

复杂边界条件下 VCR 法采场安全破顶厚度研究

汪伟¹, 罗周全¹, 齐飞翔¹, 曹胜祥²

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 凡口铅锌矿, 广东韶关 512325)

摘 要: 为确定凡口矿某 VCR 法采场安全破顶厚度, 构建了“三固一简”边界条件下破顶层极限承载分析模型, 推导分析了破顶层承载能力随厚度变化关系, 并从力学角度计算最小破顶厚度为 4.6 m。为获得塑性区体积、竖向最大位移、安全率等指标随破顶厚度变化规律, 对不同厚度破顶层的稳定性进行数值分析。研究表明, 破顶厚度由 5 m 减至 4 m 时, 塑性区由部分贯通发展至完全贯通, 安全指标突变至不利状态, 与力学计算结果相印证。参考类似矿山安全系数取值, 确定试验采场安全破顶厚度为 6~7 m。实际爆破中, 预留破顶层(厚约 6.5 m)始终稳定, 表明研究结果与实际情况的吻合度较好。

关键词: VCR 采矿法; 破顶层; 边界条件; 塑性极限分析; 数值模拟

中图分类号: TD 853 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)05-0721-05

Safe Roof Blasting Thickness of VCR Stope Under Complex Boundary Condition

WANG Wei¹, LUO Zhou-quan¹, QI Fei-xiang¹, CAO Sheng-xiang²

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Fankou Lead-Zinc Mine, Shaoguan 512325, China. Corresponding author: WANG Wei, E-mail: csu424@163.com)

Abstract: In order to determine safe roof blasting thickness of a VCR stope in Fankou mine, a mechanical ultimate-bearing analysis model of roof blasting under complex boundary condition (three sides fixed and one side supported) was constructed, the relationship between bearing capacity and roof blasting thickness was derived, and the minimum roof blasting thickness was calculated as 4.6 m. Accordingly, numerical simulations of blasting roof stability under various thicknesses were carried out to obtain the changing law between indexes (plastic zone volume, maximum vertical displacement and safety coefficient) and thickness. Research results show that safety indexes change obviously and plastic zone develops into complete connection when roof blasting thickness decreases from 5 m to 4 m, which proves the rationality of mechanical analysis. Referring to safety coefficient of similar mines, safe roof blasting thickness is revised as 6~7 m. In practice, the fact that the blasting roof of 6.5 m thickness keeps safe all the time indicates that the results fit well with actual situation.

Key words: VCR mining method; roof blasting; boundary condition; plastic limit analysis; numerical simulation

我国正处于工业化中期阶段, 矿产资源需求量持续大幅增长, 以高阶段、大直径深孔爆破为特征的高效率采矿方法已成为矿山发展的必然选择。其中, 又以 VCR 法(垂直深孔球状药包后退式崩矿法)颇具代表性, 该采矿方法最初于加拿大试验成功, 因回采效率高而得到快速推广。作为

国内最早引进并应用 VCR 法的矿山, 凡口铅锌矿因地制宜, 从装药结构、拉槽方式、崩矿方法和出矿结构等方面入手, 全面改进 VCR 法, 在此基础上推出的“凡口铅锌矿大孔径深孔采矿法”荣获国家科技进步二等奖, 取得了显著的技术经济成果。然而, 矿山在 VCR 法设计时, 仍有一些参数难

以确定,其中之一便是破顶厚度(即拉槽区最后一次爆破并破穿上部硐室的厚度),这与矿山 VCR 法的崩矿方式(切槽-全孔侧向崩矿和切槽-分段侧向崩矿)紧密相关。生产实践表明,破顶厚度过大,易造成爆破形成的自由面不平整,不利于侧向崩矿且容易崩落废石造成贫化^[1]。厚度过小,则可能发生破顶层“未爆而先塌”的事故。因此,在保证安全的前提下,确定尽可能小的破顶厚度(安全破顶厚度)对于提高回采爆破效率意义重大。

目前,关于 VCR 采场破顶厚度的研究较少,且多是单一数值模拟^[2],缺乏对实际情况,尤其是对破顶层结构和边界条件的分析。而在生产实践中,设计部门为保证安全,通常根据主观经验预留过大的破顶厚度,牺牲了回采爆破效果。为此,本文以凡口矿某 VCR 法试验采场为对象,针对其与充填体相邻的复杂边界情况,综合运用塑性极限分析法和数值模拟手段,分析获得破顶层承载能力随厚度变化规律,进而考虑应力突变、地下水等不可预见因素影响,修正确定安全破顶厚度,以期采场爆破设计提供有效参考。

1 工程概况

图 1 为矿山 -600 m 中段 VCR 法试验采场设计资料。采场上部布置凿岩硐室,用潜孔钻机自凿岩硐室打竖直钻孔穿透至下部出矿硐室。采场计划分 6 次爆破,崩矿方式为切槽-分段侧向崩矿,即每次爆破时,以采场东头布置的 4 个空心大孔为补偿空间,逐圈逐层爆破形成拉槽区,西头矿石采用侧向爆破崩落。采场第 6 次爆破破顶,预留 9 m 厚破顶层,设计崩矿量 11 900 t,炸药单耗 0.334 kg/t,最大段药量 385 kg。采场下部为平底出矿结构,出矿采用进口遥控铲运机,空区采用嗣后充填。

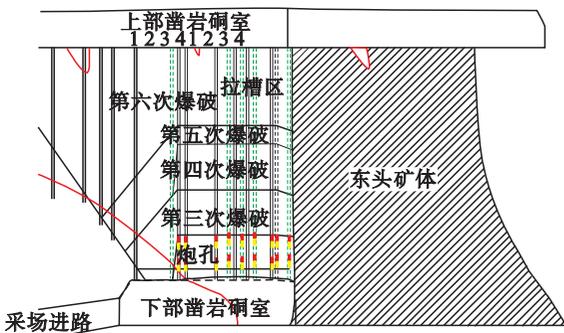


图 1 采场爆破设计
Fig. 1 Stope blasting design

该采场位于深部 -550 ~ -600 m 中段,北帮为充填体,东头和南帮均为矿体,西头以矿岩边界为爆破控制线。矿体平均倾角 40°,平均厚度 23.3 m。矿石 f 系数为 4 ~ 17,围岩 f 系数为 8 ~ 10。采场周边充水源为深层裂隙承压水,含水层富水性弱,水文地质条件简单。根据生产设计资料,运用 Surpac 软件建立采场三维实体模型和块体模型,导出数据经 Access 数据库编程转换为 FLAC^{3D} 可读取的文本格式,由此生成采场数值分析模型,见图 2。

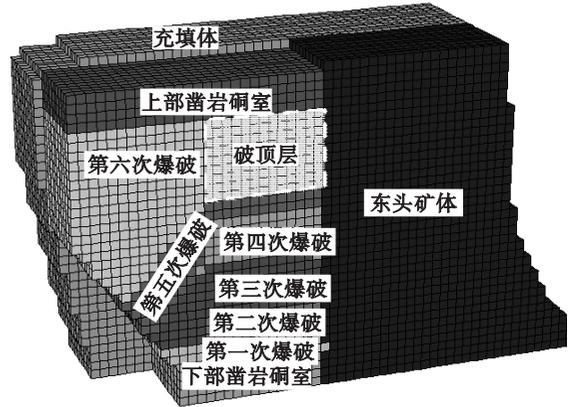


图 2 采场数值分析模型
Fig. 2 Numerical analysis model of stope

如图 2 所示,破顶层布置于采场东头,其作用是为西头侧向崩矿创造自由面和补偿空间,同时也是拉槽区爆破装药的平台。就爆破效果而言,破顶层厚度越小越好。然而,盲目减小厚度,可能导致破顶层“未爆而先塌”,因此,选择合理破顶厚度尤为重要。

2 破顶层极限承载力学分析

2.1 力学模型构建

采用塑性极限法分析破顶层承载问题^[3-4]。破顶层由铅锌矿体(脆性材料)组成,因此,破顶层底板的弹性变形相对较小,不会因一点的屈服而完全破坏,而是随着承载的增加,屈服不断发展,形成一条条塑性绞线。只要底板保持几何不可变性,塑性绞线便持续发展,直至底板完全破坏,并将其分割为若干个体。如图 3 所示,破顶层北帮为强度较小的胶结充填体,其余三边均为铅锌矿体。参照类似边界条件确定方法^[5],将充填体边界定义为简支边,其余边界为固支边,即破顶层力学分析模型的边界条件为三边固支一边简支。

破坏过程中,塑性绞线在固支边界与之重合,在简支边界则不形成,且底板受上覆均布荷载作

用形成的塑性绞线关于中心线对称^[6]。综合上述分析,建立破顶层底板的极限承载分析模型,如图 4 所示。设底板长为 l ,宽为 b ,塑性绞线交点距东西边界的距离相等,设为 x ,交点距北帮筒支边界的距离设为 y 。

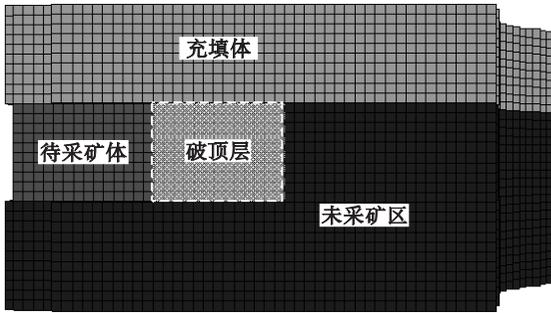


图 3 破顶层边界情况

Fig. 3 Boundary condition of blasting roof

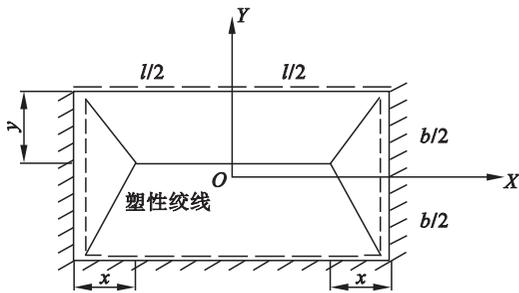


图 4 破顶层极限承载分析模型

Fig. 4 Bearing analysis model of blasting roof

2.2 受力分析

设破顶层底板的最大虚位移为 δ ,其极限弯矩为 M_s ,上覆均布载荷为 q 。根据定义, q 在虚位移 $W(x,y)$ 上所作的外力功为

$$W_e = \sum_{j=1}^n \left(\iint_{A_j} q W(x,y) dA_j \right) = q \sum_{j=1}^n V_j \quad (1)$$

式中 n 为塑性绞线所划分的块体数目; V_j 为第 j 板块的体积。

展开式(1),得到外力功表达式:

$$W_e = q \left[\frac{1}{6} \alpha (b-y)(3l-4x) + \frac{1}{6} \delta y (3l-4x) + \frac{1}{6} \delta b x + \frac{1}{6} \delta x \right] = \frac{1}{6} \delta b q (3l-2x) \quad (2)$$

内力功为极限弯矩 M_s 在塑性旋转轴上的投影与板的相应转角 θ 以及投影长度的乘积,即

$$W_i = \sum_{j=1}^n (M_{s_j} L_j \theta_j) \quad (3)$$

式中 θ_j 为 j 板块的法向转角; M_{s_j} 为 M_s 在塑性旋转轴上的投影; L_j 为总投影长度。

展开式(3),得到内力功表达式:

$$W_i = 2M_s l \frac{\delta}{b-y} + M_s l \frac{\delta}{y} + 4M_s b \frac{\delta}{x} \quad (4)$$

破顶层底板由于塑性绞线发展而处于临界破坏状态时,其所受外力和内力仍处于平衡,则根据虚功原理^[7],此时外力功等于内力功,即

$$W_e = W_i \quad (5)$$

联立式(3)~式(5)解得底板承载为

$$q_s = \frac{6M_s [\alpha (b+y) + 4by(b-y)]}{(3l-2x)(b-y)bx} \quad (6)$$

令 $dq/dx=0$, $dq/dy=0$ 对 q_s 求极值得到

$$\left. \begin{aligned} x &= lK_1 k^2, \\ y &= (\sqrt{2}-1)b. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

将式(7)结果代入式(6),得到底板极限破坏载荷 q_m :

$$\left. \begin{aligned} q_m &= \frac{6M_s K_2}{(3-2\sqrt{2})(3-2K_1 k^2)l^2 k^2}, \\ M_s &= \frac{\sigma_t h^2}{6}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 $k=b/l$; σ_t 为破顶层矿体的抗拉强度; h 为破顶层厚度;

$$K_1 = 8 \sqrt{(272-192\sqrt{2}) + (18-12\sqrt{2})/k^2};$$

$$K_2 = 8\sqrt{2} - 12 + K_1.$$

2.3 最小安全破顶厚度

计算参数按实际情况取值: $l=13\text{ m}$, $b=10\text{ m}$, $k=0.77$, $\sigma_t=2.32\text{ MPa}$, 矿石容重 $\gamma=34.6\text{ kN/m}^3$,按 γh 计算上覆均布载荷 q ,得到不同破顶厚度下均布载荷与极限破坏载荷的关系(见图 5)。

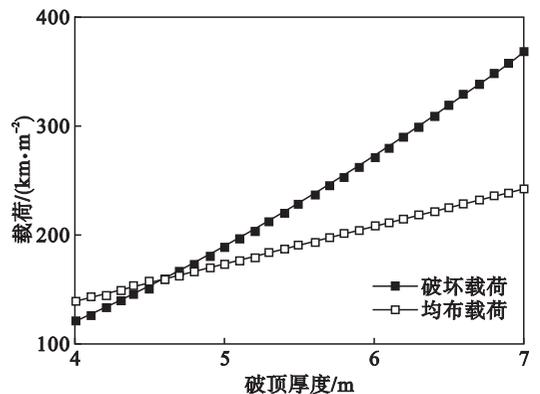


图 5 不同破顶厚度下均布载荷与极限破坏载荷
Fig. 5 Uniform load and ultimate bearing load under different roof-blasting thickness

如图 5 所示,当破顶厚度小于 4.6 m 时,底板均布载荷超过极限破坏载荷,达到完全破坏状态。而当破顶厚度大于 4.6 m 时,均布载荷小于极限破坏载荷,底板将处于安全有利状态。因此,从力学角度确定最小安全破顶厚度为 4.6 m。

3 破顶层稳定性数值分析

3.1 初始地应力场

开采之前进行现场取样,采集围岩、铅锌矿体和充填体等 3 种岩样,加工成标准试件,进行岩石力学参数试验.对所获得的岩石力学参数试验数据,采用霍克布朗强度准则折减处理,得到用于数

值分析的岩体物理力学参数.原岩应力数据为课题组于矿山 -550 m 至 -650 m 中段采用 LUT 套孔应力系统实测获得,见表 1.基于实测原岩应力,初始地应力场反演采用自重应力场和构造应力场的叠加.通过快速应力边界法施加边界载荷,求解平衡后清零节点速度和位移,对模型边界施加固定位移约束,再次求解平衡,生成初始地应力场.

表 1 原岩应力实测结果
Table 1 Measured result of in-situ stress

测点	坐标(x, y, z)/m	主应力值/MPa			方位角/(°)			倾角/(°)		
		σ_1	σ_2	σ_3	β_1	β_2	β_3	α_1	α_2	α_3
1#	(8 418.607, 2 644.008, -648.500)	31.75	25.32	11.85	20.49	286.97	148.89	14.02	17.73	76.05
2#	(8 254.220, 2 589.970, -648.800)	33.21	24.26	12.74	32.64	290.92	139.92	11.68	14.52	79.86
3#	(8 353.579, 2 614.794, -548.600)	25.67	22.84	12.36	35.36	293.78	152.79	25.38	28.47	60.42

3.2 破顶层稳定性数值分析

根据力学计算结果,确定 4 组数值模拟方案,对应破顶厚度为 4, 5, 6 和 7 m.分析采用摩尔库伦本构模型,按采场计划爆破顺序进行开挖模拟,获得不同破顶厚度下塑性区破坏情况(见图 6).

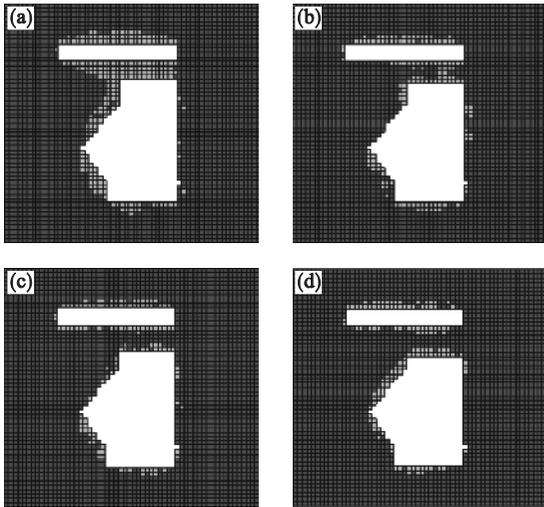


图 6 不同破顶厚度下塑性破坏情况
Fig. 6 Plastic collapse under different roof blasting thickness
(a)—4 m;(b)—5 m;(c)—6 m;(d)—7 m.

如图 6 所示,随着厚度的减少,破顶层内塑性破坏范围逐渐增加(灰色标记).当厚度为 5 m 时,层内破坏部分贯通,而当厚度减小至 4 m 时,层内破坏已完全贯通.模拟过程中,在破顶层内设置监测点,记录位移和塑性区体积变化,并用“history write”命令读取监测结果,其变化规律见图 7.同时,按式(9)^[8]计算破顶层的安全率 S:

$$S = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi + 2c \cos \varphi}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (9)$$

式中: σ_1 为最大主应力; σ_3 为最小主应力; φ 为内摩擦角; c 为内聚力.工程应用中,通常定义安全率取值大于 2 时^[9],系统是安全的.由此得到不同破顶厚度下安全率变化情况,见图 7.

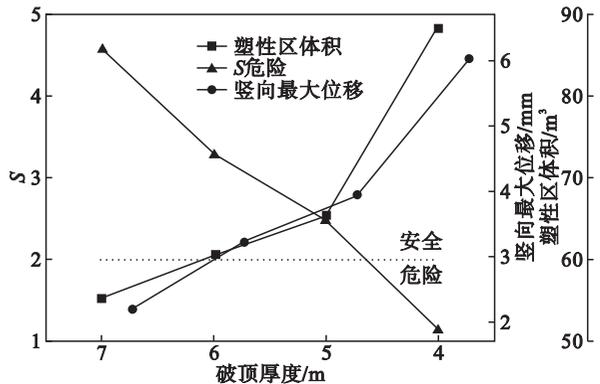


图 7 塑性区体积、竖向最大位移及 S 的变化
Fig. 7 Change of plastic zone volume, maximum vertical displacement and S

图 7 表明,随着厚度的减小,破顶层稳定性明显下降.特别是当层厚由 5 m 减少至 4 m 时,塑性破坏体积和竖向最大位移均发生突变,对应安全率减小到 2 以下(危险状态),反映了破顶层由局部破坏发展至完全破坏的过程.数值模拟结果较好地验证了力学计算的合理性,即当厚度减少至 4.6 m 时,破顶层逐渐达到完全破坏状态.

实际开采过程中,不可预见因素如应力突变、地下水、工程扰动等,也是影响破顶层稳固性的重要因素.因此,参照类似地下金属矿山设计经验^[10](安全系数取 1.3 ~ 1.5),修正力学分析和

数值模拟结果,确定试验采场安全破顶厚度为6~7 m.

4 结 论

1) 以凡口矿某VCR法试验采场为对象,针对其北帮为充填体的复杂边界情况,构建了“三固一简”边界条件下的破顶层极限承载分析模型,通过塑性极限法分析破顶层承载能力随厚度变化关系,从力学角度确定采场最小安全破顶厚度为4.6 m.

2) 通过不同厚度下破顶层稳定性的数值分析,得到:当破顶厚度由5 m减至4 m时,破坏响应指标突变至不利状态,塑性破坏由部分贯通发展至完全贯通,验证了力学计算的合理性.考虑应力突变、地下水、工程扰动等不可预见因素,修正确定试验采场安全破顶厚度为6~7 m.

3) 试验采场的实际爆破情况为:原设计预留9 m厚的破顶层,后参考本文研究结果,改为6.5 m厚.实际爆破过程中,破顶层始终保持稳定,表明研究结果与实际情况有较好的吻合度.

参考文献:

- [1] Zhao X D, Li L C, Tang C A, et al. Stability of boundary pillars in transition from open pit to underground mining[J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(11): 3256 - 3265.
- [2] 黄刚海. 基于数值模拟监测值突变特征确定工程参数[J].

岩土力学 2013, 34(sup2) : 439 - 442.

(Huang Gang-hai. Determination of engineering parameters based on mutable characteristics of monitored values in numerical simulation[J]. *Rock and Soil Mechanics* 2013, 34(sup2) : 439 - 442.)

- [3] Sutcliffe D J, Yu H S, Sloan S W. Lower bound solutions for bearing capacity of jointed rock[J]. *Computers and Geotechnics* 2004, 31(1) : 23 - 36.
- [4] William F H. Metal forming-mechanics and metallurgy [M]. Cambridge : Cambridge University Press, 2007.
- [5] Grasselli G. 3D behaviour of bolted rock joints : experimental and numerical study[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 2005, 42(1) : 13 - 24.
- [6] Nomikos P P, Sofianos A I, Tsoutrelis C E. Structural response of vertically multi-jointed roof rock beams[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002, 39(1) : 79 - 94.
- [7] Hung C F, Hsu R Y, Hwang-Fuu J J. Elastic shock response of an air-backed plate to under water explosion[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(2) : 151 - 168.
- [8] Luo Z Q, Xie C Y, Jia N, et al. Safe roof thickness and span of stope under complex filling body[J]. *Journal of Central South University* 2013, 20(12) : 3641 - 3647.
- [9] 郑磊, 高玉宝. 多空区条件下崩落放顶过程的地压显现与矿柱稳定性研究[J]. 有色金属(矿山部分) 2010, 62(4) : 11 - 14.
(Zheng Lei, Gao Yu-bao. Study of ground pressure appearance and pillars stability in caving mining with multi-mined-out areas[J]. *Nonferrous Metals (Mine Section)*, 2010, 62(4) : 11 - 14.)
- [10] Zheng Y R, Tang X S, Zhao S Y, et al. Strength reduction and step-loading finite element approaches in geotechnical engineering[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 2009, 1(1) : 21 - 30.

(上接第 705 页)

- [5] Huang B, Sun Y, Sun Y M, et al. A hybrid heuristic search algorithm for scheduling FMS based on Petri net method[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing System*, 2010, 48(9/10/11/12) : 925 - 933.
- [6] Jensen K. An introduction to the theoretical aspects of colored Petri nets[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 1994, 803 : 230 - 272.
- [7] Wang L C. Objected-oriented Petri nets for modeling and analysis of automated manufacturing systems[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 1996, 9(2) : 111 - 125.
- [8] Meng X L. Modeling of reconfigurable manufacturing systems based on colored timed object-oriented Petri nets

[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2010, 29(2) : 81 - 90.

- [9] 罗雪山. 基于对象Petri网的离散事件系统建模仿真环境[J]. 计算机仿真 2000, 17(3) : 42 - 44.
(Luo Xue-shan. A discrete event system based on object Petri net modeling and simulation environment[J]. *Computer Simulation* 2000, 17(3) : 42 - 44.)
- [10] 大连理工大学. 污水综合排放标准: DB21/1627—2008 [S]. 沈阳: 辽宁省环境保护厅, 2008.
(Dalian University of Technology. Integrated wastewater discharge standard : DB21/1627—2008 [S]. Shenyang : Department of Environmental Protection of Liaoning Province, 2008.)