

某铅锌矿采空区处理与卸压开采方案的数值模拟

李俊平¹, 王晓光¹, 赵兴明², 杨明春³

(1. 西安建筑科技大学材料与矿业学院, 陕西 西安 710055; 2. 白银有色集团股份有限公司厂坝铅锌矿, 甘肃 成县 742504;

3. 四川机电职业技术学院, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 为了经济、安全地处理某铅锌矿 900 m 水平以上的采空区并回收矿柱, 同时避免深部开采时发生岩爆, 提出了急倾斜矿体开采的采空区处理与卸压开采方法, 并利用数值模拟软件 ANSYS 和 FLAC^{3D} 确定了此方法的施工参数, 并对比了两个软件的计算结论。研究表明: ANSYS 和 FLAC^{3D} 得出的结论基本一致; 下盘脉外离采空区边缘 10 m 掘进巷道时, 上盘脉外卸压施工巷道离采空区边缘的水平距离不超过 20 m; 隔断开采的深度不超过 20 m; 必须从上、下盘脉外巷道同时向采空区围岩实施 V 型松动爆破; 可只在上盘巷道底板进行隔断开采。此采空区处理与卸压开采方法技术合理、经济可行、简便适用; 它是一种采空区处理的联合法, 适合地表允许岩体移动的急倾斜、厚度大矿体的采空区处理与卸压开采; 它能够用工程爆破这一种手段实现采空区处理、应力向有利于安全生产的方向转移等多种目的。

关键词: 采矿工程; 冲击地压; 采空区处理; 卸压开采; 隔断开采; 数值模拟

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)05-0745-07

Numerical simulation of mining scheme disposing abandoned-stope and relieving mining pressure in a certain lead & zinc mine

LI Junping¹, WANG Xiaoguang¹, ZHAO Xingming², YANG Mingchun³

(1. School of Materials and Mineral Resources, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Changba lead & zinc mine, Baiyin Nonferrous group limited liability company, Chengxian 742504, China;

3. Sichuan Electromechanical Institute of Vocation and Technology, Panzhihua 617000, China)

Abstract: For the sake of safety, and economy in disposition of the abandoned-stope and extract pillar above 900m level of a lead & zinc mine, while avoiding the deep mining rock burst, a new method disposing steep abandoned stope and relieving mining pressure was put forward, and it's construction parameters were determined by ANSYS and FLAC^{3D} to dispose abandoned stope and unload mining stress. At the same time, conclusions calculated by the two softwares were compared. Results showed that ANSYS and FLAC^{3D} arrived at the same conclusions, and that the horizontal distance must be 20 m from the edge of the forsaken-stope to tunnel outside the hanging side if the horizontal distance is 10 m from the edge of the abandoned stope to tunnel outside the heading side. Moreover, the partition mining depth is not more than 20 m below the floor plate of tunnels. From the tunnel outside hanging side and footwall of the veins to the abandoned stope, v-shaped loosening blasting must be implemented simultaneously in forsaken stope surrounding rock. Furthermore, the partition mining can only been carried out on the tunnel bottom plate in the hanging wall. The new method for disposing the steep abandoned stope & relieving mining pressure applied is characteristic of advanced nature, which is surely expected to bring about reasonable economy, confident safety and great economic benefits. Moreover, the new method is a kind of combined method disposing forsaken stope, and it is suitable for steep, big and thickness ore-body to dispose abandoned stope and relief mining pressure when the surface movement and subsidence is allowed. In applying the new method to dispose forsaken stope, the stress of surrounding rock will transfer toward the direction of being advantageous to safety production and other purposes by means of engineering blasting.

Key words: Mining engineering; rock burst; abandoned /forsaken stope disposal; relief mining pressure; partition mining; numerical simulation

大规模深部开采已成为国内外采矿工业发展的必然趋势。进入深部开采后, 往往上部开采形成了大面积采空区。因上部大面积采空形成的高地压聚集在围岩及深部待采矿体上, 不仅会诱导采空区大规模冒落而形成顶板冲击地压, 而且会导致采空区矿柱回收及深部开采过程中发生岩爆或大变形坍塌。

秦岭地区某铅锌矿矿体急倾斜、近直立, 走向长 800 m, 薄到中厚。上盘为结晶灰岩, 下盘为黑

云母片岩。矿体中段高 50 m, 1 100 m 的非标准中段高 70 m, 典型剖面见图 1。已用阶段矿房法开采到 900 m 中段, 上部留下 5 个中段的采空区及顶底柱、间柱。顶底柱厚 4 m, 间柱宽 3 m, 矿房长 47 m。伴随 900 m 以上的采空区处理与矿柱回收及 900 m 以下的深部开采, 经常发生岩爆。

按文献[1]或文献[2]取平均值得到该铅锌矿的矿(岩)石物理力学参数, 再按文献[3]分别取上盘、矿体、下盘的完整性系数 0.71、0.57、0.61 修正得到

收稿日期: 2014-07-07

修改稿日期: 2015-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51244006); 西安建筑科技大学重点培育学科建设基金项目(XK2012005)

作者简介: 李俊平(1969.5-), 男, 博士, 教授, 主要从事矿山岩石力学的教学与科研工作。E-mail: junpingli@163.com

数值模拟所需的岩体力学参数,见表1. 其中容重和泊松比不作修正. 类似文献^[4],在上述计算参数的基础上,容重按1.4的松散系数折减,泊松比不变,弹性模量折减为1/70,内摩擦角折减为1/6,其它参数折减为1/10,得到爆破弱化体的计算参数,见表1.

李俊平等^[5-6]综述表明:急倾斜矿体开采的采空区处理,目前只有V型切槽顶板闭合法^[7]和硐室&深孔爆破法^[8]这两种经济、有效的采空区处理方法,还没有一种能同时兼顾上部中段矿柱回收与采空区处理及深部中段卸压开采的好方法;但V型切槽形成免压拱^[9]及隔断开采^[10-11]的思想可被借鉴来创新采空区处理与卸压开采方法. 采空区处理方法的发展要以采空区开挖及矿柱回采的围岩应力与变形仿真为依据^[5-6]. 尽管ANSYS是一种很成熟、灵活的有限元软件,但其是从钢结构的数值模拟中发展而来的,应用D-P准则只能实施刚性计算,不引入其它计算算子或破坏准则就不能通过应力判断岩体的受拉或塑性破坏,也不能实施大变形分析,FLAC^{3D}可弥补上述不足^[5,12]. 由于作者前期对采空区处理问题的大量研究都基于ANSYS,因此,本次

特引入FLAC^{3D}相互验证.

本文提出了急倾斜矿体开采的采空区处理与卸压开采方法,并应用ANSYS和FLAC^{3D}数值模拟比较研究采空区处理及卸压开采的施工参数.

1 急倾斜矿体开采的空区处理与卸压开采方法简介

急倾斜矿体开采的采空区处理与卸压开采方法的特点是:使采空区上盘和下盘在深部待采矿体以上形成一个以上盘沿脉巷道及下盘沿脉巷道外侧完好围岩为拱脚的免压拱,从而消除上部开采形成的采空区而造成的地压危害;并通过上、下盘沿脉巷道底板的下向垂直深孔爆破形成的塑性化带,进一步削弱高水平应力对深部待采矿体的影响,最终达到深部卸压开采的目的.

从上述特点看,上盘和下盘脉外巷道离采空区的水平距离、巷道底板下向垂直深孔爆破形成的隔断开采深度等有关参数及上、下盘巷道是否必要同时实施隔断开采需要研究.

表 1 岩体物理力学参数
Tab.1 The physical and mechanical parameters of rock mass

介质	容重 $\gamma/\text{kN/m}^3$	弹模 E/GPa	泊松比 μ	抗压强度 σ_b/MPa	抗拉强度 σ_c/MPa	凝聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
结晶灰岩(上盘)	26.46	43.69	0.20	86.22	6.29	11.55	34.50
铅锌矿	33.71	52.68	0.30	83.40	5.90	11.66	29.70
黑云母片岩(下盘)	26.66	42.74	0.22	81.64	5.63	10.72	36.95
上盘爆破弱化带	18.90	0.624	0.20	8.622	0.629	1.155	5.75
下盘爆破弱化带	19.04	0.611	0.22	8.164	0.563	1.072	6.16

2 采空区应力仿真

利用有限元软件 ANSYS 对典型剖面(见图 1)建模、划网格. 建模时选取矿体剖面方向为 x 轴,走向方向 z 轴,高程方向 y 轴. ANSYS 三维网格见图 2,应用接口软件直接将其转化为 FLAC^{3D} 的计算网格. 该模型共有 126 480 个单元、130 653 个节点. ANSYS 采用 D-P(德鲁克-普拉格)准则,采用牛顿-拉夫森计算模式. FLAC^{3D} 应用 M-C(摩尔—库伦)准则,采用大变形计算模式.

在重力应力场下计算,除地表为自由面外其它各面都采用法向位移约束. 以下应力云图中,“-”为压应力,“+”为拉应力,单位为 Pa. 由于考虑了“+”、“-”号对大、小的影响,软件出图的第一、三主应力正好与岩体工程的实际情况相反. 以下按岩体工程实际情况进行列图及分析.

ANSYS 和 FLAC^{3D} 都是连续介质计算方法,不

便离散化模拟松动爆破的岩体,参考^[4,7-8, 13-14],应用参数折减等效模拟松动爆破岩体.

由于 ANSYS 只能实施刚性计算,而且计算过程中发现大多数单元的应力都未达到强度值,因此,分析过程中直接比较应力大小.

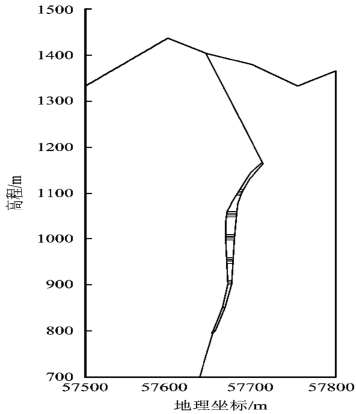


图 1 典型剖面图
Fig.1 Typical profile

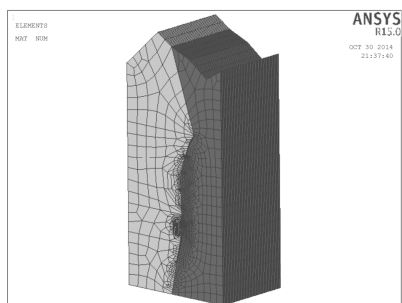


图2 计算模型立体图

Fig.2 Stereo diagram of calculation model

2.1 矿柱稳定性评价

900 m 以上中段开挖、矿房及顶底柱形成的应力分布云图见图3。

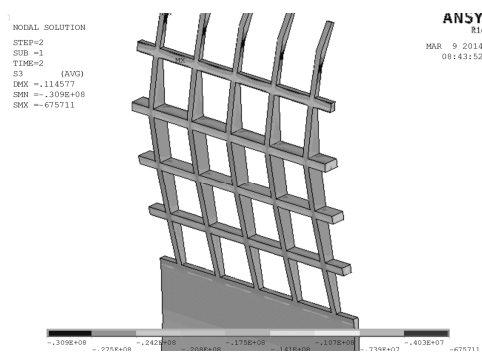
对比图3(b、d)可见:矿体开挖后,两软件仿真的矿房顶底柱、间柱都大量出现拉应力,但最大拉应力 ANSYS 出现在 950 m 中段、达 6.15 MPa, FLAC^{3D} 出现在 1 100 m 中段、达 5.97 MPa。在拉

应力疲劳屈服或拉伸破坏下,局部顶底柱、间柱会发生失稳,这与现场地压显现相符。因此,900 m 以上设计的顶底柱厚 4 m、间柱厚 3 m,矿房长 47 m 是不合理的,不能确保脉内巷道稳定,安全回采矿柱还需下盘掘进脉外沿脉巷道及川脉。

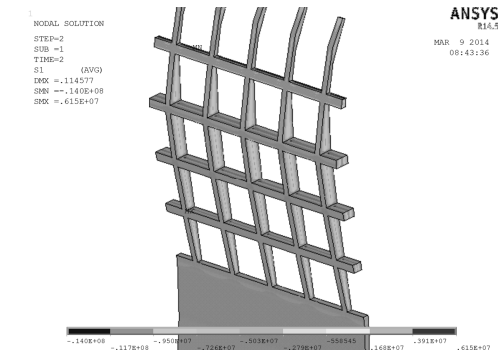
2.2 采空区稳定性评价

即使矿柱回采完毕,900 m 水平以上形成整体大规模采空区,上、下盘围岩的拉应力 ANSYS 为 0.556 MPa、局部达 3.20 MPa, FLAC^{3D} 最大为 1.96 MPa;压应力 ANSYS 不超过 14.3 MPa, FLAC^{3D} 不超过 16.0 MPa,见图4。

从图4可见:矿柱回采后,900 m 以上的采空区压应力远小于岩体抗压强度;拉应力小于岩体抗拉强度。不进行采空区处理,短期内采空区不会因拉应力疲劳破坏而自然塌落卸压。



(a) ANSYS 计算的第一主应力



(b) ANSYS 计算的第三主应力

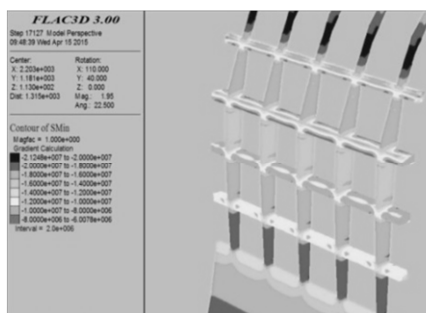
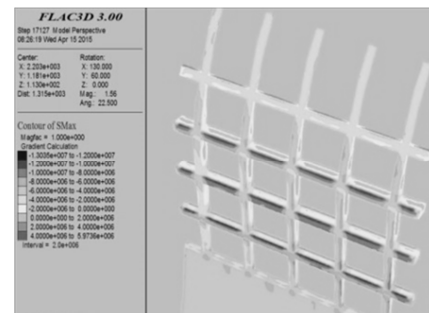
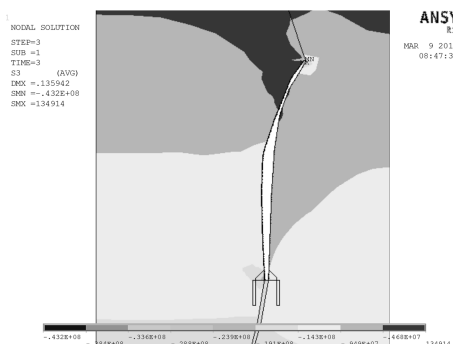
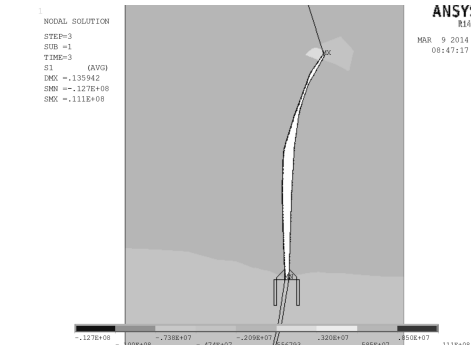
(c) FLAC^{3D} 计算的第一主应力(d) FLAC^{3D} 计算的第三主应力

图3 矿柱主应力分布/Pa

Fig.3 Principal stress distribution in pillar /Pa



(a) ANSYS 计算的第一主应力



(b) ANSYS 计算的第三主应力

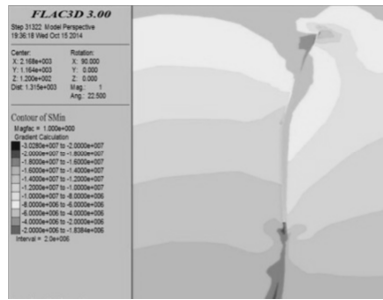
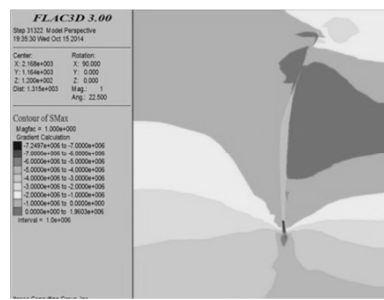
(c) FLAC^{3D} 计算的第一主应力(d) FLAC^{3D} 计算的第三主应力

图4 矿柱回采后采空区围岩主应力分布/Pa

Fig.4 Principal stress distribution in surrounding rock of abandoned-stope before extracting pillar /Pa

2.3 矿柱回采及深部开采的岩爆可能性评价

矿柱回采前, 900 m 以下待采矿体第一主压应力为 14.0~18.0 MPa, 第三主压应力为 4.0~8.0 MPa, 见图 3. 矿柱回采后, 上述第一主压应力变为 14.3~19.1 MPa, 第三主压应力变为 4.0~7.38 MPa, 见图 4. 两软件应力结果相差都不超过 25%.

矿柱回采前, 1100 m 水平以上间柱的第一主压应力 ANSYS 达 30.9 MPa、FLAC^{3D} 达 21.2 MPa, 第三主压应力 ANSYS 达 14.0 MPa、FLAC^{3D} 达 13.0 MPa, 见图 3. ANSYS 较 FLAC^{3D} 局部应力偏大, 最大偏差小于 50%.

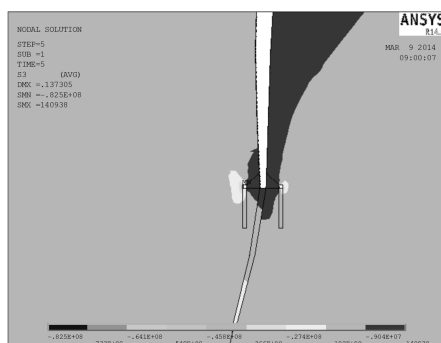
由上述分析可知: 局部采空区矿柱及 900 m 以下待采矿体因 900 m 以上大面积采空引起的高地压达到或超过了秦岭地区的岩爆发生条件 (约 700m 埋深、压应力 18~20 MPa) [15], 必须处理采空区, 释放开采地压; 两软件计算的应力变化规律基本一致, 应力值最大相差不超过 50%. 两软件的应力产生了较大偏差, 可能是由于 FLAC^{3D} 许可产生大变形, 从而导致了应力部分释放.

3 巷道底板的隔断开采深度研究

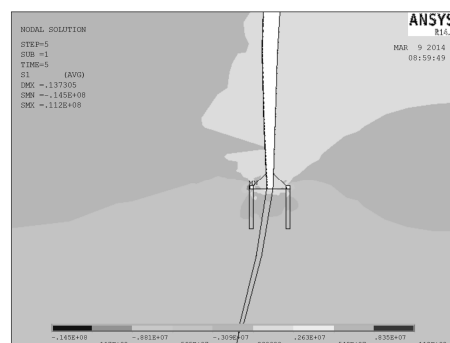
根据上述施工方案, 假定上、下盘脉外巷道都离采空区边缘 10 m. 分别在两脉外巷道向采空区实施 V 型松动爆破而形成免压拱, 并在巷道底板下向凿岩深孔从而形成隔断开采, 见图 5.

V 型松动爆破形成压力拱之后, 上、下盘围岩拉应力略增大, 从未施工前的 0.566~2.0 MPa 增大到施工后的 2.33~2.63 MPa, 可能会引起上、下盘围岩局部受拉疲劳破坏 (见图 5). 890~850 m 待采矿体第一主压应力 ANSYS 由未施工前的 14.3~19.1 MPa 变为施工后的 9.04~18.2 MPa, FLAC^{3D} 由未施工前的 14.3~19.1 MPa 变为施工后的 7.5~17.5 MPa; 第三主压应力 ANSYS 由未施工前的 4.0~7.38 MPa 变为施工后的 2.09~4.74 MPa, FLAC^{3D} 由未施工前的 4.0~7.38 MPa 变为施工后的 2.0~5.0 MPa (见图 4、5). 可见, V 型切槽施工后深部待采矿体最大压应力略微减小, 但绝对值仍然较大, 说明 V 型切槽形成的免压拱能减小压应力, 但减小的幅度有限, 仍达到或超过秦岭地区的岩爆发生条件 18~20 MPa [15], 因此, 必须对深部实施隔断开采. 两软件计算偏差 ≤ 25%.

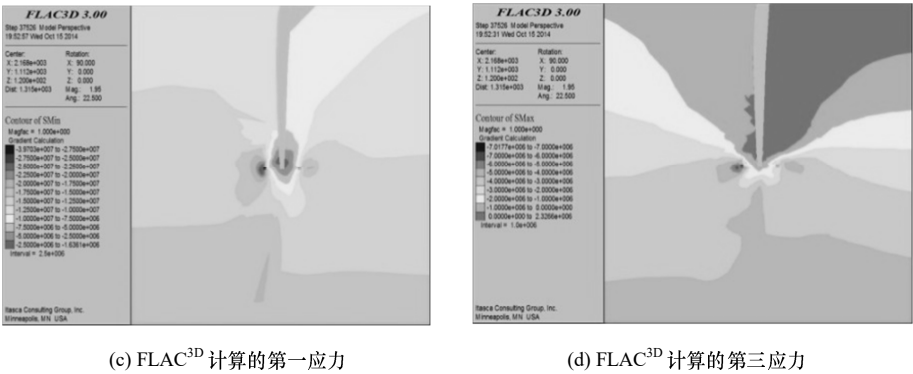
在巷道底板下向隔断开采时, 分别模拟钻孔深 10、20、30 m. 为了比较隔断开采效果, 如下分析 y 向和 x 向的应力分布, 见表 2. 从表 2 可见: FLAC^{3D} 模拟的采空区底板在 900 m 不受拉, ANSYS 则略受拉; 当隔断开采深 10 m 时垂直 (y 向) 压应力降低很快, 20 m 时 y 向压应力降低速度变慢, 超过 20 m 后压应力降低更慢. 综合考虑卸压效果及施工成本, 取隔断开采深度 ≤ 20 m.



(a) ANSYS 计算的第一应力



(b) ANSYS 计算的第三应力



(c) FLAC^{3D} 计算的第一应力 (d) FLAC^{3D} 计算的第三应力

图 5 采空区处理后的主应力分布/Pa

Fig.5 Principal stress distribution after disposing abandoned stope /Pa

表 2 不同隔断开采深度时深部待采矿体应力比较/MPa
Tab. 2 The stress comparison of deep mining orebody as different partition mining depth/MPa

方案	FLAC ^{3D} 模拟结果		ANSYS 模拟结果	
	900~950 m 深处应力	900~950 m 深处应力	900~950 m 深处应力	900~950 m 深处应力
	y 向	x 向	y 向	x 向
未隔断	1.5~17.5	5.0~6.0	0~20.5	-3.92~8.92
10 m 隔断	1.58~12.5	5.0~6.0	0~14.50	-3.24~6.18
20 m 隔断	1.63~10.0	4.5~9.69	0~13.2	-1.5~5.63
30 m 隔断	1.66~8.75	3.5~9.31	0~12.8	-1.5~4.09

注: 按工程“-”为拉; 某点约在应力云图的某色区中间时, 取色区两端的均值。

4 上盘卸压巷到矿体边缘的水平距离研究

若下盘脉外沿脉运输巷道到采空区边缘的水平距离为 10 m, 取上盘脉外卸压施工巷道到采空区边缘的水平距离分别为 10 m、20 m、30 m, 在 V 型爆破形成免压拱的同时, 再分别在脉外巷道底板垂直向下 10 m、20 m、30 m 松动爆破形成隔断开采。应用两数值模拟软件分别模拟上述方案, 仿真结果见表 3 和表 4。

从表 3 和表 4 可见, 两个软件模拟上盘巷道到采空区边缘的水平距离从 10 m 变化到 20 m 与从 20 m 变化到 30 m 的趋势都正好相反。因此, 上盘脉外巷道到采空区边缘的水平距离取 20 m。

该铅锌矿应用急倾斜矿体开采的采空区处理与卸压开采方法时, 施工参数为: 上、下盘分别到采空区边缘的水平距离为 20 m、10 m, 巷道底板垂直向下隔断开采的深度为 20 m。如此施工之后(见图 6), 仅 ANSYS 的水平应力在 900 m 水平附近显示待采矿体微弱受拉; 在 870 m 水平附近待采矿体的垂直压应力降为 10.2~12.5 MPa, 水平压应力降为

3.5~4.37 MPa, 垂直压应力较矿柱回收前的 12.0~19.7 MPa、矿柱回收后的 18.0~20.8 MPa 明显降低(见图 7), 远低于秦岭地区发生岩爆的压应力条件 18~20 MPa^[15]。因此, 运用本文提出的新方法实施该铅锌矿 900 m 水平以上的采空区处理与矿柱回采及 900 m 水平以下的深部开采, 能消除岩爆。

5 上、下盘巷道同时 V 型爆破和隔断开采的必要性研究

在图 6 方案的基础上, 利用两个数值模拟软件分别研究如下 3 个方案, 即: I) 仅下盘底板不实施隔断开采; II) 下盘不实施隔断开采和 V 型松动爆破; III) 仅上盘底板不实施隔断开采。计算结果见表 5~6。

对比表 5、表 6, 发现方案 II 和方案 III 的结果较图 6 方案压应力更大, 方案 I 较图 6 方案卸压效果更好。故, 必须在上、下盘脉外沿脉巷道同时向采空区实施 V 型松动爆破, 可只在距采空区边缘的水平距离为 20 m 的上盘脉外巷道的底板向下垂直实施 20 m 深的隔断开采, 这样施工更经济、简便、有效。

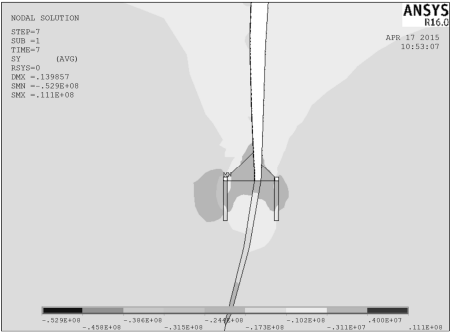
6 ANSYS 与 FLAC^{3D} 数值模拟结果对比

结合某铅锌矿急倾斜矿体开采的采空区处理与卸压开采, 对比 FLAC^{3D} 和 ANSYS 两软件的模拟结果, 从表 2~6 及图 3~7 可见: 除了在矿柱回采后的采空区底板附近 ANSYS 表现受拉、FLAC^{3D} 表现受压外, 两软件模拟的压应力偏差一般不超过 50%; FLAC^{3D} 模拟的应力分布规律与 ANSYS 基本一致。这说明文中提出的采空区处理与卸压开采方法在该铅锌矿是可行的。

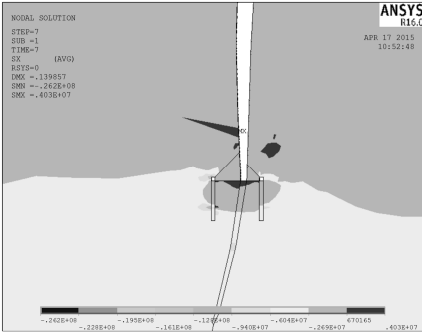
表 3 FLAC^{3D} 模拟上盘卸压巷道处在不同位置时待采矿体的压应力

Tab.3 The pressure stress comparison of mining ore-body as different location of the tunnel in hanging side by FLAC^{3D}

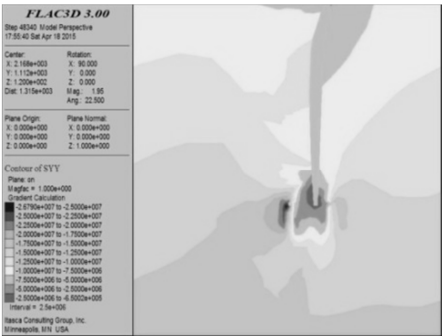
上盘巷道到采空区边缘的水平距离/m	950 m 标高处待采矿体的最大压应力/MPa							
	V 型切槽		隔断深 10 m		隔断深 20 m		隔断深 30 m	
	y 向	x 向	y 向	x 向	y 向	x 向	y 向	x 向
10	17.5	6.0	12.50	6.0	10.00	4.5	8.75	3.5
20	12.5	5.0	10.00	5.0	10.00	3.0	8.75	3.0
30	10.0	5.0	10.00	4.0	10.00	3.5	9.00	3.5



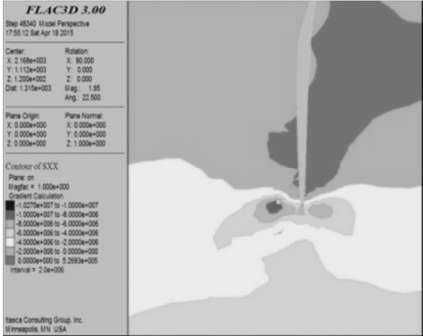
(a) ANSYS 计算的垂直(y 向)应力



(b) ANSYS 计算的水平(x 向)应力



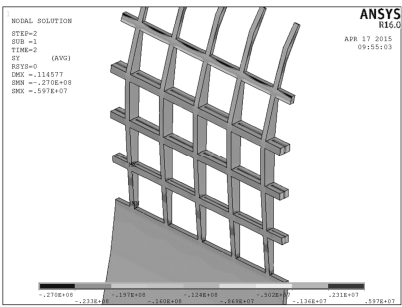
(c) FLAC^{3D} 计算的垂直(y 向)应力



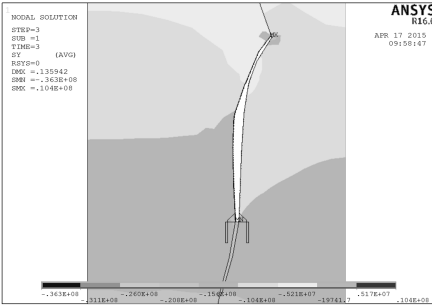
(d) FLAC^{3D} 计算的水平(x 向)应力

图 6 采空区处理与卸压开采后主应力分布/Pa

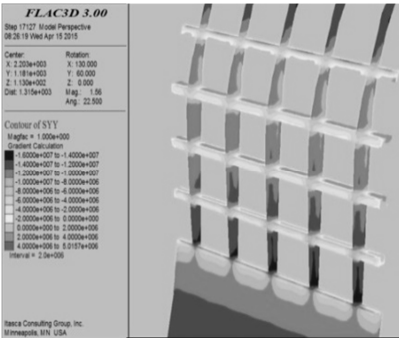
Fig.6 Principal stress distribution after disposing abandoned stope and relieving mining pressure /Pa



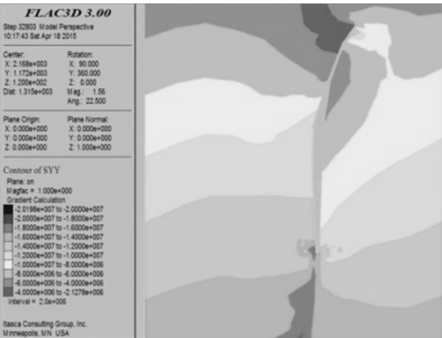
(a)矿柱回收前 ANSYS 计算的 y 向应力



(b)矿柱回收后 ANSYS 计算的 y 向应力



(c)矿柱回收前 FLAC^{3D} 计算的 y 向应力



(d) 矿柱回收后 FLAC^{3D} 计算的 y 向应力

图 7 矿柱回收前、后深部待采矿体的垂直应力分布/Pa

Fig.7 Vertical stress distribution of deep mining ore-body before and after extracting pillar/Pa

表 4 ANSYS 模拟上盘卸压巷道处在不同位置时待采矿体的压应力

950 m 标高处待采矿体的最大压应力/MPa								
上盘巷道到采空区边缘的水平距离/m	V 型切槽		隔断深 10 m		隔断深 20 m		隔断深 30 m	
	y 向	x 向	y 向	x 向	y 向	x 向	y 向	x 向
10	20.5	8.92	14.50	6.18	13.2	5.63	12.80	4.09
20	12.6	8.87	11.30	5.52	10.2	4.37	9.77	2.70
30	12.18	8.83	7.24	5.17	6.85	3.37	12.70	1.56

注: 表 3、表 4 中, 某点约在应力云图的某色区中间时, 取色区两端的均值。

表 5 ANSYS 模拟 890~870 m 待采矿体的应力/MPa
Tab.5 The stress comparison of deep mining orebody between 890 m level and 870 m level by ANSYS/MPa

压应力	图 6 方案	方案 I	方案 II	方案 III
y 向	3.11~10.2	2.68~9.72	8.95~12.43	1.13~13.0
x 向	-0.67~4.37	-1.14~2.32	-0.56~2.91	-0.77~2.54

注: 表 5、表 6 按工程“-”为拉; 某点在色区中间则取色区均值, 对应比较 900~950 m 深处的应力。

表 6 FLAC^{3D} 模拟 890~870 m 待采矿体的压应力/MPa
Tab.6 The pressure stress comparison of deep mining orebody between 890 m level and 870 m level by FLAC^{3D}/MPa

压应力	图 6 方案	方案 I	方案 II	方案 III
y 向	2.5~10.0	2.5~7.5	5.0~10.0	5.0~15.0
x 向	6.0~3.0	2.0~4.0	8.0~4.0	4.0~6.0

由于两软件计算所采用的模型(见图 2)及单元、网格划分是一样的, 因此, 计算偏差不是由于单元或网格的畸变而导致的, 可能是由各自采用不同的计算模式及强度准则所导致的, 很可能是由 FLAC^{3D} 许可产生大变形从而导致了应力部分释放与重分布。

7 结论

应用 ANSYS 和 FLAC^{3D} 软件对比研究某铅锌矿的采空区处理与卸压开采方案, 得到如下结论:

(1)应用急倾斜矿体开采的采空区处理与卸压开采新方法, 处理急倾斜薄至中厚采空区, 能实现深部卸压开采, 并能避免岩爆发生。

(2)该采空区处理与卸压开采新方法拟采纳如下施工参数。下盘脉外巷道离采空区边缘的水平距离为 10 m 时, 上盘脉外卸压施工巷道到采空区边缘的水平距离不超过 20 m, 在巷道底板下向垂直深孔松动爆破所形成的隔断开采的深度不超过 20 m。

(3)同时在上、下盘脉外沿脉巷道向采空区实施 V 型松动爆破后, 只在上盘底板实施隔断开采, 施工更经济、简便、有效。

(4)两个软件 ANSYS 及 FLAC^{3D} 得到采空区处理与矿柱回采及卸压开采的地压分布规律基本一致, 计算偏差很可能是由 FLAC^{3D} 许可产生大变形从而导致了应力部分释放与重分布。

参考文献 References

[1] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 厂坝铅锌矿岩石物理力学性质测试研究[J]. 矿业研究与开发, 2003, 23(5): 12-13, 16.
YIN Xiangang, LI Shulin, TANG Haiyan, et al. The tests and studies of the physical mechanical properties of the rocks from Changba Lead-Zinc Mine[J]. Mining Research and Development, 2003, 23(5): 12-13, 16.

[2] 吴永博, 高谦, 杨志强, 等. 厂坝露天矿边坡工程地质研究与岩体力学参数预测[J]. 工程地质学报, 2007, 15(S1): 304-311.
WU Yongbo, GAO Qian, YANG Zhiqiang, et al. Engineering geologic research and prediction of mechanical Parameters of rock-masses for Changba Open Mine[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(S1): 304-311.

[3] 闫长斌, 徐国元. 对 Hoek-Brown 公式的改进及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4030-4035.
YAN Changbin, XU Guoyuan. Modification of Hoek-Brown expressions and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4030-4035.

[4] 李俊平. 缓倾斜采空场处理新方法及采场地压控制研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2003.
LI Junping. Study of the new method disposing gently inclined abandoned stope and ground pressure control at the stope[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2003.

[5] 李俊平, 赵永平, 王二军. 采空区处理的理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
LI Junping, ZHAO Yongping, WANG Erjun. Method and practice disposing abandoned stope[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.

[6] 李俊平, 肖旭峰, 冯长根. 采空区处理方法研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(3): 48-54.
LI Junping, XIAO Xufeng, FENG Changgen. Progress in developing methods for dealing with forsaken stope[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(3): 48-54.

[7] 李俊平, 肖旭峰, 连民杰, 等. “V 型”切槽顶板闭合方法研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(5): 219-222.
LI Junping, XIAO Xufeng, LIAN Mingjie, et al. On the roof closure method resulting from the “V”-shaped top-grooving[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(5): 219-222.