribution of maximum principal stress with different sublevel (unit: Pa)

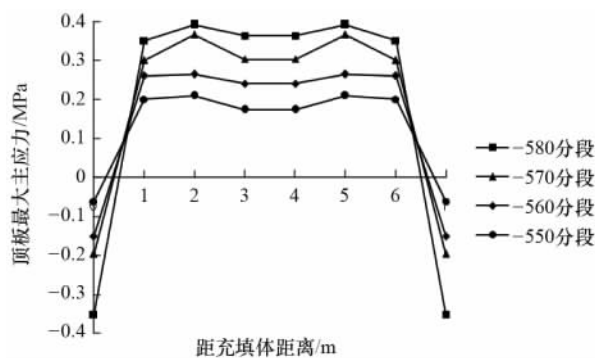


图 4 不同开采分段中顶板最大主应力分布规律

Fig. 4 Regularities of distribution of maximum principal stress in different sublevel stope roofs

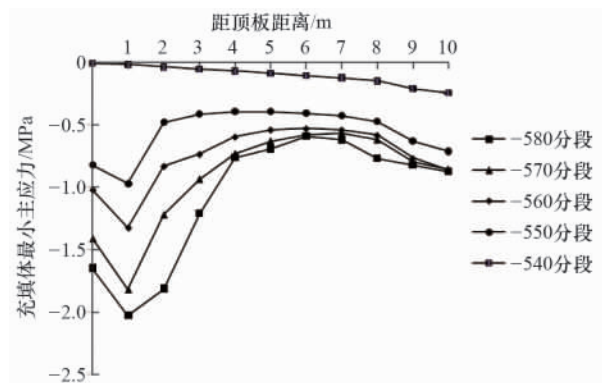


图 5 不同开采分段中充填体最小主应力分布规律

Fig. 5 Regularities of distribution of minimum principal stress in different sublevel stope roofs

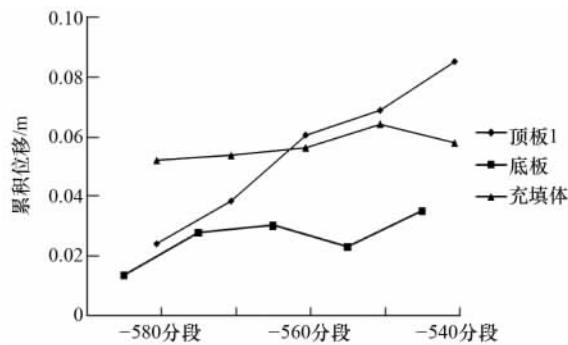
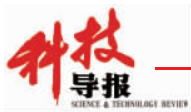


图 6 各分段中最大位移量
Fig. 6 Maximum displacement of different sublevel

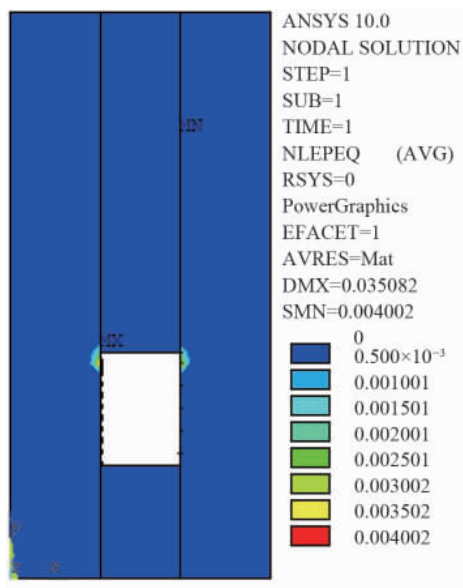


图 7 -570 分段塑性区 (单位:Pa)
Fig. 7 Plastic zone of the -570 sublevel (unit: Pa)

(3) 在矿房回采过程中,应采用预裂爆破控制矿房回采边界,控制炸药单耗,尽量减小爆破震动对充填体稳定性的影响。采用全分段预裂挤压一次爆破强化开采回采二步矿房,实行强采强出强充开采,以尽量缩短充填体暴露面积和暴露时间。

(4) 采用巷道变形收敛仪和锚杆测力计监测锚杆轴力,及时加强对数值模拟中敏感点进行现场监测,发现安全隐患,及时采取有效支护。

3 支护参数确定

考虑到采场支护使用期限较短,顶板采用喷锚支护,运用组合梁理论计算锚杆参数较为合适。锚杆参数按式(2)~(4)确定。

锚杆长度 l

$$l \geq l_1 + t + l_2 \quad (2)$$

锚杆间距 D

$$D \leq 1.63m \sqrt{\frac{\eta \sigma_{t1}}{n \gamma m}} \quad (3)$$

锚杆直径 d

$$d \geq 2D \sqrt{\frac{q_a}{\pi [\sigma_d]}} \quad (4)$$

式中, l_1 为锚杆外露长度,取0.1m; t 为有效锚杆长度,m; l_2 为顶锚端长度,取0.4m; m 为顶板表层岩体厚度,m; η 为表层岩体抗拉强度折减系数,取0.4; σ_{t1} 为顶板表层岩体的抗拉强度,Pa; n 为安全系数,10; γ 为岩体重量,N/m³; q_a 为单根锚杆单位面积内所受的荷载集度,MPa; $[\sigma_d]$ 为锚杆许用强度,MPa。

由数值模拟确定采场顶板松动圈半径 r 为 1m, 取 $t=r=1$ m。经现场取样测量获得 $m=20$ mm, $\sigma_{t1}=0.17$ MPa, $\gamma=2587$ N/m³, $q_a=0.06$ MPa, $[\sigma_d]=340$ MPa。代入式(2)~(4)求得 $l \geq 1.5$ m,取 $l=2.4$ m; $D \leq 1.4$ m,取 $D=1.2$ m; $d \geq 18$ mm,取 $d=22$ mm。

试验地点在-580m分段58851采场,采用预控顶中深孔下向凿岩分段充填采矿法,生产效率高,贫化损失率低,生产成本低,解决了该矿深部V#厚大破碎低品位矿体的采矿方法难题。采场预控顶采用预应力树脂锚杆+钢带(金属网)+喷浆联合支护方式,支护网度为:间距×排距=1.2m×1.2m,选用直径为22mm、长度为2.4m的螺纹钢树脂锚杆。试验采场顶板和充填体支护效果较好,如图8所示。



图 8 支护效果
Fig. 8 Drawing of support effect

4 结论

运用 ANSYS 对采场稳定性进行分析是一种直观高效简便的分析方法,可通过有效支护措施处理模拟中发现的安全隐患。对新城金矿 V# 矿体-580 分段的二步采场进行稳定性分析,得到以下结论。

(1) 各分段的最大拉应力值在 0.21~0.36MPa 之间,大于新城金矿矿体的抗拉强度值 (0.17MPa)。最大压应力发生在距离采场顶板 1m 位置的充填体内,各分段最大压应力值在 0.9~2.0MPa 之间,非常接近新城金矿充填体抗压强度值 (2MPa)。所以开-580 分段的二步采场时,应加强采场顶板及充填体支护。



(2) 随着开采分段向上推进,采场顶板处的拉应力均有降低,这是由于随着分段依次开采扰动影响,积聚在岩体中的应力逐步得到释放。充填体与二步矿体的摩擦作用面积随着分段回采依次减小,充填体所受的压应力也依次减小。

(3) 顶板松动圈半径约为 1m,顶板偏离两端 1~2m 位置处最易在上覆岩土压力作用下产生断裂破坏。对此,提出采用预护顶中深孔下向凿岩分段充填采矿业回采二步矿房,采用全分段预裂挤压一次爆破强化开采,预护顶采用预应力树脂锚杆+钢带(金属网)+喷浆联合支护方式,并根据松动圈半径确定支护参数。

参考文献 (References)

[1] 刘建伟, 刘泉声, 杨战标, 等. 平顶山矿区深部大规模松软围岩巷道支护技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 3905-3910.
Liu Jianwei, Liu Quansheng, Yang Zhanbiao, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 3905-3910.

[2] 周科平, 朱和玲, 高峰. 采矿环境再造地下人工结构稳定性综合方法研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1429-1436.
Zhao Keping, Zhu Heling, Gao Feng. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1429-1436.

[3] 蔡嗣经. 矿山充填力学基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
Cai Sijing. Mechanics basis of mine filling [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.

[4] 董蕾. 采动结构参数优化设计及可靠度分析[D]. 湖南: 中南大学, 2010.

Dong Lie. Study on optimum design of stope structure parameters and reliability analysis[D]. Hunan: Central South University, 2010.

[5] 赵国彦, 卢俊华, 刘志祥. 房柱交替上升式采矿工艺时空变换力学分析[J]. 矿冶工程, 2012, 32(1): 1-8.
Zhao Cuoyan, Lu Junhua, Liu Zhixiang. Mining and Metallurgical Engineering, 2012, 32(1): 1-8.

[6] Barzanti L, Gaspari M, Saletti D. Modeling decision making in fund raising management by a fuzzy knowledge system[J]. Expert Systems with Application, 2009, 36(5): 9466-9468.

[7] 张子新, 廖一蕾. 基于块体理论赤平解析法的地下水封油库围岩稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1339-1347.
Zhang Zixin, Liao Yilei. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1339-1347.

[8] 刘钦, 刘志祥, 刘爱华, 等. 金矿采场结构参数混沌优化 [J]. 采矿与安全工程学报, 2010, 27(4): 548-552.
Liu Qin, Liu Zhixiang, Liu Aihua, et al. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4): 548-552.

[9] 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): 17-20.
Wang Xinmin, Wang Changjun, Zhang Qinli, et al. Metal Mine, 2008(8): 17-20.

[10] 秦健春, 王新民, 骆小芳, 等. 充填法两步回采采场结构参数优化[J]. 矿冶工程, 2010, 32(4): 1-4.
Qin Jianchun, Wang Xinmin, Luo Xiaofang, et al. Mining and Metallurgical Engineering, 2010, 32(4): 1-4.

(责任编辑 吴晓丽)

·学术动态·



第 64 届国际宇航大会新闻通气会在京召开

2013 年 7 月 24 日,第 64 届国际宇航大会 (IAC) 新闻通气会在北京召开。第 64 届国际宇航大会将于 2013 年 9 月 23—27 日在北京召开,大会主题是推动航天发展,造福人类社会 (Promoting Space Development for the Benefits of Mankind)。中国宇航学会《太空探索》杂志社社长杨建主持会议。来自中央电视台、人民日报、新华社、中新社等多家媒体记者参加会议。

中国宇航学会副理事长兼秘书长杨俊华介绍了第 64 届国际宇航大会的有关情况。本届大会将召开航天局长全体会议、中国航天发展及展望、工业界专场、女性航天五十年、监测干旱和沙漠化、空间太阳能全球进展与机遇、国际创新在促进人类太空探索方面发挥的作用等 7 场全体会议,举办涵盖空间科学与探测、空间应用与操作、空间技术、空间基础设施、空间与社会等领域共计 170 多个技术分会,举行国际空间站的前 10 个研究成果、北斗卫星导航系统等两场亮点报告会,同时开展 2 场最新进展报告会。此外,第 64 届国际宇航大会期间,还将举办一系列附加会议,一系列社会活动与科普活动包括国际空间周、太空画展等,以及面向青年的专题活动。据统计,大会期间将举办各项活动共计 300 场左右。截至 2013 年 7 月初,第 64 届国际宇航大会已有中、美、俄等国的 1500 多代表注册,来自 24 个国家的 60 多家航天企业和机构报名参展。大会共收到 3675 篇论文,创历史最高。

详情见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35548/n38635/14896651.html>。

