

DOI:10.11918/201812002

高水平地应力下自然崩落法底部结构灾变机理

夏志远^{1,2}, 谭卓英^{1,2}, 裴青彦³, 王俊虎⁴

(1. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室(北京科技大学), 北京 100083; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 3. 中条山有色金属集团有限公司 铜矿峪矿, 山西 运城 043706; 4. 中条山有色金属集团有限公司 设计院, 山西 运城 043700)

摘要: 为研究高水平地应力下自然崩落法拉底推进过程中底部结构应力演化规律, 揭示底部结构地压灾害特征产生的机理, 从而指导高水平地应力下自然崩落法生产。根据矿山实际工程参数和物理参数, 采用有限差分软件 FLAC3D 建立了数值仿真模型, 计算采用 Mohr-Coulomb 破坏准则。模拟过程按照后退式拉底方式, 先形成底部结构, 然后拉底分 3 步进行, 分别监测并分析了每步拉底之后的底部结构应力状态, 并与现场地压灾害发生实际情况进行了对比, 研究结果与现场地压灾害演变规律具有一致性。结果表明: 随着拉底爆破的推进, 推进线前方的底部结构逐渐产生压应力集中, 当压应力增大到超过岩体剪切破坏条件, 就会发生地压破坏现象; 位于拉底层下方的底部结构呈现拉应力集中, 当拉应力增大到超过岩体拉伸破坏条件, 就会再次发生地压破坏现象; 在高水平地应力下, 自然崩落法底部结构会呈现“先受压, 后受拉”应力规律, 随着拉底面积的增加, 压应力和拉应力集中程度越来越明显, 在实际生产中呈现底部结构反复来压的现象。

关键词: 自然崩落法; 高水平地应力; 拉底爆破; 底部结构; 地压灾害

中图分类号: TD322, TD853

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)04-0142-08

Mechanism of ground pressure disaster evolution of extraction level excavations in block caving with high horizontal in situ stress

XIA Zhiyuan^{1,2}, TAN Zhuoying^{1,2}, PEI Qingyan³, WANG Junhu⁴

(1. State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mine, Ministry of Education (University of Science and Technology Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Civil & Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Tongkuangyu Mine, Zhongtiaoshan Non-ferrous Metals Group Co., Ltd., Yuncheng 043706, Shanxi, China; 4. Zhongtiaoshan Design Institute, Zhongtiaoshan Non-ferrous Metals Group Co., Ltd., Yuncheng 043700, Shanxi, China)

Abstract: In order to guide the production of block caving method with high horizontal in situ stress, the stress evolution law of the extraction level excavations during the process of undercutting with high horizontal in situ stress was studied, and the occurrence mechanism of specific characteristics of ground pressure disaster in the extraction level excavations was revealed. According to the actual engineering and physical parameters of the mine, a numerical simulation model was established by using finite difference software FLAC3D, and Mohr-Coulomb failure criterion was adopted in calculation. In the simulation process, the extraction level excavations were excavated firstly according to the backward undercutting method. The process of the undercutting was divided into three steps, and the stress states of extraction level excavations after each step were monitored and analyzed respectively, which were compared with the actual situation of ground pressure disaster on site. The results are consistent with the evolution law of ground pressure disaster on site, showing that with the development of undercut blasting, compressive stress concentration gradually occurred in the extraction level excavations in the vicinity of the undercut front. Ground pressure disasters occurred when the compressive stress increased beyond the shear failure condition of rock mass. Tensile stress concentration appeared in the extraction level excavations below the undercut layer, and ground pressure disasters occurred again when the tensile stress increased beyond the tensile failure condition of rock mass. Under high horizontal in situ stress, the extraction level excavations of block caving method presented the stress law of "compressive stress concentration followed by tensile stress concentration". With the increase of undercut area, the extent of compressive stress and tensile stress concentration became increasingly obvious, thus ground pressure disasters occurred repeatedly in the extraction level excavations in actual production.

Keywords: block caving; high horizontal in situ stress; undercut blasting; extraction level excavations; ground pressure disaster

收稿日期: 2018-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(51574015)

作者简介: 夏志远(1991—), 男, 博士研究生;

谭卓英(1965—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 谭卓英, markzhy_tan@163.com

自然崩落法是一种大规模、低成本和高效率的采矿方法, 其凿岩工程量小, 生产能力大, 是地下采矿方法中唯一能够与露天采矿相媲美的比较经济的

采矿方法^[1-3]. 自然崩落法是在某一阶段矿体底部进行拉底,即采用以凿岩爆破的普通回采工艺采出10 m左右薄层矿体,为上部矿体崩落创造自由空间并使其失去支撑,从而上部矿体在自然应力的作用下产生崩落并将破碎的矿石在重力作用下从底部结构放出^[4-5]. 自然崩落法适用于地表允许崩落、矿石价值不高、矿石节理裂隙发育的厚大矿体开采中^[6]. 由于自然崩落法可以带来巨大的经济效益,解决自然崩落法开采的技术难题并推广其应用具有重要意义.

自然崩落法的底部结构是指拉底水平和出矿水平之间一系列巷道和工程的总称,所有采下的矿石都需经过底部结构由装运设备运出采场^[7]. 底部结构的稳定性至关重要,是自然崩落法能否成功运用的关键因素之一.

国内外学者对自然崩落法底部结构的稳定性和地压显现相关理论方法进行了研究. Trueman等^[8-11]研究了拉底方式、构造应力、底部结构高度等因素对自然崩落法底部结构的影响,并提出了控制措施. 丁亦敏^[12]通过监测铜矿峪矿在自然崩落法拉底和崩落过程中底部结构的受力,分析了自然崩落法开采过程中底部结构应力变化特征; Diering等^[13-16]采用三维有限元数值模拟的方法研究了自然崩落法开采过程中底部结构的稳定性,并提出了支护措施;周航^[17]采用颗粒流程序 PFC2D 和压力拱理论研究了自然崩落法拉底崩落过程中压力拱的演化规律.

在自然崩落法矿山实际生产中,水平地应力比较大的条件下,随着拉底爆破的推进,底部结构地压灾害演化会呈现反复来压的特征,但在以往的研究中并没有真正揭示高水平地应力下自然崩落法底部结构地压灾害的演变特征和机理. 本文以中条山集团铜矿峪矿为背景,采用三维有限差分软件 FLAC3D 对深部高水平应力下自然崩落法拉底过程中底部结构应力的时空演化特征和规律进行了分析,并与现场地压灾害发生实际情况进行了对比,揭示了底部结构地压灾害演变的机理,对矿山底部结构稳定性的维护具有重要意义.

1 地压灾害演变特征

中条山集团铜矿峪矿床主要以斑铜矿为主,矿床由百余条矿体组成,其中4[#]和5[#]矿体为主采矿体. 4[#]和5[#]矿体平面上为巨大透镜状,沿倾斜为似板状,倾角40°~60°. 4[#]矿体平均厚度95 m,最大厚度151 m,5[#]矿体平均厚度97 m,最大厚度155 m. 矿区内主要含矿岩石为变石英晶屑凝灰岩. 铜矿峪矿设

计采用后退式拉底自然崩落法开采,底部结构超前于拉底层掘进,由于矿体倾角较缓,为了充分回收矿石,减少损失率,充分发挥自然崩落法的优势,使矿体更为经济地回收出来,在两个矿体分别布设一个主层和两个副层来回收矿石.

采用应力解除法对原岩应力进行测量,测得的地应力最大主应力位于水平方向,且与矿体走向近乎一致,夹角较小. 由于矿体在水平方向呈现条带状分布,走向长度较长,倾向长度较短,为了便于工程开拓和多点出矿,出矿穿脉与矿体走向基本垂直布置. 由于采用后退式拉底方式,底部结构的掘进需要超前于拉底,但随着拉底爆破的推进和采深的增加,底部结构面临的地压灾害日益严重,表现为出矿穿脉和装矿进路收敛变形,甚至垮塌,如图1、2所示. 根据回顾历年地压灾害区域的演化过程,统计分析地压显现区域(历年典型破坏位置统计见表1),可以发现底部结构地压显现呈现以下规律:1)随着拉底爆破的进行,在推进线附近地压显现比较明显,主要表现为出矿穿脉和装矿进路收敛变形,甚至垮塌;2)随着拉底爆破的推进,一些地压显现区域会呈现反复来压,拉底推进线后方也出现一定比例的地压破坏,表现为出矿穿脉和装矿进路的反复破坏,如在矿山实际生产中拉底推进线推进到510出矿穿脉附



图1 出矿穿脉垮塌

Fig. 1 Collapse of the ore-drawing transverse drift



图2 装矿进路钢拱架压弯

Fig. 2 Bending of the steel arch in loading roadway

表 1 典型地压显现位置统计

Tab. 1 Statistics of typical ground pressure occurrence locations

地压显现严重程度	地压显现位置	地压显现形式
轻微破坏	402 穿(614 副层)	巷道发生细微开裂或微量下沉
	408 穿(554 主层)	
一般破坏	403 穿(554 主层)	片帮严重,钢拱架压弯
	512 穿(554 主层)	
严重破坏	407 穿(614 副层)	巷道局部发生坍塌
	508 穿(554 主层)	

近时,8~10 号聚矿沟之间的出矿穿脉段在 2014 年 3 月份变形严重,在同年 7 月份对出矿穿脉进行加固支护,恢复出矿,在 8 月份拉底推进线前移后,510 出矿穿脉 8~10 号聚矿沟之间的出矿穿脉段再次发生破坏;3)随着拉底爆破推进范围的增大,地压显现呈现加重趋势.

2 模型构建与计算方法

研究采用三维有限差分软件 FLAC3D 构建数值模型,模型范围取自于自然崩落法矿山实际开采范围,根据后退式拉底实际开采顺序进行开挖模拟,然后分析底部结构应力变化规律,并与现场实际灾变过程进行对比,从而分析底部结构灾变机理.

2.1 模型大小

根据现场实际工程布置,建立 FLAC3D 数值模型,模型整体如图 3 所示,模型内部如图 4 所示,采场巷道名称如图 5 所示,模型走向长 510 m,垂直走向长 310 m,高度 310 m,共计 2 773 845 个单元. 根据研究内容及建模单元数量计算难度限制,出矿水平共布设 8 条出矿穿脉,59 条出矿进路和聚矿沟,出矿水平埋深 550 m. 聚矿沟长 13 m,高 10 m,下宽 6.4 m,上宽 11 m,出矿穿脉和装矿进路净断面为 3.8 m×3.2 m(宽×高).

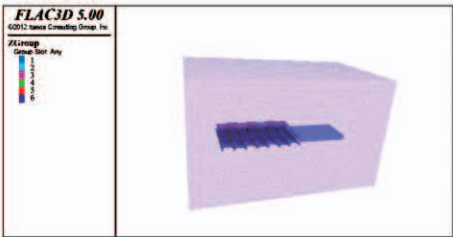


图 3 模型整体结构图

Fig. 3 Overall structure diagram of the model

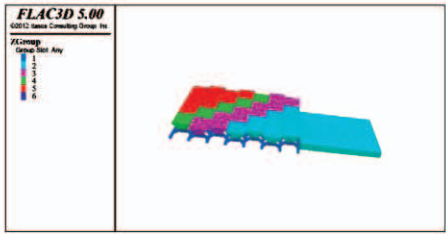


图 4 模型内部拉底和底部结构图

Fig. 4 Undercut and extraction level excavations of the model

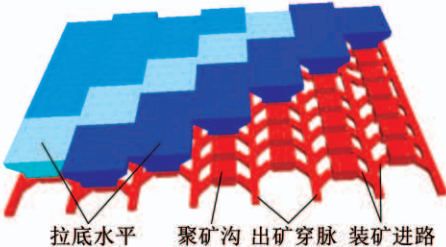


图 5 采场巷道名称

Fig. 5 Names of roadways in stope

2.2 强度准则

本次计算采用 Mohr-Coulomb 破坏准则,但其不能有效描述岩体中节理、裂隙及结构面对岩体强度的影响,而 Hoek-Brown 准则则可以准确表征含有大量节理、裂隙的岩体材料的破坏,故通过 Hoek-Brown 准则换算出与其等效的 Mohr-Coulomb 破坏准则中的黏聚力和内摩擦角,从而使 Mohr-Coulomb 破坏准则更好地适用于数值模型中的工程岩体.

在 FLAC3D 中, Mohr-Coulomb 破坏准则发生剪切屈服的条件为 $f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} < 0$, 其中 $N_\varphi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$, 式中: σ_1 为最大主应力(压应力为负); σ_3 为最小主应力; φ 为内摩擦角; c 为黏聚力. 发生拉伸屈服的条件为 $f_t = \sigma_3 - \sigma_1 > 0$, 式中 σ_1 为抗拉强度.

最大主应力 σ_1 为负数时, σ_1 的值越小表示压应力越大,最小主应力 σ_3 的值为正值时, σ_3 越大表示拉应力越大. 由上述公式可知,压应力和拉应力越大,岩体越易达到 $f_s < 0$ 的条件,即发生剪切屈服;最小主应力 σ_3 的值越大即拉应力越大,岩体越易达到 $f_t > 0$ 的条件,即发生拉伸屈服.

2.3 力学参数、边界条件与地应力施加

在铜矿峪矿进行矿岩现场取芯,然后制作成标准岩石试件,进行实验室测试. 将测定的岩石参数进行一定程度的折减弱化,从而得到能用于数值模拟的工程岩体的参数. 模拟需要的物理力学参数见表 2.

表 2 FLAC3D 模拟岩体的物理参数

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of rock mass simulated by FLAC3D

项目	弹性模量 E/GPa	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 C/MPa	切变模量 G/GPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	抗拉强度 σ_t/MPa	泊松比 μ
数值	5.99	2 740	6.6	2.45	42.58	6.62	0.22

数值模型内的垂直应力随深度线性变化,根据矿体埋藏深度和平均岩体密度($\rho = 2\,740\text{ kg/m}^3$),模型上部施加垂直方向应力,内部施加实测地应力,模型侧面限制水平移动,模型底面限制垂直移动.模型内部施加的实测地应力是通过应力解除法在测量区域未受采矿影响前获取的,先根据矿山地质条件、开采现状和施工条件选取测点,然后利用应力解除法测得各个测点的孔壁弹性应变,根据应力应变关系和实测的岩石弹性常数求解岩体应力.采用最小二乘法对所有测点的最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力值进行线性回归,得出了各个主应力值随埋深的变化规律.将矿山实际所得的地应力拟合方程进行坐标转换,成为本文数值模型内部可以施加的地应力方程如下:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= 22.895\,4 - 0.039\,9Z, \\ \sigma_y &= 11.648\,4 - 0.020\,4Z, \\ \sigma_z &= 14.660\,0 - 0.026\,9Z.\end{aligned}$$

2.4 模拟过程

- 本文建立的数值模型的模拟过程如下:
- 1) 导入模型,施加初始应力和边界条件,形成初始平衡,此时为矿岩处于原岩应力状态;
 - 2) 底部结构开挖,分析底部结构和出矿水平的应力状态;
 - 3) 拉底分3步阶梯式推进(如图4所示),矿山为了便于出矿和拉底的管理,拉底呈阶梯型沿矿体对角线方向水平推进,为了便于数值模拟,将矿山已有拉底空间根据年推进线近似划分了4个单元,图4中每个颜色代表1个单元,从右向左依次推进,只推进3个单元,第1个单元近似等于3年的拉底面积,第2、3个单元分别近似等于1年的拉底面积.分别分析拉底后底部结构和出矿水平的应力状态.

3 结果及分析

3.1 模拟结果

3.1.1 底部结构开挖后应力状态

出矿穿脉、聚矿沟和装矿进路开挖后,即形成底部结构,此时出矿水平周围最大主应力和最小主应力云图分别如图6(a)、图6(b)所示,聚矿沟周围最大主应力和最小主应力云图分别如图6(c)、图6(d)所示,所有云图中红色表示高应力区.

底部结构形成后,出矿水平和聚矿沟周围最大主应力云图中最大值为负值,所以是以压应力的形式存在的,主要集中在出矿穿脉和装矿进路的交叉口位置,最大应力值大小为38.4 MPa,由于巷道开挖后,其周围的岩体完整性降低,而且由三向应力状态变为两向应力状态,所以岩体强度会降低很多.由

Mohr-Coulomb 破坏准则可知, $f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} < 0$ 时,岩体会发生剪切屈服,因此随着压应力的增加容易达到剪切破坏的条件,故对于交叉口位置易发生剪切破坏.

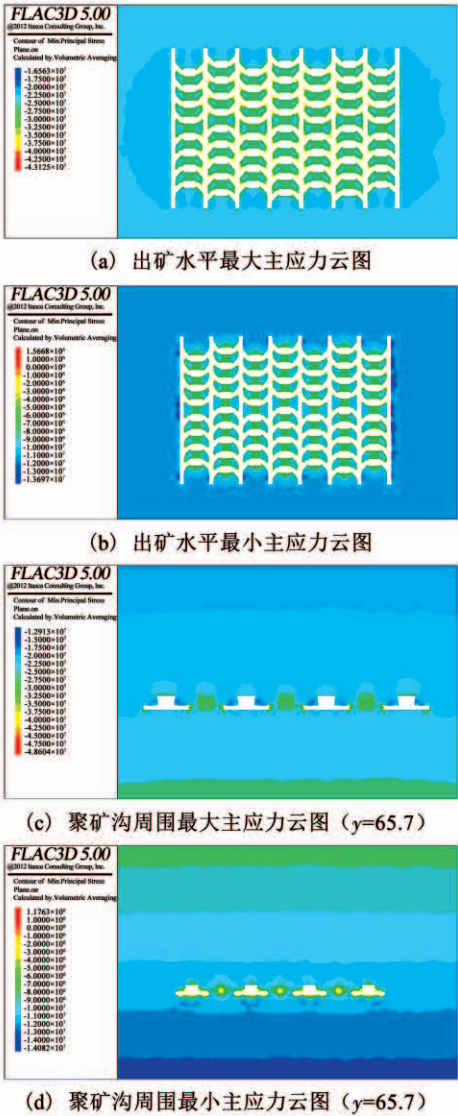


图6 底部结构开挖后模型应力云图

Fig. 6 Stress contour of the model after extraction level excavations formation

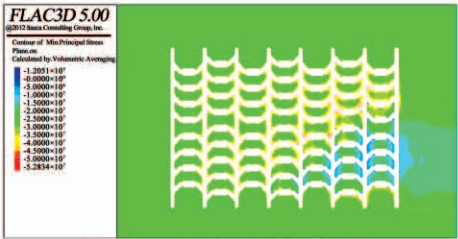
出矿水平和聚矿沟周围最小主应力云图中最大值为正值,所以以拉应力为主,主要集中出矿穿脉和装矿进路的交叉口位置,最大应力值大小为1.58 MPa,由于矿区内的凝灰岩脆性很高延展性很差,而且含有节理的岩体的抗拉强度会远小于岩石试件的抗拉强度,由于巷道开挖后,其周围的岩体完整性降低,所以抗拉强度会降低很多.由 Mohr-Coulomb 破坏准则可知, $f_t = \sigma_3 - \sigma_1 > 0$ 时,岩体会发生拉伸屈服,因此随着拉应力升高会逐渐达到拉伸破坏条件,故交叉口位置也易发生拉破坏.

综上所述,在底部结构形成后,应力集中位置主要在出矿穿脉和装矿进路交叉口位置,应加强交叉

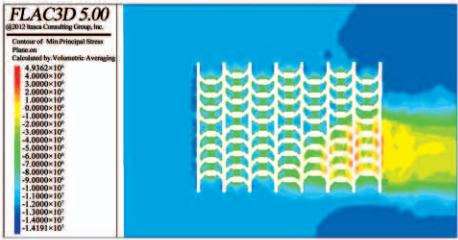
口位置的巷道支护,但对于底部结构整体而言并没有大范围处于应力集中区,所以底部结构初步形成后整体稳定性不受影响.

3.1.2 第 1 步拉底推进后应力状态

底部结构上方拉底层进行第 1 步推进后,推进面积为 18 000 m²,形成桃型矿柱,此时出矿水平周围最大主应力和最小主应力云图分别如图 7(a)、图 7(b)所示,桃型矿柱周围最大主应力和最小主应力云图分别如图 7(c)、图 7(d)所示.



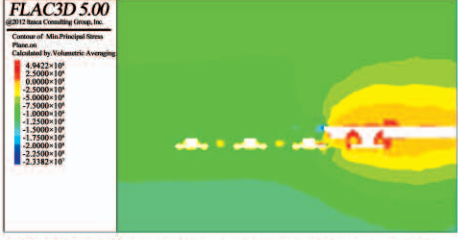
(a) 出矿水平最大主应力云图



(b) 出矿水平最小主应力云图



(c) 桃型矿柱周围最大主应力云图 (y=65.7)



(d) 桃型矿柱周围最小主应力云图 (y=65.7)

图 7 第 1 步拉底后模型应力云图

Fig. 7 Stress contour of the model after the first step undercutting

第 1 步拉底推进后,底部结构范围内最大主应力的应力高应力区为压应力,主要集中在拉底推进线前方底部结构,最大应力大小为 52.8 MPa,尤其是推进线前方的装矿进路和出矿穿脉的周围应力值较高.由压力拱理论可知,这是由于压力拱在推进线前方的应力集中造成的.拉底推进后,位于拉底层下方的底部结构压应力比最初底部结构形成时明显减

小,也验证了压力拱理论,开挖后岩体压力会向空间四周转移.初次拉底后底部结构最大压应力相比最初底部结构形成时增大 37.5%,由 Mohr-Coulomb 破坏准则可知,随着压应力的增加推进线前方的底部结构容易发生剪切破坏.

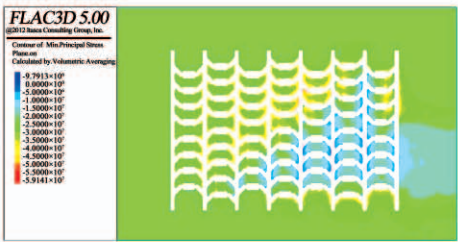
拉底推进后,底部结构范围内最小主应力高应力区为拉应力,主要集中部位为拉底层下方出矿穿脉和桃型矿柱周围,最大值达到 4.94 MPa,位于拉底层下方高应力集中区域范围也有明显扩大,未拉底前拉应力高应力区主要集中在出矿穿脉和装矿进路交叉口位置,拉底推进后,位于拉底层下方的桃型矿柱和出矿穿脉两帮都处于拉应力的应力高应力集中区,底部结构大范围处于受拉的状态.第 1 步拉底推进后拉应力值比最初底部结构施工后明显增大,增加了 2 倍,由 Mohr-Coulomb 破坏准则可知,随着拉应力的增加拉底空间下方的底部结构容易发生拉伸破坏.这主要是矿区水平主应力较高造成的,开挖空间受到高水平主应力的挤压,从而产生较高的拉应力.

3.1.3 第 2 步拉底推进后应力状态

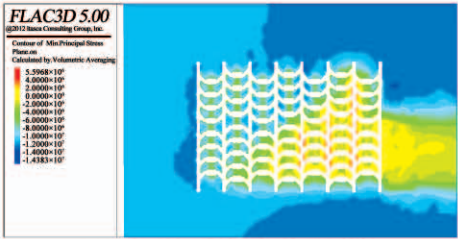
底部结构上方拉底层第 2 步推进面积为 7 650 m²,两步推进面积达到 25 650 m²,此时出矿水平周围最大主应力和最小主应力云图分别如图 8(a)、图 8(b)所示,桃型矿柱周围最大主应力和最小主应力云图分别如图 8(c)、图 8(d)所示.

第 2 步拉底推进后,底部结构范围内最大主应力的应力高应力区依然为压应力,拉底推进线前方底部结构最大压应力大小增加到 57.3 MPa,比初次拉底推进时增加 8.5%.由压力拱理论可知,随着压力拱跨度的增大,压力拱需要承担的上覆岩层的质量增加,所以压力拱范围内应力增加.第 2 步拉底推进后,原来处于推进线前方底部结构的高应力区压应力得到释放,变为 4 MPa,也验证了压力拱理论,开挖后岩体压力会向空间四周转移.

第 2 步拉底推进后,底部结构范围内最小主应力高应力区依然为拉应力,高应力区依然在拉底层下方出矿穿脉和桃型矿柱周围,最大拉应力值达到 5.6 MPa,比第 1 步拉底后的拉应力值增加 20%.原来在推进线前方处于压应力高应力区范围内的底部结构在拉底推进后位于拉应力的应力高应力区范围,此时底部结构由受压的状态变为受拉的状态.由 Mohr-Coulomb 破坏准则可知,在拉底推进线前方的底部结构易发生剪切破坏,随着拉底的推进,此处底部结构经历了压应力释放到拉应力集中的阶段,逐渐转为拉伸破坏,这就是高水平应力下自然崩落法底部结构在同一位置反复来压的原因.



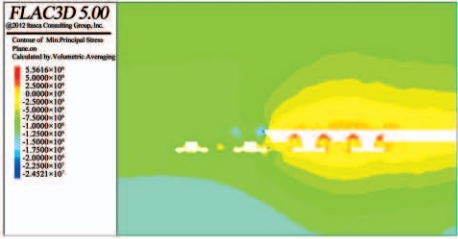
(a) 出矿水平最大主应力云图



(b) 出矿水平最小主应力云图

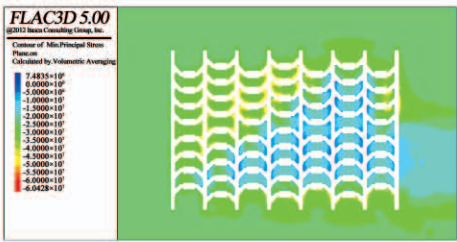


(c) 桃型矿柱周围最大主应力云图 ($y=65.7$)

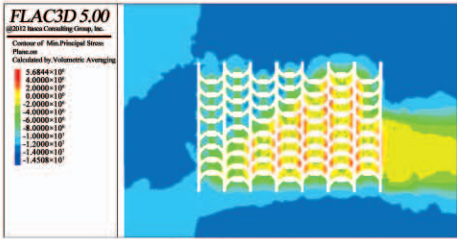


(d) 桃型矿柱周围最小主应力云图 ($y=65.7$)

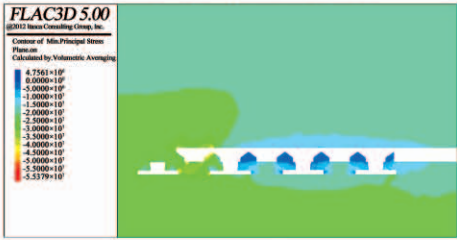
图 8 第 2 步拉底后模型应力云图



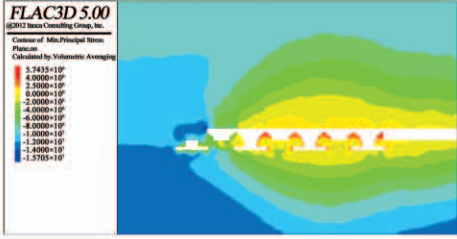
(a) 出矿水平最大主应力云图



(b) 出矿水平最小主应力云图



(c) 桃型矿柱周围最大主应力云图 ($y=65.7$)



(d) 桃型矿柱周围最小主应力云图 ($y=65.7$)

图 9 第 3 步拉底后模型应力云图

Fig. 8 Stress contour of the model after the second step undercutting

Fig. 9 Stress contour of the model after the third step undercutting

3.1.4 第 3 步拉底推进后应力状态

底部结构上方拉底层第 3 步推进面积为 4 500 m², 3 步推进面积达到 30 150 m², 此时出矿水平周围最大主应力和最小主应力云图分别如图 9(a)、图 9(b) 所示, 桃型矿柱周围最大主应力和最小主应力云图分别如图 9(c)、图 9(d) 所示。

第 3 步拉底推进后, 底部结构范围内最大主应力的压应力区依然为压应力, 拉底推进线前方底部拉底推进时增加 5.4%。第 3 步拉底推进后, 原来处于第 2 步推进线前方底部结构的高应力区压应力得到释放, 变为 4 MPa。

第 3 步拉底推进后, 底部结构范围内最小主应力高应力区依然为拉应力, 高应力区依然在拉底层下方出矿穿脉和桃型矿柱周围, 最大拉应力值达到 5.74 MPa, 比第 2 步拉底后的拉应力值增加 2.5%, 拉应力增加幅度变小。原来在第 2 步推进线前方处

于压应力高应力区范围内的底部结构在拉底推进后位于拉应力的高应力区范围, 底部结构由受压的状态变为受拉的状态。

3.2 应力演化规律分析

在数值仿真模拟过程中布置应力监测点, 监测每一步开挖后的应力状态, 可以发现底部结构同一位置(第 1 步拉底推进线前方出矿穿脉和装矿进路交叉口位置, $X=179, Y=103.1, Z=1$)在拉底前后的应力变化规律如图 10 所示, 图中第 0 步为形成底部结构未拉底时的应力状态, 第 1 步为初次拉底推进, 监测点位于拉底推进线前方, 经过第 2、3 步拉底后, 监测点位于拉底层下方的底部结构。

从图 10 中可以发现, 在第 1 步拉底推进后, 推进线前方底部结构最大主应力值由拉底前的 33.4 MPa 迅速增加到 51.1 MPa, 符号为负, 此时推进线前方的底部结构处于压应力集中的区域, 经过第 2 步拉底后, 此时监测点位置底部结构位于拉底

层下方,此时压应力迅速降低到 7.6 MPa,而最小主应力变成正值,增加到 5.34 MPa,处于受拉的状态,此时监测点位置底部结构处于拉应力集中区域。

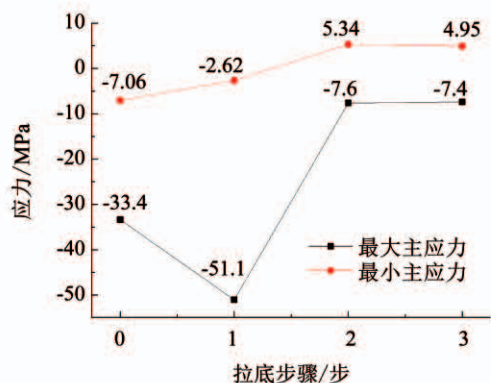


图 10 拉底前后底部结构同一位置应力变化规律

Fig. 10 Stress variation law of extraction level excavations at the same position before and after undercutting

推进线前方底部结构最大主应力最大值随拉底面积的增加的变化规律如图 11 所示。拉底面积为 0 时,表示形成底部结构未拉底时应力状态。从图 11 中可发现随拉底面积的不断增大,推进线前方的最大主应力值不断增加,压应力集中程度逐渐明显。

底部结构最小主应力最大值随拉底面积的增加的变化规律如图 12 所示。拉底面积为 0 时,表示形

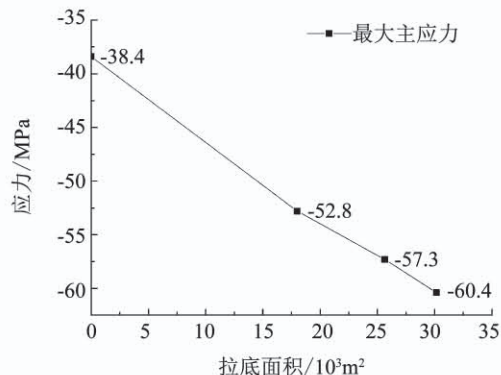


图 11 最大主应力随拉底面积的增加的变化规律

Fig. 11 Variation law of maximum principal stress with the increase of undercut area

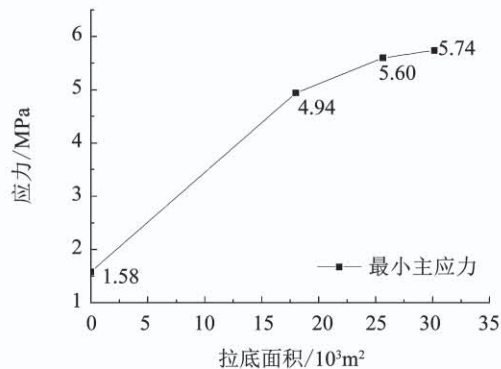


图 12 最小主应力随拉底面积的增加的变化规律

Fig. 12 Variation law of minimum principal stress with the increase of undercut area

成底部结构未拉底时的应力状态,拉应力集中的高应力区位于拉底层下方的底部结构。从图 12 中可以发现随着拉底面积的不断增大,推进线后方的最小主应力值不断增加,拉应力集中程度逐渐明显。

4 地压灾害演化机理分析

通过数值仿真模拟研究可以发现在高水平应力下的自然崩落法开采过程中,随着拉底爆破的推进,底部结构的受力呈现“先受压,后受拉”的应力变化规律。自然崩落法采矿拉底后,会在拉底空间周围形成压力拱,空间形态近似为长轴在拉底推进的方向,短轴沿着拉底推进线方向的鸡蛋形厚壁结构。采场就被这个结构所包围,压力拱内岩体处于应力升高区。随着拉底面积的不断增大,拉底空间上方压力拱承担的上覆岩层质量不断增加,推进线前方底部结构所受压应力就会不断增加,集中程度就会变得更加明显,由 Mohr-Coulomb 破坏准则可知, $f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} < 0$ 是岩体发生剪切破坏的条件,压应力越大, f_s 越趋近于小于 0。当推进线前方的底部结构所受的压应力逐渐增大达到岩体剪切破坏条件时,就会出现地压破坏现象。随着拉底爆破的继续推进,原来处于受压的底部结构逐渐转移到拉底空间下方,受较高水平地应力的影响,开挖空间受到挤压,又逐渐转为受拉的状态,随着拉底空间的不断增加,拉应力集中程度越来越明显,由 Mohr-Coulomb 破坏准则可知, $f_t = \sigma_3 - \sigma_1 > 0$ 是岩体发生拉伸破坏的条件,拉应力越大, f_t 越趋近于小于 0。当底部结构所承受的拉应力不断增加达到岩体拉伸破坏条件时,就会再次出现地压破坏现象,所以在矿山生产过程中会呈现反复来压的现象,随着拉底面积的增大,应力值逐渐增加,地压显现强度也会增加。

根据现场调研,对历史地压显现次数和面积进行统计,研究发现 530 中段底部结构地压显现发生在拉底推进线附近的次数有 5 次,影响面积达 4 300 m²,发生在拉底推进线后方的重复地压显现有 3 次,影响面积达 2 500 m²。现场调研的地压显现规律与数值模拟研究得出的地压演化规律一致。

5 结 论

1) 随着拉底爆破的推进,推进线前方的底部结构逐渐产生压应力集中,而且随着拉底面积增加,压应力集中程度更加明显,当推进线前方的底部结构所受的压应力逐渐增大达到岩体剪切破坏条件时,就会出现地压破坏现象。拉底推进过后,拉底空间下方的底部结构,压应力集中得到释放。

2) 位于拉底层下方的底部结构呈现拉应力集

中,随着拉底面积增加,拉应力集中程度更加明显,当底部结构所承受的拉应力不断增加达到岩体拉伸破坏条件时,就会再次出现地压破坏现象。

3)在高水平应力下,自然崩落法底部结构会呈现“先受压,后受拉”应力规律,随着拉底面积的增加,压应力和拉应力集中程度越来越明显,在实际生产中呈现底部结构反复来压的现象。

参考文献

- [1] HURTADO J P, DÍAZ N, ACUNA E I, et al. Shock losses characterization of ventilation circuits for block caving production levels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 41: 88. DOI: 10.1016/j.tust.2013.11.010
- [2] WOO K S, EBERHARDT E, ELMO D, et al. Empirical investigation and characterization of surface subsidence related to block cave mining[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 61: 31. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.01.015
- [3] PIERCE M E. Forecasting vulnerability of deep extraction level excavations to draw-induced cave loads[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11(3): 527. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.07.006
- [4] SANCHEZ V, CASTRO R, PALMA S. Gravity flow characterization of fine granular material for block caving[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 114: 24. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.12.011
- [5] RAFIEE R, ATAIE M, KHALOOKAKAIE R, et al. Numerical modeling of influence parameters in cavability of rock mass in block caving mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 105: 22. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.03.001
- [6] 王青,任凤玉. 采矿学[M]. 2版. 北京:冶金工业出版社,2011
WANG Qing, REN Fengyu. *Mining science*[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011
- [7] XIA Zhiyuan, TAN Zhuoying, PEI Qingyan, et al. Ground pressure damage evolution mechanism of extraction level excavations induced by poor undercutting in block caving method[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019, 37(3): 1. DOI: 10.1007/s10706-019-00921-1
- [8] TRUEMAN R, PIERCE M, WATTIMENA R. Quantifying stresses and support requirements in the undercut and production level drifts of block and panel caving mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(5): 617. DOI: 10.1016/S1365-1609(02)00060-6
- [9] FLORES G. A new mining sequence to minimise stability problems in block caving mines[D]. Golden, CO: Colorado School of Mines, 1993
- [10] 者亚雷,侯克鹏,程涌,等. 自然崩落法底部结构应力状态研究[J]. *金属矿山*, 2018(2): 61
ZHE Yalei, HOU Kepeng, CHENG Yong, et al. Research on bottom structural stress state by natural caving method[J]. *Metal Mine*, 2018(2): 61. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.201802011
- [11] 梁江波,刘华武,冯兴隆. 自然崩落法超前拉底数值模拟研究[J]. *矿业研究与开发*, 2017, 37(2): 93
LIANG Jiangbo, LIU Huawu, FENG Xinglong. Numerical simulation study on advanced undercutting in block caving method[J]. *Mining Research and Development*, 2017, 37(2): 93. DOI: 10.13827/j.cnki.kyyk.2017.02.022
- [12] 丁亦敏. 自然崩落法底部结构应力分布的研究[J]. *有色金属(矿山部分)*, 1995(3): 20
DING Yimin. Research on stress distribution of extraction level excavations in block caving method[J]. *Non-ferrous Metals (Mine Part)*, 1995(3): 20
- [13] DIERING J, STACEY T. Three-dimensional stress analysis: A practical tool for mining problems[C]//*Proceedings of the 20th International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries*. Johannesburg, SAIMM; APCOM, 1987: 33
- [14] ESTERHUIZEN G. Three-dimensional stress analysis of block caving layouts[C]//*Proceedings of the 20th International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industries*. Johannesburg, SAIMM; APCOM, 1987: 43
- [15] 范文录,刘育明,葛启发. 自然崩落法拉底过程底部结构稳定性研究[J]. *中国矿山工程*, 2017, 46(1): 1
FAN Wenlu, LIU Yuming, GE Qifa. Study on bottom structure stability in the undercutting process of block caving[J]. *China Mining Engineering*, 2017, 46(1): 1
- [16] 王宁,韩志型. 金川贫矿区自然崩落法采场底部结构的稳定性[J]. *有色金属*, 2004, 56(3): 79
WANG Ning, HAN Zhixing. Base stability of Jingchuan lean ore area mining by natural caving method[J]. *Nonferrous Metals*, 2004, 56(3): 79
- [17] 周杭. 基于PFC2D自然崩落法底部结构受力变化规律研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2017
ZHOU Hang. Research on force change law of extraction level excavations based on PFC2D block caving method[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017

(编辑 张红)