

基于 FLAC^{3D} 的谦比希铜矿盘区保安矿柱稳定性分析

Stability Analysis of Safety Pillar in Chambishi Copper Mine Panel based on FLAC^{3D}

杨清平¹, 陈志强², 王红心²

(1. 中色非洲矿业有限公司, 赞比亚 基特韦; 2. 北京金诚信矿山技术研究院有限公司, 北京 101500)

摘要: 井下开采时, 每隔一定距离经常留设一定厚度的保安矿柱与围岩共同作用来支撑上覆岩层维持采场结构稳定, 实现矿体安全回采。谦比希铜矿东南矿体采用预切顶空场嗣后充填法条带式开采, 分两步骤回采, 盘区间留设 25 m 厚的保安矿柱。为分析盘区间留设的保安矿柱稳定性, 同时为后期优化开采提供借鉴, 本文运用 FLAC^{3D} 数值模拟软件, 分别模拟 25 m、23 m、21 m、19 m、17 m 及 15 m 厚度矿柱在二步骤采场开挖完成后应力、位移及塑性区情况。研究结果表明矿柱厚度尺寸在 19 m 及以上时, 可满足其稳定性要求。同时, 现场观察显示, 二步骤采场回采完成后, 盘区间留设的 25 m 厚矿柱结构良好, 未发生片帮等现象。

关键词: FLAC^{3D}; 保安矿柱; 厚度; 稳定性

中图分类号: TD323

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2022)01-0012-05

Abstract: During underground mining, a safety pillar with a certain thickness is often left at certain interval to work together with the surrounding rock for supporting the overlying strata to maintain the structure of the stope and enabling a safe extraction of the ore body. The southeast ore body of Chambishi Copper Mine adopts the strip mining approach of pre-cut headspace open stoping with subsequent backfilling, where extraction is carried out in two steps with 25 m-thick safety pillars left in place between the panels. To analyze the stability of the safety pillars left between the panels and provide a reference for later optimization of mining, this paper uses the FLAC^{3D} numerical simulation software to analyze the stress, displacement and plastic zones of the 25 m, 23 m, 21 m, 19 m, 17 m and 15 m thick pillars respectively after the excavation of the two-step stope is completed. The research results show that pillars with a thickness of 19 m and more can meet the stability requirements. Meanwhile on-site observation shows that after the extraction of the two-step stope is completed, the 25 m-thick pillars left between the panels have a perfect structure, and no phenomenon such as wall caving has ever occurred, indicating that their stability is excellent.

Key words: FLAC^{3D}; safety pillar; thickness; stability

1 前言

地下开采过程中, 常留设一定厚度的保安矿柱与围岩共同作用来支撑上覆岩石, 以此来保持采场结构稳定, 实现矿体安全回采。但是保安矿柱留设过大、过多, 将造成资源的浪费, 不利于矿山的可持续发展; 若保安矿柱留设不足, 矿柱承载力不够将发生失稳破坏, 威胁井下人员和设备安全。因此, 研究留设保安矿柱不同厚度的稳定性, 不仅对维持采场结构稳定、实现井下安全高效回采具有重大意义, 同

时可对后期优化矿柱留设开采提供有意借鉴。王文军等^[1]采用 ANSYS 有限元软件, 分析了不同厚度隔离矿柱的位移规律和塑性区分布规律, 验证了 25 m 厚原岩隔离矿柱能保证安全生产; 刘志新等^[2]对过渡区不同厚度矿柱下的采场运用 ANSYS 和 FLAC^{3D} 进行了三维数值模拟计算, 得到现阶段矿柱仍能支撑两个分层采场的回采; 张兵等^[3]采用 FLAC^{3D} 软件对 21 m 厚度的水平矿柱进行了稳定性分析, 得到其能有效保障上下采场安全作业; 盛佳等^[4]基于沉降监测、层次分析法及数值模拟对井筒保安矿柱的稳定性进行了分析, 综合研判井筒保安矿柱稳定性良好。

谦比希铜矿东南矿体采用预切顶空场嗣后充填法条带式开采, 盘区间根据经验所留设的保安矿柱

[作者简介] 杨清平(1965-), 男, 教授级高级工程师, 总经理助理, 主要从事采矿现场技术与生产管理。

[引用格式] 杨清平, 陈志强, 王红心. 基于 FLAC^{3D} 的谦比希铜矿盘区保安矿柱稳定性分析[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(1): 12-16.

厚度为 25 m,为探究其留设此厚度保安矿柱的稳定性,同时为后期优化矿柱尺寸留设提供借鉴,本文运用 FLAC^{3D}数值模拟软件分别对二步骤采场回采完成后,从应力、位移及塑性区方面分别对保安矿柱留设厚度在 25 m、23 m、21 m、19 m、17 m、15 m 时进行研究分析。

2 开采技术条件

谦比希铜矿东南矿体一期工程首采区主要回采 1 号矿体 0 线以北部分,其首采区又划分为北首采区和南首采区。北首采区分布于地表勘探线 39 线~53 线,垂向范围 980~1 060 m 水平。1 号矿体矿体厚度 13~15 m,平均厚度 14 m,平均倾角 10°。

矿体上盘围岩主要为石英岩及泥质石英岩等,厚度 11~75 m,岩体完整,局部为基本完整,岩石结

构致密、坚硬、稳定、完整。矿体主要为矿化板岩。矿体下盘围岩主要为石英岩、下盘砾岩及长石石英岩等,下盘岩石均坚硬、稳定、完整。

3 预切顶空场嗣后条带式开采法

设计将矿体划分为盘区为回采单元组织生产,盘区沿矿体走向方向布置,每个盘区长 200 m,宽 100 m,盘区内矿块高 50 m,盘区间留 25 m 厚间柱,盘区内条形采场长 80 m,宽 9 m。采用预切顶空场嗣后充填法开采,“隔一采一”,一步骤采场回采完成且充填体养护合格后,回采二步骤采场。单个采场切顶上山完成后,在采场一端施工切割天井,为切割拉槽提供自由面,切割槽完成后,在切顶上山采用下向平行中深孔后退式回采,回采剖面图如图 1 所示。

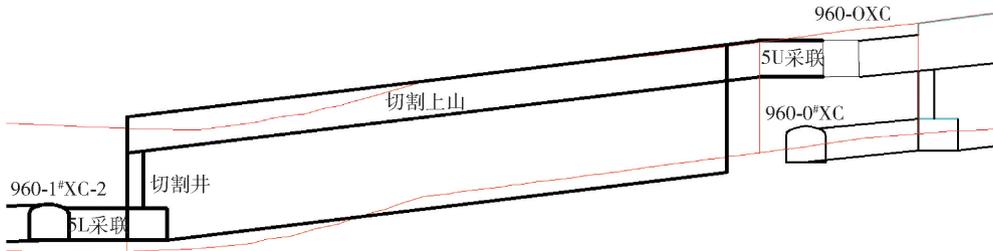


图 1 条带式采场回采剖面图

4 采场数值模型的建立

4.1 几何模型的建立

选取谦比希铜矿东南矿体北首采区 960 m 水平分段 1 盘区 5 个采场和 2 盘区 5 个采场建立几何模型。 Z 方向模型范围根据埋深确定,960 m 水平分段矿体埋深 960 m。 X 、 Y 方向的模型范围依据圣维南原理确定,即根据应力扰动波及范围,选取 3 倍的开挖边界作为建立 X 、 Y 方向的模型范围^[5]。几何模型尺寸大小为 250 m × 150 m × 100 m (长 × 宽 × 高),具体如图 2 所示,模型共包含单元 305 500 个,节点 319 968 个。

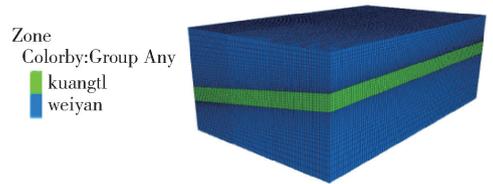


图 2 北首采区 960 m 水平分段 1 盘区和 2 盘区三维数值计算模型

4.2 力学参数的确定

模拟计算选取摩尔库伦强度准则,矿岩物理力学参数使用的是矿山前期开展的力学试验研究取得的结果数据经折减而来,具体数值见表 1。

表 1 模型计算所用的矿岩和充填体物理力学参数值表

岩性	密度 $\rho_0/g \cdot cm^{-3}$	泊松比 μ	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	c/MPa	内摩擦 角/(°)	E_{rm}/GPa
上盘石英岩	2.71	0.34	19.8	0.8	5.29	41.12	5.56
矿体	2.76	0.29	22.5	1.1	6.23	43.98	6.17
下盘石英岩	2.69	0.24	19.1	0.6	5.1	47.07	4.77
一步骤回采充填体	2.10	0.32	1.50	0.3	0.50	22	0.30

体积模量 K 、剪切模量 G 与弹性模量 E 、泊松比 μ 的关系根据式(1)、(2)推导计算,具体数值见表 2。

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (2)$$

表2 模型数值计算中摩尔-库伦模型参数值

岩性	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa
上盘石英岩	5.56	0.34	5.79	2.07
矿体	6.17	0.29	4.90	2.39
下盘石英岩	4.77	0.24	3.06	1.92
一步骤回采充填体	0.30	0.32	0.28	0.11

4.3 边界条件

设定模型位移边界条件,即模型上表面自由,下表面固定,前后左右表面位移为零,对模型施加相当于采场埋深的压应力 23.65 MPa。

4.4 结果分析

模型计算首先根据边界条件、力学等参数等进行初始化运行,其最大主应力及最小主应力符合地应力分布一般规律,将模型产生的位移、速率、塑性区等清零后按实际开采充填过程逐步模拟,计算过

程简化了矿房结构,未考虑软化、硬化现象。结果分析针对的是在一步骤回采充填完成后的基础上,二步骤采场开挖后盘区间矿柱应力、位移及塑性区变化状况。

1) 应力分析

对矿柱应力的分析主要以矿柱所受的最大主应力为评价指标,图3所示为二步骤采场开挖后盘区间不同厚度矿柱最大主应力分布云图。对比 15 m、17 m、19 m、21 m、23 m、25 m 厚度的矿柱受力,共同点是都受压应力集中,且最大压应力都分布在矿房的角隅处,应力集中系数约为 1.82,推测原因是由于矿房结构简化,方向突变造成的,实际开采过程中矿房边角处多呈弧状,应力集中会相对小一些;其次,二步骤开挖后,25 m、23 m、21 m 及 19 m 厚度的矿柱受力大小及分布相似,较大应力似拱形分布在矿柱侧帮且未贯穿整个矿柱厚度,矿柱失稳的可能性较小,而 17 m 和 15 m 厚度的矿柱中受较大压应力作用且贯穿整个矿柱厚度呈 X 型共轭分布,在蠕变作用下矿柱的安全性会不断降低。

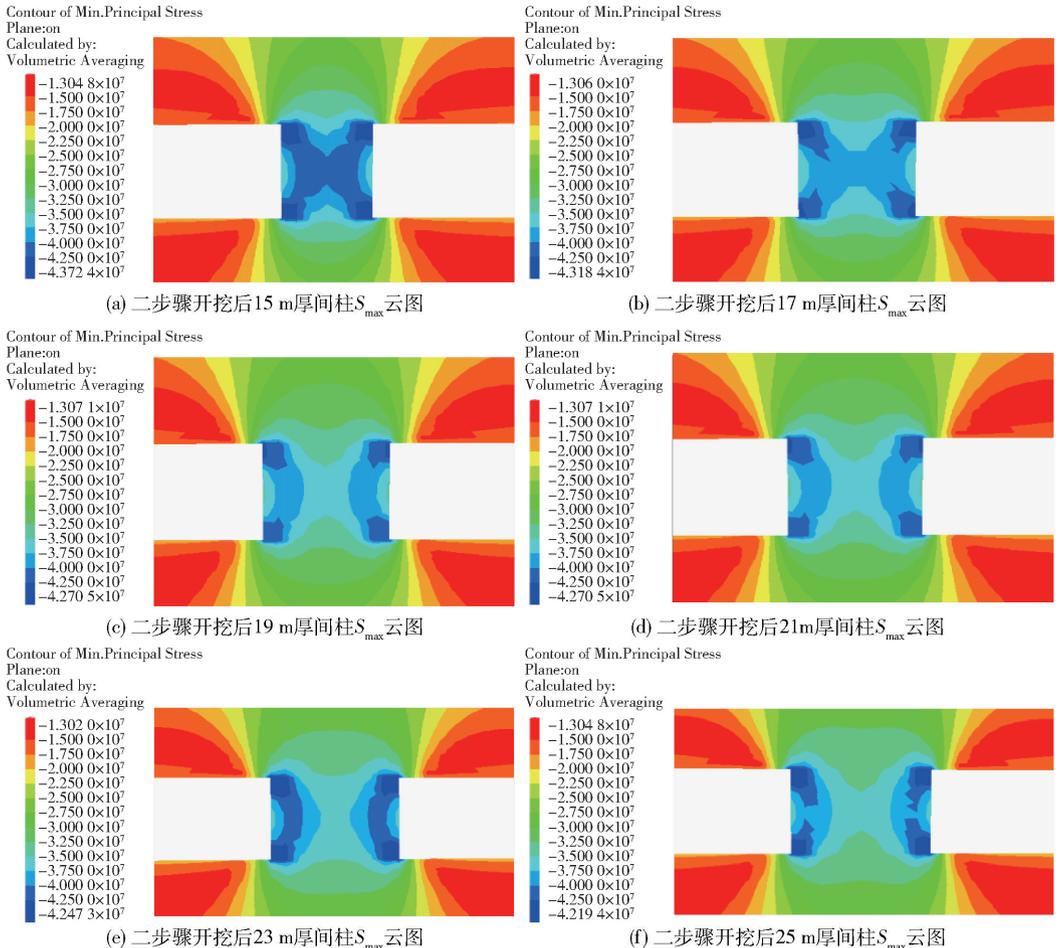


图3 二步骤开挖后不同厚度矿柱的最大主应力云图

2) 位移分析

图 4 所示为二步骤采场开挖完成后盘区间不同厚度尺寸矿柱位移变化云图,选取 Z-disp 为评价指标。从图中可以看出,矿柱的上端较下端出现更大的位移变形,与矿柱厚度尺寸无关。根据监测点文件记录,15 m 厚盘区间矿柱最大下沉量达 8.73 cm,17 m 厚盘区间矿柱最大下沉量 2.54 cm,19 m 厚盘

区间矿柱最大下沉量达 2.39 cm,21 m 厚盘区间矿柱最大下沉量 2.34 cm,23 m 厚盘区间矿柱最大下沉量 2.27 cm,25 m 厚盘区间矿柱最大下沉量 1.63 cm,从以上计算结果可以看出,矿柱厚度在 17 ~ 25 m 时,其最大下沉量变化不大,而从 17 m 变至 15 m 时,其最大下沉量发生突变,推测 15 m 厚度尺寸的矿柱很有可能发生了部分结构性破坏。



(a) 二步骤开挖后 15 m 厚间柱位移云图



(b) 二步骤开挖后 17 m 厚间柱位移云图



(c) 二步骤开挖后 19 m 厚间柱位移云图



(d) 二步骤开挖后 21 m 厚间柱位移云图



(e) 二步骤开挖后 23 m 厚间柱位移云图



(f) 二步骤开挖后 25 m 厚间柱位移云图

图 4 二步骤开挖后不同厚度矿柱的位移云图

3) 塑性区分析

图 5 所示为二步骤采场开挖完成后盘区间不同厚度尺寸矿柱塑性区分布云图,从图中可以看出,盘区间矿柱塑性区区域主要分布在靠近采空区四周的侧帮上,且呈剪切变形;所有矿柱两帮塑性变形并未贯穿整个矿柱,说明矿柱的整体结构仍保持完整;此外,根据塑性变形的网格数可以看出,矿柱厚度尺寸越大,塑性区域面积所占的整个矿柱的面积就越小,矿柱稳定性就越高,所以 25 m 厚度的矿柱稳定最好,15 m 厚度的矿柱稳定性最差。

5 结论

(1) 二步骤开挖完成后,25 m、23 m、21 m 及 19 m 厚度的矿柱侧帮受较大压应力作用,且呈拱形分布,但受力未贯穿整个矿柱;而 17 m 和 15 m 厚度的

矿柱所受较大压应力在矿柱中呈 X 型共轭分布,长期蠕变作用下,矿柱失稳破坏的可能性较大。二步骤开挖完成后,25 m、23 m、21 m、19 m 及 17 m 厚度的矿柱竖直方向的最大下沉量分别为 1.63 cm、2.27 cm、2.34 cm、2.39 cm 及 2.54 cm,而 15 m 厚度的矿柱最大下沉量达 8.73 cm,下沉量突变,推测其部分结构发生了失稳破坏。二步骤开挖完成后,不同厚度的矿柱侧帮都出现了剪切变形,从塑性区所占矿柱面积的比例来看,25 m 厚度的矿柱稳定最好,15 m 厚度的矿柱稳定性最差。

(2) 综合分析不同厚度尺寸矿柱在二步骤采场开挖后的应力、位移及塑性区情况,可以得到,谦比希铜矿东南矿体盘区间矿柱留设厚度在 19 m 及以上时,可满足其稳定性要求。因而,现场留设的 25 m 厚盘区矿柱能满足其稳定性要求。同时,现场观

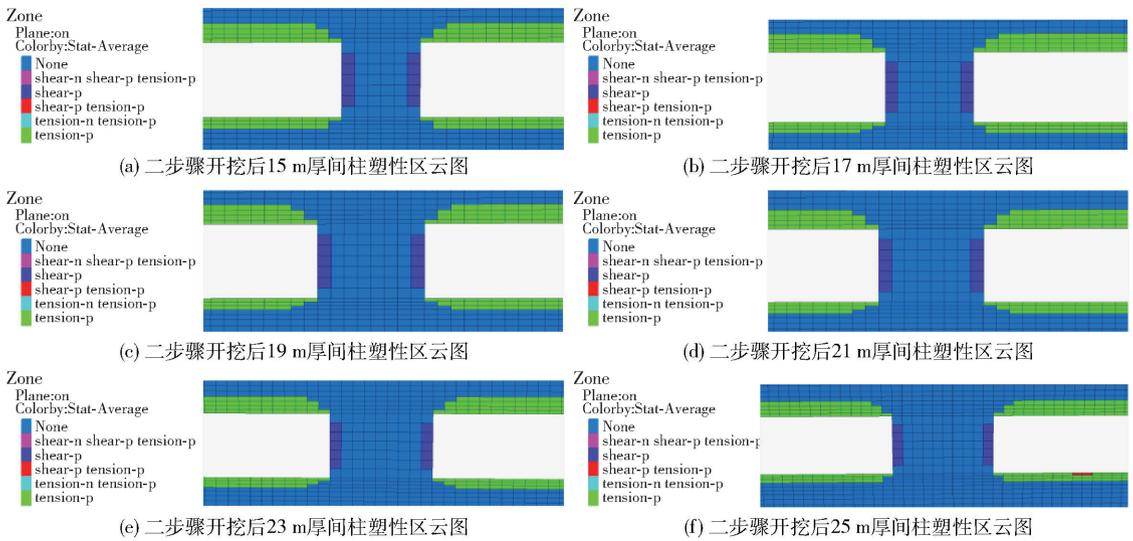


图5 二步骤开挖后不同厚度矿柱的塑性区分布云图

察表明,二步骤采场回采完成后,盘区间留设的 25 m 厚矿柱结构良好,未发生片帮等现象,表明其稳定性良好。此外,上述研究成果可为后期优化矿柱留设提供借鉴。

[参考文献]

[1] 王文军,李家树,徐帅,等. 深部开采过程中隔离矿柱承载机理及厚度优化[J]. 金属矿山,2020(8):38-43.

[2] 刘志新,陈顺满,贾琪. 某铜矿深部开采过渡区保安矿柱厚度优化研究[J]. 化工矿物与加工,2016,45(11):

54-58.

[3] 张兵,胡文达,李辉,等. 谦比希铜矿主矿体深部保安矿柱稳定性分析[J]. 现代矿业,2015,31(2):104-107.

[4] 盛佳,万文,江飞飞,等. 基于 AHP-3DEC 的井筒保安矿柱稳定性综合评价[J]. 矿业研究与开发,2021,41(5):28-33.

[5] 徐恒,王黎明,吴爱祥,等. 基于尖点突变理论的充填体下采空区安全顶板厚度计算模型[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(3):579-586.

(上接第 11 页)

[3] 洪林,马驰,陈帅. 二氧化碳爆破布置参数数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2017,36(10):1026-1030.

[4] 黄晓实,张范立,张政,等. 二氧化碳致裂器在岩石中深孔预裂爆破中的应用研究[J]. 爆破,2017,34(3):131-135.

[5] 贺志宏,夏仕柏. 西山矿区煤层顺层孔 CO₂ 爆破增透试验研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2017,37(4):54-58.

[6] 贺超. 基于二氧化碳深孔致裂增透技术的低透煤层瓦斯治理[J]. 煤炭科学技术,2017,45(6):67-72.

[7] 孙可明,辛利伟,王婷婷,等. 超临界 CO₂ 气爆煤体致裂规律模拟研究[J]. 中国矿业大学学报,2017,46(3):501-506.

[8] 詹德帅,黄亮高,邱天德. 高压二氧化碳爆破增透机理及试验研究[J]. 建井技术,2016,37(6):31-34.

[9] 刘文郁,王滨. 二氧化碳爆破深孔预裂强化增透试验研究[J]. 煤炭技术,2016,35(3):178-179.

[10] 霍中刚. 二氧化碳致裂器深孔预裂爆破煤层增透新技术[J]. 煤炭科学技术,2015,43(2):80-83.

[11] 杨永梅,姜光忍,唐宇恒. 二氧化碳气体爆破技术发展及应用[J]. 设备管理与维修,2019(6):85-86.

[12] 王兆丰,李豪君,陈喜恩,等. 液态 CO₂ 相变致裂煤层增透技术布孔方式研究[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(9):11-16.

[13] 马辉,曾劲,吴志渊,等. 基于 LS-DYNA 模拟碰撞诱发的裂纹扩展[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015,36(11):1653-1657.

[14] 孙文忠. 低渗煤层 CO₂ 预裂增透高效瓦斯抽采原理及应用[J]. 煤炭科学技术,2017,45(1):100-105.

[15] 赵立朋. 煤层液态 CO₂ 深孔爆破增透技术[J]. 煤矿安全,2013,44(12):76-78,81.

[16] 张悦,张民波,朱天玲,等. 低透气性煤层 CO₂ 增透预裂技术应用[J]. 科技导报,2013,31(23):36-39.

[17] 刘明举,何学秋. 煤层透气性系数的优化计算方法[J]. 煤炭学报,2004(1):78-81.