

基于采矿环境再造的再构空间结构稳定性分析

胡建华^{1,2}, 周科平^{1,2}, 刘俊³, 董国庆³

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 湖南省深部资源开发与灾害控制重点实验室, 湖南长沙 410083; 3. 新疆喀拉通克铜镍矿, 新疆富蕴 836107)

摘要: 软破矿体高效安全开采是一个现代采矿技术难题。基于采矿施工过程力学、结构力学理论基础, 提出了采矿环境再造的新采矿技术与理论, 即利用钢筋混凝土实现采矿空间结构再构, 并以再构空间环境开展采矿作业。以 Ansys 软件为工具, 对采矿环境的空间再构的结构进行数值模拟试验, 分析其应力、变形和混凝土的裂隙演化状态。在采空区未充填和充填两种模式下, 再构空间结构的最大垂直位移分别是 0.30 m 和 0.14 m, 而最大的拉应力达到 3.8 MPa, 最大压应力达到 42.2 MPa。而采矿过程中, 未充填的人工再构顶板结构混凝土中存在大量的二维裂隙, 并且在顶板中心位置存在部分三维裂隙发育。结果表明, 在进行采矿环境再构的构筑物, 能够承受采动过程中的应力转移, 但由于裂隙的存在, 顶板需要采用合理的锚支补强和空区充填技术, 强化再构顶板构筑物的安全稳定性。

关键词: 采矿环境再造; 再构空间; 有限元; 稳定性

中图分类号: TD803

文献标识码: A

Study on Stability Structural of Re-constructed Space based on Reconstructed Mining Environment

HU Jian-hua^{1,2}, ZHOU Ke-ping^{1,2}, LIU Jun³, DONG Guo-qing³

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Key Laboratory of Deep Mining & Disaster Control in Hunan Province, Changsha, Hunan 410083, China;

3. Kalatongke Copper and Nickel Mine, Fuyun, Xijiang 836107, China)

Abstract: It is a difficult technology problem to safety and efficient mining of soften and crush ore. The technology and theories of reconstruct mining environment are proposed, based on the principle of the construction process mechanics of mine, structure mechanics et al. To the mine, all mining engineering were constructed under the re-construct spaces

收稿日期: 2008-10-23

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAB02A02); 国家自然科学基金资助项目(50490274); 中南大学理科发展基金资助项目(07SDF10)。

作者简介: 胡建华(1975-), 男, 湖南衡南人, 中南大学副教授, 博士后。主要研究方向: 特殊岩土工程稳定性与高效安全采矿技术。

based on the reconstruct mining environment. In order to study the stability of the re - construct spaces, the stress, distortions and cracks of the re - construction were analyzed by ANSYS. To distortion, the maximal vertical displacements are 30 and 14 cm under respective mode of un - filling and filling. The maximal value of tensile stress is 3.8 MPa, compressive stress is 42.2 MPa. After mining, the 2 - D cracks are discovered at the bottom of the re - construct roof, and the 3 - D cracks are discovered in the middle of the re - construct roof, too. The numerical simulated results indicate that the re - constructed spaces are safe and stable during mining, the strength of re - constructed spaces can bear the transfer of mining stress, but because of the cracks, the anchor support and filling technology are used to reinforce the stability.

Key words: reconstruct mining environment; re - construct space; FEM; stability

0 前言

矿业是人类古老行业之一,然而采矿过程所导致的环境污染与破坏以及受限空间的不可选择性形成的采矿安全稳定性问题.从采矿科学的本质属性和矿山环境保护与环境修复的理念出发,提出了采矿环境再造的科学命题.采矿环境再造基本含义主要体现在:以矿床赋存地质环境为建筑结构空间环境和边界条件,通过一定的采矿与岩土工程技术手段,改造矿体赋存的地质环境,再构采矿空间,改善矿床开采的技术条件,以满足安全高效采矿的需要.同时,减少采矿过程对环境的负效应,采取积极措施修复矿山的生态环境,是由过去的采矿被动环境改造向主动积极的采矿环境再造的发展^[1-3].然而,在地质受限环境下,这种人工再构空间的稳定性成为采矿环境再造的关键^[4-5].因此,必须对受限空间下的采矿环境再构的结构进行稳定性分析^[6].

1 稳定性分析方法

1.1 屈服准则

模拟的采矿环境再造结构中,矿岩、混凝土材料都属于颗粒状材料,此类材料受压屈服强度远大于受拉屈服强度,且材料受剪时,颗粒会膨胀,一般采用 Druker - Prager 屈服准则,其塑性行为被假定为理想弹塑性,采用 DP 材料模型.

1.2 裂隙行为模拟

混凝土材料是一种抗压能力远大于抗拉能力的非均匀准脆性材料,在受力状态下出现拉裂和压溃现象.对于混凝土的开裂模拟,通过修正应力 - 应变关系,引入垂直于裂缝表面方向的一个缺陷平面在某个积分点上出现了裂缝^[7].当裂缝张开时,后继荷载产生了在裂缝表面的滑动或剪切时,引入

一个剪切力传递系数 β_t 来模拟剪切力的损失.

2 有限元分析

2.1 工程概况

喀拉通克铜镍矿富矿带为碎裂结构,围岩由橄榄辉岩、辉绿长岩和苏长岩组成.富矿岩体整体强度低,自稳时间短,特别是上盘直接裂隙充水,更加恶化了其工程地质条件.矿床工程地质条件属中等到复杂型之间,构造破碎蚀变带对工程稳定性影响很大,特别是 4 条Ⅲ级断裂面内含较厚的软弱夹层,直接制约富矿开采过程中采矿工程的稳定性.并与Ⅳ级结构面组合切割,造成采场以及巷道冒顶,片帮,富矿岩组在下盘与特富矿接触处,遇水膨胀.同时受特富矿开采影响,岩体的完整性破坏,所受地压更为集中.

2.2 有限元模型

喀拉通克矿体为急倾斜矿体,本报告中的采矿环境再造中的结构模型以 90° 倾角为例,建立采矿环境再造的计算结构模型.开采的矿体厚度为 20 m,在矿体的周边为围岩.沿矿体走向方向为 x 方向,水平垂直矿体方向为 y 方向,铅直方向为 z 方向.计算范围为 186 m × 80 m × 240 m,考虑模型的对称性,在 y 方向上取一半,即 40 m (见图 1).在 $z = 240$ m 的表面上承受 8 MPa 的压应力.人工再构空间结构的人工假顶中,在 x 和 y 方向布置了钢筋,其体积配筋率总计为 2%.在每一个矿块中,设置的尺寸为垂直方向为一个采矿中段,即在垂直高度上为 60 m,沿矿体走向上的尺寸为 30 m,每个矿块的厚度为 20 m,模型考虑为理想的结构模型,假定每次回采在垂直高度方向上崩矿 6 m,在最后的 12 m 中,形成一次强度爆破崩矿.因此,模拟共分为 9 步采矿步序完成.第一次模拟初始应力场.

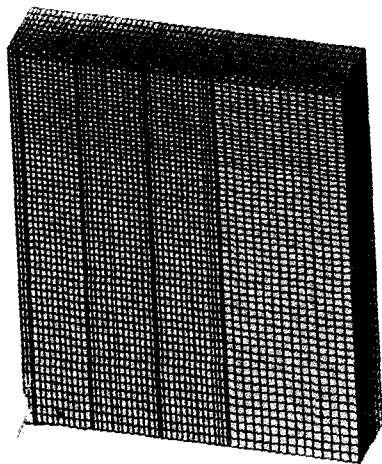


图1 采矿环境再构空间有限元计算结构模型图
Fig.1 FEM model of re - construct space
based on reconstruct mining environment

约束条件为在 $z=0$ 平面上固定所有约束,在 $y=-40$ 平面上固定 x,y 向约束,在 $y=0$ 平面上为对称约束,在 $x=0$ 且 $z=0$ 与 180 之间为 x 方向约束.

2.3 计算参数

根据矿山的生产特点,以及矿岩性质,计算选用的各种材料的参数如下表1.再构空间结构的材料选用 C20 混凝土.

2.4 计算结果与分析

对于受限空间再构的人工假顶稳定性和应力,变形的情况,首先研究在最恶劣条件下,即模拟在顶底柱已经人工再构,并且整个矿段全采完,而采空区体积未进行充填的条件下,再构人工假顶的受力和变形情况. 以及研究在回采过程中的力学演化特性.

表1 计算所采用的力学参数
Table 1 Mechanic parameters in computing

岩性	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	抗压强度 $/\text{MPa}$	粘聚力 C/MPa	摩擦角 $\varphi/^\circ$	密度 $\rho/(10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
混凝土	2.5×10^4	0.2	28.23			2.4
钢筋	2×10^5	0.25				
矿体	5×10^4	0.25		21.3	40.8	4.54
充填体	2.5×10^3	0.26		8	35	2.2

2.4.1 应力与变形特征分析

从图2和图3回采结束,但空区未进行充填条件下,再构的顶板构筑物中最大主应力 σ_1 可以发现,在采空区的人工假顶上出现了较大范围的应力集中区域,而应力集中区域在人工假顶的底板中部,即采空区的上方顶板的中心区域,出现最大

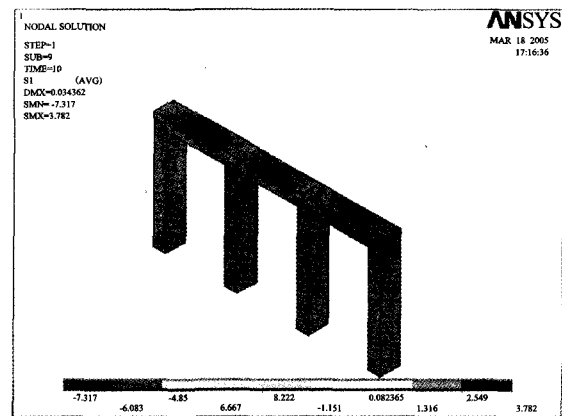


图2 全空体积状态下的 σ_1 分布云图
Fig.2 Stress nephogram of σ_1 in
the all empty after mining

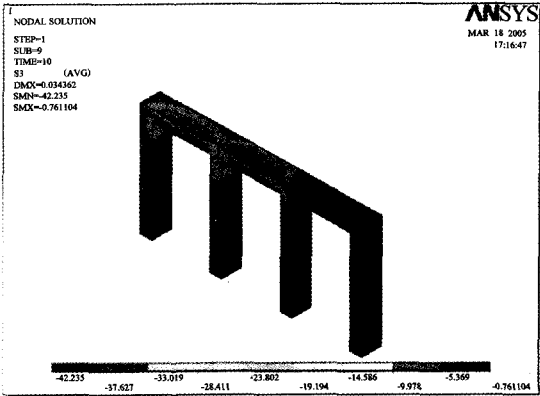


图3 全空体积状态下的 σ_3 分布云图
Fig.3 Stress nephogram of σ_3
in the all empty after mining

的拉应力区为 3.8 MPa 的拉应力区. 而在顶板的上方出现的最大压应力为 42.2 MPa , 出现的最大压应力位置对应的位于中心区域,这主要是因为混凝土假顶中由于钢筋的存在,是拉应力转换为压应力,有利于人工假顶的稳定.

从图 4 中沿 z 方向的位移变化云图可以发现,在没有充填的情况下,顶板再构最大的局部位移达到 0.3 m,而在充填的情况下,这种位移的变化将会得到极大的改善,其最大的垂直位移为 0.14 m 左右.同时,由于受到围压的作用,再构人工顶板上表面形成隆起,在充填环境下,这种隆起将得到盖.因此,再构人工顶板构筑物在充填条件下,将加大改善再构的构筑物受力和变形环境,提高工程结构的稳定性.

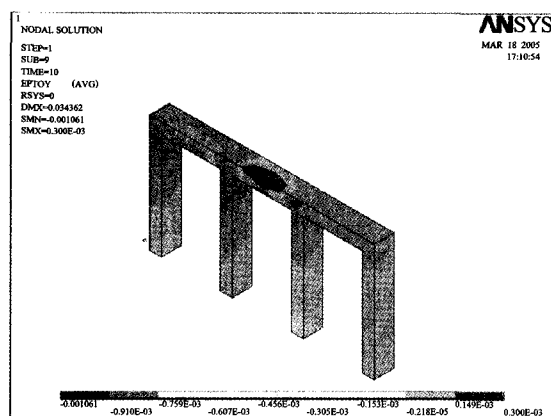


图 4 全空体积状态下的 z 方向位移分布云图

Fig. 4 Displacement nephogram of z in the all empty after mining

2.4.2 假顶的裂隙演化

再构人工顶板的混凝土结构中,由于受到采动应力和围压作用,在顶板中容易产生裂缝,而这种裂缝的存在是顶板最大的安全隐患.图 5 中表明了人工假顶的裂缝的发展,在不同的颜色区域表示了人工假顶各部位的裂缝发展结果.由图可知,在顶板的底部出现了大量的两个方向的裂缝,并且在中心部位出现了三向的裂缝,这种裂缝的发展,将带来混凝土结构的层析和剥落,而在采空区的人工假顶上方的两侧出现了较大范围的两向裂缝.

2.4.3 回采过程的有限元分析

由于采矿的发生,在矿体中产生了拉应力区,从最大主应力云图中可以发现,拉应力区的变化是随着采矿活动的推进,拉应力区逐渐扩大,其拉应力值也随着增加,这有利于在矿体中形成拉应力破坏区,增强矿体的可崩性.但由于人工假顶钢筋的存在,人工假顶中的拉应力得到了极大的改善,这有利于人工假顶的稳定和避免由于受到较大的拉应力的拉破坏.

图 6 中就反映出了最大拉应力随着采矿步序的相关关系.在采矿过程中,压应力在矿体中变化不够明显,但在完全采空而没有充填的情况下,在再构的人工假顶上方出现最大压应力值达到 42 MPa,在这种情况下,如果不及及时进行充填,长时间的暴露,将会形成压溃破坏.并通过再构人工顶板的应力变化对比,可以发现,在回采结束时,顶板中应力状态发生突变,拉应力变化趋势由递增至递减,而拉应力增大速率猛增,形成再构人工顶板的主要拉应力作用转化为压应力作用.

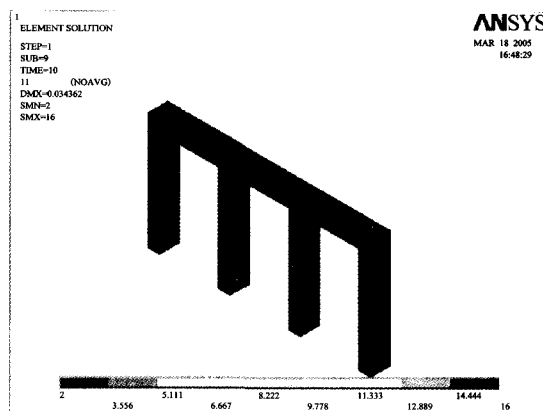


图 5 人工假顶混凝土结构的积分点裂缝云图

Fig. 5 Crack nephogram of the concrete structure in the artificial roof

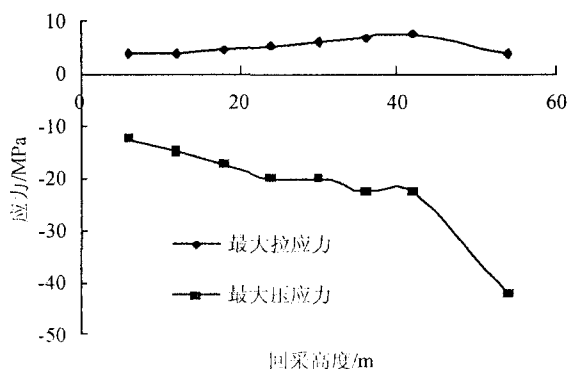


图 6 再构人工顶板最大应力与回采高度关系曲线图

Fig. 6 Relationship curves between the max stress and the mine height to the reconstruct artificial roof

3 工程处置措施

通过回采后充填与空区对比分析发现,在空区条件下,再构人工顶板位移大,受力环境差等,同时产生了大量的裂缝,必须进行相应的工程处置措施.

对于受到上部载荷与侧压力的作用,在回采结束时,再构人工顶板产生了大量的二维和三维的裂缝,考虑水平向的配筋作用,可以弱化水平向的裂缝作用,因此通过沿铅垂方向进行锚注^[8],防止顶板的压溃;同时,在回采结束后,及时进行充填采空区处理,改善再构人工结构的受力状态,形成二维力学形态向三维力学形态的转变,延缓再构人工顶板的加速变形行为,强化再构人工顶板的安全稳定性。

4 结论

对设计的再构人工构筑物的稳定性有限元分析表明,在相应的回采参数条件下,再构结构空间稳定,能够满足矿山回采对结构的安全需要,保证采矿作业的安全稳定性需求;进行工程处置措施后的人工顶板从结构上更加有利于顶板安全要求和改善受力状态,并通过及时的空区充填延缓再构人工顶板的加速变形行为,强化了再构空间的稳定性。

参考文献:

- [1] 周科平,高峰,古德生. 采矿环境再造与矿业发展新思路[J]. 中国矿业,2007,16(4):34-36.
- [2] 胡建华,周科平,董国庆. 采矿环境再造结构及监测技术研究[J]. 矿业研究与开发,2006(金属矿采矿科学技术前沿论坛论文集):75-78.
- [3] 古德生,李夕兵. 现代金属矿床开采科学技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [4] 唐有德,姚香. 类框架结构支撑采空区的力学稳定性分析[J]. 有色金属(矿山部分),2004,56(2):21-23.
- [5] 陈友东,唐有德,姚香. 类框架结构采空区处理新技术的研究与实践[J]. 有色金属(矿山部分),2002,54(6):5-7.
- [6] 车平,黄宏伟. 相似理论在溶洞顶板稳定性数值分析中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(4):617-622.
- [7] 郝文化. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [8] 黄雷,刘东燕. 锚固后岩体稳定性分析的能量法初探[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(5):726-710.
- [9] 胡赓祥,蔡珣,戎咏华,等. 材料科学基础[M]. 上海:上海交通大学出版社,2006.
- [10] 董瀚,孙新军,刘清友,等. 变形诱导铁素体相变——现象与理论[J]. 钢铁,2003,38(10):56-67.
- [11] Lee S, Kuon D, Lee Y K, et al. Transformation strengthening by thermomechanical treatment in C-Mn-Nb steels[J]. Metall Mater Trans A, 1995, 26A: 1095-1100.
- [12] 刘朝霞,李殿中,乔桂文. 低碳钢在 A_3 温度之上的形变诱导铁素体(一种马氏体)的相变研究[J]. 金属学报,2005,41(11):1127-1135.
- [13] Seung Chan HONG, Sung Hwan LIM, Kyung Jong LEE, et al. Effect of Undercooling of Austenite on Strain Induced Ferrite Transformation Behavior[J]. ISIJ International, 2003, 43(3):394-399.
- [14] 杨玉珩,胡安民,齐俊杰,等. 低碳钢形变强化相变的组织细化[J]. 金属学报,2001,15(2):171-178.
- [3] 范建文,张维旭,代晓莉,等. 普碳钢中板表层组织超细化的变形机理[J]. 材料热处理学报,2005,26(6):69-73.
- [4] 董瀚. 先进钢铁材料——高性能结构材料技术丛书[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [5] 杨平,傅云义,崔凤娥,等. Q235 碳素钢应变强化相变的基本特点及影响因素[J]. 金属学报,2001,37(6):592-600.
- [6] Weng Y Q, Sun X J, Dong H. Overview on the theory of deformation induced ferrite transformation [C]//Symp Ultrafine Grain Struct(ISUG2005), Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005:9-15.
- [7] 杨忠民,赵燕,王瑞珍,等. 形变诱导铁素体的形成机制[J]. 金属学报,2000,36(8):818-826.
- [8] Ong - Kyo CHOI, Dong - Han SEO, Jae - Sang LEE, et al. Formation of Ultrafine Ferrite by Strain - induced Dynamic Transformation in Plain Low Carbon Steel[J]. ISIJ International, 2003, 43(5):746-754.

(上接第26页)