充填体包覆条件下残留矿柱回采方案及结构参数优化研究*

程斌[1],杨宁[2,3],吴会明[1],符洲云[2,3],彭跃金[2,3]

(1.山东金召矿业有限公司, 山东 淄博市 255000;
2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
3.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:某高品位铁矿山局部残留多处由充填体包覆的间柱及顶柱。为尽可能回收高品位铁矿资源,对残留间柱及顶柱的回采方案进行了研究。通过对下向进路充填采矿法与分段充填采矿法进行技术经济指标对比分析,选择回采工艺简单、开采强度高、生产成本低的分段充填采矿法作为回采残留矿柱的最佳采矿方法。根据选择的采矿方法,通过数值模拟手段,分析不同矿房结构参数下的采场围岩及充填体位移、应力、塑性区分布,对606#间柱以及-525 m分段位置顶柱回采的矿房结构参数进行了优化研究。模拟计算结果表明,回采606#间柱的最佳矿房结构参数方案是矿房长度为30 m、不留设顶柱,此方案的矿房顶板位移最大值为50.00 mm,顶板塑性区体积最小,为1 534.55 m^3;回采顶柱的最佳矿房结构参数方案是一、二步骤矿房的跨度分别为8 m和10 m、长度为25 m,此方案的矿房顶板位移最大值为57.64 mm,顶板单位面积塑性区体积较小,为1.02 m^3,采场内部充填体塑性区无明显的贯通。

关键词:残留矿柱;分段充填法;充填体;矿房结构参数;数值模拟

中图分类号:TD853.391 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0027-09

Study on Mining Scheme and Optimization of Structural Parameters of Residual Pillar Under the Condition of Filling Body Enveloping

CHENG Bin[1], *YANG Ning*[2,3], *WU Huiming*[1], *FU Zhouyun*[2,3], *PENG Yuejin*[2,3]

(1.Shandong Jinzhao Mining Co., Ltd., Zibo, Shandong 255000, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: There are many residual pillars and top pillars under the condition of filling body enveloping in a high-grade iron mine. In order to recover high-grade iron ore resources as much as possible, a recovery scheme of residual pillar and top pillar was studied. Comparative analysis of the technical and economic indexes between the downward drift filling mining method and the sublevel filling mining method was conducted. And the sublevel filling mining method with simple mining process, high mining intensity and low production cost was selected as the best mining method for residual pillar recovery. Based on the selected mining method, numerical simulation was used to analyze the displacement, stress, and plastic zone distribution of the surrounding rocks and filling materials in the mining area under different structural parameters of mining room. Optimization research was conducted on the structural parameters of mining room under the mining of the 606# inter pillar and the top pillar at -525 m sublevel. The simulation calculation results show that the optimal structural parameter scheme for the mining room under the recovery of 606# inter pillar is a mining room length of 30 m without leaving a top pillar. The maximum displacement of the mining room roof in this scheme is 50.00 mm, and the volume of plastic zone of roof is the minimum, which is 1 534.55 m^3. The optimal structural parameter scheme for the mining room under the recovery of top pillar is that the spans of the first and second step mining rooms are 8 m and 10 m, respectively, and the length is 25 m. The maximum displacement of the mining room roof in this scheme is 57.64 mm, and the volume of the plastic zone per unit area of the roof is small, which is 1.02 m^3. There is no obvious connection in the plastic zone of the filling body inside the mining area.

Key words: Residual pillar, Sublevel filling mining method, Filling body, Structure parameter of mining room, Numerical simulation

---

* **收稿日期**:2024-09-14
基金项目:"十四五"国家重点研发计划项目(2023YFC2907404)
作者简介:程斌(1985—),男,山东东平人,高级工程师,主要从事采矿技术及矿山管理等方面的工作。E-mail:chengbin512@126.com
通信作者:杨宁(1992—),男,宁夏中卫人,硕士,高级工程师,主要从事采矿技术等方面的研究工作。E-mail:34040682@qq.com

0 引言

随着采矿技术的发展,地下金属矿原先残留的间柱、顶柱等资源的回采具备了一定的技术可行性,这些残留资源的回收利用也得到了矿山企业的重视。某铁矿山的铁矿资源品位高,在以往的开采过程中留下了大量用以维持采场稳定性的间柱和顶柱,这部分残留的高品位铁矿资源的安全高效回采已成为该矿山亟需解决的问题。为最大程度回采残留的间柱与顶柱,提高矿石回采效率与安全性,降低回采过程中的矿石损失贫化率,需要选择合适的采矿方法,设计合理的采场结构参数[1-3]。

针对残留矿柱回采方式及回采稳定性问题,诸多学者通过经验公式、理论分析、数值模拟、相似材料试验及现场工业试验等方式开展了研究[4-7]。陈顺满等[8]为优化矿柱结构参数,减少矿柱回采过程中的矿石损失率,用 BIENIAWSKI 强度公式计算矿柱安全系数,获取最佳方形矿柱结构。刘洋等[9]基于临界冒落跨度理论,为内蒙某铁矿残矿回采和采空区治理提出了解决方案。CHEN 等[10]应用突变理论分析矿柱顶板-条形矿柱结构系统的失稳机理,获得不同结构系统下矿柱宽度与系统稳定性的关系。朱晨迪等[11]通过对各采矿方法技术经济指标进行对比,结合数值模拟手段,获得了某钼矿矿柱采场的最佳结构参数。林敏等[12]通过数值模拟手段,研究盘区矿柱回采方式与充填体稳定性的关系,提升了龙桥铁矿矿柱综合回采率。LI 等[13]进行室内矿柱回采相似材料试验,通过数字散斑系统监测模型在回采过程中的位移。董世华[14]为冬瓜山矿床隔离矿柱的开采提出了三步骤回采技术方案,并通过合理布孔及采用梯段爆破,对矿柱回采方案进行了优化,取得了盘区隔离矿柱回采率超 80%的效果。

本文根据某铁矿山的矿体赋存状态以及开采现状,为在保持安全的前提条件下最大程度回采残留的高品位矿石,选择合适的采矿方法并设计回采方案,使用 FLAC3D 有限元分析软件对各方案的围岩应力变化趋势、位移演变规律及塑性区贯通状态进行数值模拟和分析,选出最佳的间柱、顶柱回采方案。

1 工程概况

某矿山的主矿体为Ⅰ号矿体,矿石为致密块状磁铁矿,矿体形态呈透镜状。矿石单轴抗压强度为 50.2～102.3 MPa,岩体质量为Ⅰ～Ⅱ级。矿体走向长 625 m,厚度为 1.11～135.57 m,倾角为 50°～65°,矿体 TFe 平均品位为 51.81%。矿体顶板以结晶灰岩为主,岩体完整,岩体质量为Ⅰ级。矿体底板以透辉石矽卡岩为主,岩体完整,岩体质量为Ⅰ～Ⅱ级。

矿山前期采用分段凿岩阶段出矿嗣后充填采矿法,局部区域采用浅孔留矿嗣后充填法。但民采、盗采活动使井下遗留有大量采空区,且部分区域产生了不同程度的垮落,矿山现已对大部分采空区进行了充填处理。现阶段需对－513～－525 m 分段留下的 606# 间柱及南侧大范围顶柱进行回采,该处矿体厚度约 90 m,倾角为 80°,606# 间柱宽 14 m,四周均被充填体包裹,南侧顶柱上下侧亦为充填体。

2 残矿回采方案

2.1 采矿方法初选

根据前期矿山的开采现状,为严格控制废石混入和矿石的损失,提高出矿品位,初步选择采用下向进路充填采矿法和分段充填采矿法回采残留矿柱。

(1) 下向进路充填采矿法。该方法采用进路间隔回采顺序,进路回采后立即进行充填,以减少采空区暴露时间与暴露面积。因该采矿法不留设矿柱且能适应各类形态的产状复杂矿体,可以极大程度降低回采过程的矿石损失贫化。回采时沿矿体走向设置矿块,矿块长 50～60 m,宽度依照矿体厚度而定,中段高度 60 m,分段及中段间不留矿柱,高度为 12 m。进路沿走向布置,宽 4.0 m,高 4.0 m,长 25～30 m。

(2) 分段充填采矿法。如图 1 所示,该方法的特点为分两步骤连续回采,各步骤内都有独立的出矿巷,分段内为后退式回采,在出矿巷内钻凿上向扇形孔中深孔并逐排爆破,利用矿柱或充填体支撑围岩,完成矿房出矿后立即充填采空区。该方法采用中深孔落矿,生产效率高,整个过程集中凿岩爆破、强采快充,减少围岩暴露时间,安全性较好。采场垂直矿体走向设置,中段高度为 60 m,分段高度为 12 m,采场宽度为矿体厚度。

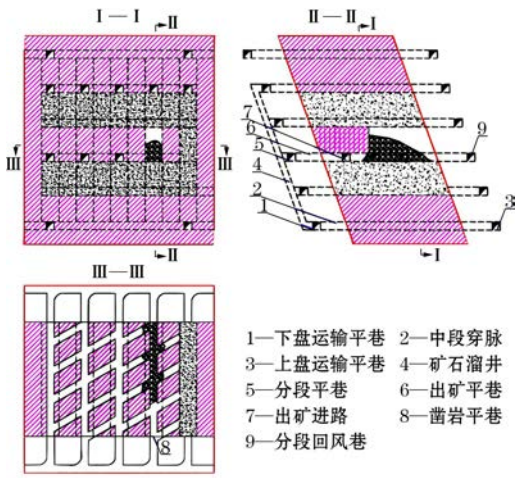


图 1 分段充填采矿法

Fig.1 Sublevel filling mining method

2.2 采矿方法技术经济指标对比

以－513～－525 m 分段南侧大范围顶柱为例,该区域可采地质矿量 31.29 万 t,地质品位 45.05%,矿山选矿回收率为 92.7%,对分段充填采矿法和下向进路充填采矿法技术经济指标进行对比分析,见表 1。应用分段充填采矿法开采,预计采出金属量 12.41 万 t,销售收入达 10 521.65 万元,利润总额 5 264.72 万元。应用下向进路充填采矿法开采,预计采出金属量 13.25 万 t,销售收入达 11 239.04 万元,利润总额 4 790.48 万元。综上所述,分段充填采矿法的生产成本更低,利润总额更高,利润总额比采用下向进路采矿法高 474.24 万元,而且该方法回采工艺简单,开采强度高,因此选择分段充填采矿法。采用分段采矿法回采 606# 间柱,该间柱的可采地质矿量为 6.18 万 t,预计利润总额为 1 040.51 万元。将－513～－525 m 分段残留矿柱回采后,累计可为矿山产生利润 6 305.23万元。

表 1 两种采矿方法的技术经济指标比较

Fig.1 Technical and economic indicators comparison between the two mining methods

采矿方法	损失率/%	贫化率/%	出矿品位/%	采矿金属量/万 t	选矿金属量/万 t	吨矿成本/(元/t)	生产成本/万元	销售收入/万元	利润总额/万元
分段充填采矿法	12	16	37.84	12.41	11.50	160.37	5 256.93	10 521.65	5 264.72
下向进路充填采矿法	6	6	42.34	13.25	12.28	206.09	6 448.56	11 239.04	4 790.48

3 606# 间柱回采参数优化

为确定 606# 间柱合理的回采尺寸及合适的预留顶柱厚度,需要对－513 m 分段及－525 m 分段周边的充填体进行稳定性分析。

3.1 数值模拟计算方案

根据矿山的生产经验,在回采被充填体包覆的矿柱时,周边充填体的稳定性主要受采场长度及留设顶柱厚度的影响。在矿柱高度及宽度确定的条件下,分别取矿房长度为 30 m、45 m、90 m,取顶柱厚度为 0、2 m、3 m 及 4 m,共有 12 个回采矿柱的采场结构参数方案,见表 2。应用 FLAC3D 有限元数值模拟软件对各方案回采后的充填体位移、应力及塑性区等进行模拟计算和对比。

3.2 模型建立

根据矿山的实际工程条件及矿体赋存产状,结合表 2 中的采场结构参数方案,对 606# 间柱进行建模,模型长 400 m、宽 400 m、高 250 m,如图 2 所示。对数值模型顶部施加垂直均布荷载模拟上部覆岩的自重,在模型侧面施加梯度水平应力,模型底部约束位移,同时对地质条件进行了简化,模型中主要分为上盘灰岩、下盘闪长岩、铁矿体及充填体,其各类材料的物理力学参数见表 3。

表 2 回采矿柱的采场结构参数方案

Table 2 Schemes of stope structure parameters for mining pillar

方案序号	矿房长度/m	矿房跨度/m	顶柱厚度/m
1	30	14	0
2	30	14	2
3	30	14	3
4	30	14	4
5	45	14	0
6	45	14	2
7	45	14	3
8	45	14	4
9	90	14	0
10	90	14	2
11	90	14	3
12	90	14	4

表 3 数值模型的材料物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of materials in the numerical model

材料类型	密度/(g/cm³)	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
灰岩(上盘)	2.72	7.14	0.64	1.86	31.26	0.23
闪长岩(下盘)	2.83	19.35	1.32	3.56	36.25	0.26
矿体	4.09	15.67	1.25	2.97	35.86	0.24
充填体	1.80	3.76	0.40	2.78	35.00	0.18

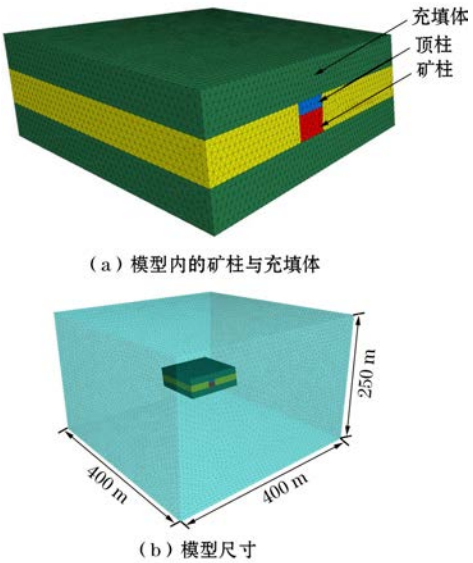


图 2 三维数值模型

Fig.2 Three-dimensional numerical model

3.3 数值模拟计算结果分析

在 606# 间柱周边皆为充填体的条件下,从矿柱上盘开始按一定矿房长度分步对矿柱进行回采,模拟获得矿房附近充填体及顶柱的最大主应力、竖向位移及塑性区云图。下面以矿房长度 30 m 为例进行分析。

图 3 和图 4 所示的数值模拟结果表明,矿房回采并充填后,其周边充填体及顶柱岩体的应力会重新分布,在矿房顶板与两帮边缘交界位置出现小范围应力集中,矿房顶板及底板出现大面积卸压区,充填体的应力远小于原岩应力。在矿房长度一定的条件下,矿房最大主应力随顶柱厚度的增大而增大。在顶柱厚度一致的条件下,矿房最大主应力随矿房长度的增大而增大。在矿房长度分别为 30 m、45 m 及 90 m 的条件下,随顶柱厚度从 0 增大到 4 m,矿房最大主应力的最大增值分别为 10.22 MPa、10.46 MPa、10.51 MPa,最大增幅为 35.33%、36.12%、36.27%。

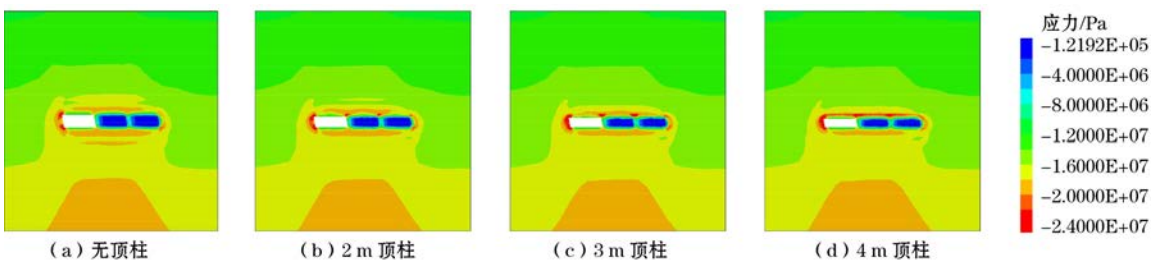


图 3 矿房长度为 30 m 条件下的最大主应力云图

Fig.3 Cloud diagrams of the maximum principal stress under mining room length of 30 m

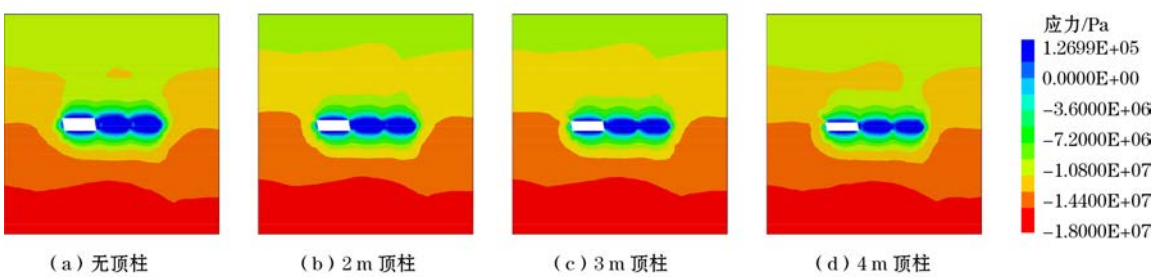


图 4 矿房长度为 30 m 条件下的最小主应力云图

Fig.4 Cloud diagrams of the minimum principal stress under mining room length of 30 m

矿房长度 30 m 条件下的竖向位移云图如图 5 所示。由图 5 可知,矿房周边位移主要集中在顶板和底板位置,顶柱厚度对一步骤矿房的顶板位移具有较大的影响。由统计结果可知,顶板竖向位移随顶柱厚度的增大而减小,随矿房长度的增大而增大。底板竖向位移随顶柱厚度的增大略微减小,随矿房长度的增大而增大。不同矿房长度下的顶、底板最大竖向位移如图 6 所示。由图 6(a)可知,在矿房长度分别为 30 m、45 m 及 90 m 的条件下,随着顶柱厚度从 0 增至 4 m,顶板最大沉降量分别从 50.00 mm 降至 33.39 mm、51.09 mm 降至 35.23 mm、52.01 mm 降至 36.22 mm,降幅分别为 33.22%、31.04%、30.36%;在顶柱厚度分别为 0、2 m、3 m 和 4 m 的条件下,随矿房长度由 30 m 增至 90 m,顶板最大沉降量分别增大了 2.01 mm、1.92 mm、2.81 mm 及 2.83 mm,增幅分别为 4.02%、4.53%、7.49%及 8.48%。

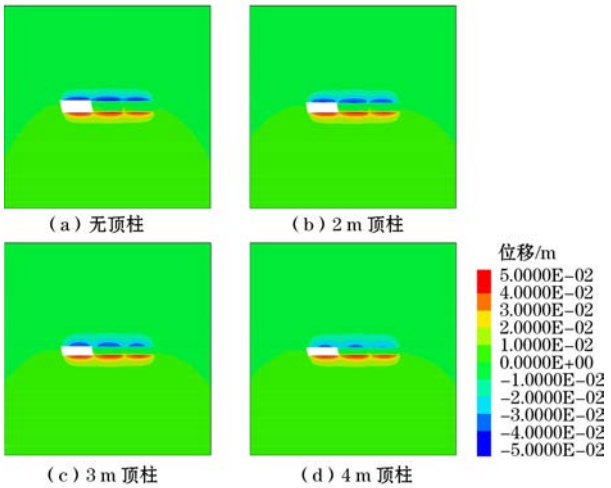


图 5 矿房长度 30 m 条件下的竖向位移云图

Fig.5 Vertical displacement cloud diagrams under mining room length of 30 m

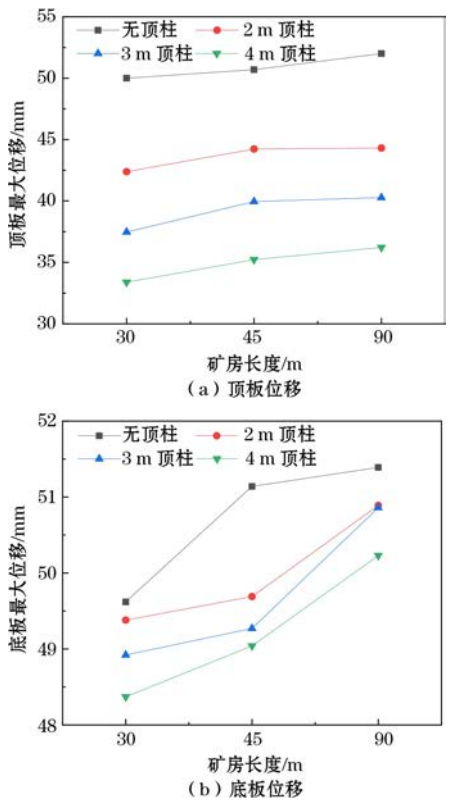


图 6 不同矿房长度条件下的最大竖向位移

Fig.6 Maximum vertical displacement under different mining room lengths

矿房长度 30 m 条件下的塑性区云图如图 7 所示。由图 7 可知,各方案的充填体内部并未出现大面积塑性破坏区域,塑性区主要出现在矿房采空区边界及矿房充填体靠近矿体下盘的位置。随着顶柱厚度的增大,矿房顶板由原有的拉剪混合破坏逐渐转变为以剪破坏为主,对于采空区而言,顶板的拉伸破坏是影响矿房上部稳定性的主要原因。

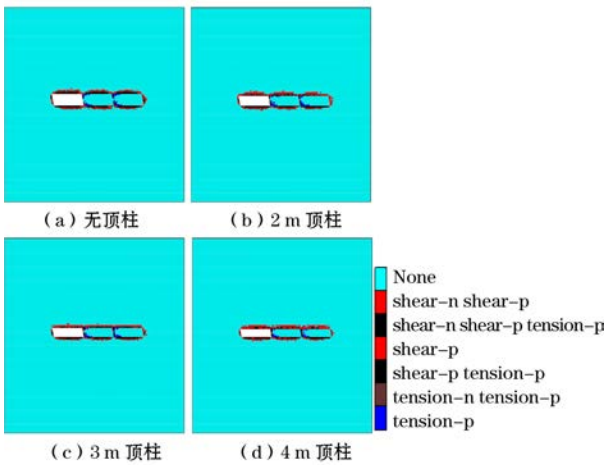


图 7 矿房长度 30 m 条件下的塑性区云图

Fig.7 Cloud diagrams of plastic zone under mining room length of 30 m

顶板塑性区体积的统计结果见图 8。由图 8 可知,随着顶柱厚度及矿房长度的增大,顶板塑性区体积也逐渐增大。

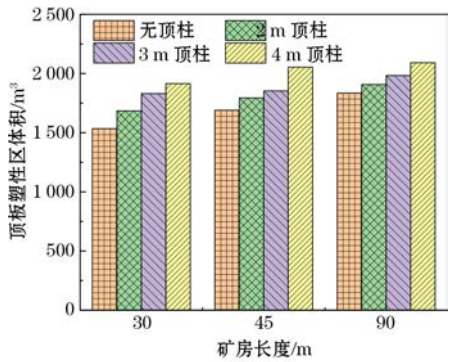


图 8 不同顶柱厚度和矿房长度下的顶板塑性区体积

Fig.8 Plastic zone volume of roof under different top pillar thickness and mining room length

矿房长度分别为 30 m、45 m 及 90 m 条件下,随着顶柱厚度从 0 增至 4 m,顶板塑性区体积分别从 1 534.55 m^3 增至 1 914.96 m^3、1 689.97 m^3 增至 2 053.66 m^3、1 834.66 m^3 增至 2 190.51 m^3,增幅分别为 24.79%、21.52%、19.40%。在顶柱厚度分别为 0、2 m、3 m 和 4 m 的条件下,当矿房长度由 30 m 增大至 90 m 时,顶板塑性区体积分别增大了 300.11 m^3、223.22 m^3、152.37 m^3 及 175.55 m^3,增幅分别为 19.56%、13.25%、8.32%及 9.17%。

4 顶柱回采矿房结构参数优化

4.1 数值模型计算方案及模型建立

依据分段充填采矿法设计,对南侧顶柱采用两

步骤矿房进行回采,因采区上下两侧为充填体,为确保回采作业的安全性以及保证各矿房的回采互不干扰,以“隔三采一”的形式对采区进行回采,每步骤矿房回采并充填后再进行后续步骤回采。一步骤矿房的跨度分别为 6 m、8 m、10 m,二步骤矿房的跨度分别为 8 m、10 m、12 m,具体方案见表 4,数值模型建立及材料参数赋值同上,将原矿柱两侧充填体材料改换为矿体即可。

表 4 矿房结构参数方案

Table 4 Structural parameter schemes of mining room

方案序号	一步骤矿房跨度/m	二步骤矿房跨度/m	矿房长度/m
1	6	8	25
2	6	8	30
3	6	8	45
4	8	10	25
5	8	10	30
6	8	10	45
7	10	12	25
8	10	12	30
9	10	12	45

4.2 数值模拟计算结果分析

对各个方案模拟开挖过程中围岩位移量最大的开挖步骤矿房进行位移云图剖切,剖切位置为该开挖步骤矿房的中部,同时在完成所有矿房的回采和充填后在同样位置获取塑性区剖面。模拟结果统计数据见表 5,位移及塑性区云图如图 9 至图 14 所示。

表 5 不同矿房结构参数下的围岩变形与应力数值模拟结果

Table 5 Numerical simulation results of deformation and stress of surrounding rock under different structural parameters of mining room

方案序号	顶板竖向位移最大值/mm	底板竖向位移最大值/mm	最大主应力/MPa	顶板塑性区体积/m^3	顶板单位面积塑性区体积/m^3
1	55.65	53.04	35.52	4 676.10	0.93
2	55.79	53.84	35.39	4 786.92	0.95
3	58.83	55.56	36.59	4 931.33	0.98
4	57.64	54.70	31.39	4 971.14	1.02
5	58.17	55.12	33.93	5 223.85	1.07
6	61.29	58.44	32.09	5 434.97	1.12
7	63.35	60.12	32.10	6 387.07	1.08
8	63.57	61.04	32.96	6 793.23	1.14
9	67.54	63.00	32.91	7 124.84	1.20

表 5 中的数值模拟结果表明,各方案的顶板及底板最大位移在 53.00～68.00 mm 的范围内,根据矿房围岩位移与矿房稳定性的关系可知[15],在此位移范围内矿房周边围岩基本可以保持稳定,但会存在潜在的稳定性问题。

因此,在后续选择最佳矿房结构参数时,应选择顶板及底板位移超过 50 mm 的区域范围尽量小的方案。

在两步骤矿房的跨度分别为 6 m、8 m 的条件下,随着矿房长度由 25 m 增大到 45 m,最大主应力平均值约为 35.8 MPa,最大主应力集中位置主要在左右两侧边缘矿房与围岩交界处,矿房顶板下沉量增大了 3.18 mm,增大了 5.7%,顶板塑性区体积增大了 255.23 m^3,增幅为 5.46%,单位面积上的塑性区体积平均值约为 0.95 m^3。在两步骤矿房跨度分别为 8 m、10 m 的条件下,随着矿房长度由 25 m 增大到 45 m,最大主应力平均值约为 32.5 MPa,其顶板下沉量增大了 3.65 mm,增幅为 6.33%,顶板塑性区体积增大了 463.83 m^3,增幅为 9.33%,单位面积上的塑性区体积平均值约为 1.07 m^3。在两步骤矿房跨度分别为 10 m、12 m 的条件下,随着矿房长度由 25 m 增大到 45 m,最大主应力平均值约为32.7 MPa,顶板下沉量增大了 4.19 mm,增幅为6.61%,顶板塑性区体积增大了 737.77 m^3,增大了 11.55%,单位面积上的塑性区体积平均值约为1.14 m^3。

由图 9 至图 11 可知,当一、二步骤矿房的跨度分别为 6 m 和 8 m 时,即矿房结构参数方案 1 至方案 3,二步骤矿房的顶、底板竖向位移超过 50.00 mm 的区域面积最小,且影响深度最浅。当一、二步骤矿房跨度分别为 10 m 和 12 m 时,即矿房结构参数方案 7 至方案 9,矿房顶、底板都存在大面积的位移超过 50.00 mm 的区域,且影响深度最深。

由图 12 至图 14 可知,回采区域边缘两侧矿房主要为剪切破坏,矿房顶板临近充填体位置以混合破坏为主,向外侧发展为剪切破坏。一步骤矿房回采并充填后,在回采二步骤矿房时,一步骤矿房内部主要产生拉伸破坏,若充填体失稳,则其内部破坏主要是剪切破坏造成的。一、二步骤矿房跨度分别为 6 m 和 8 m 时,回采区域中心位置的一步骤矿房中部区域出现大面积的塑性区贯通,以剪切破坏为主,此时无法保证二步骤矿房回采时的稳定性。其余方案未见明显的大范围塑性贯通区域。

综上所述,为保证一步骤矿房充填体不失稳及二步骤矿房回采时周边围岩尽可能稳定,选择一、二步骤矿房的跨度分别为 8 m 和 10 m 的方案。同时为保证顶板单位面积上的塑性区体积最小,且尽可能减少矿房顶部有垮落风险的区域范围,综合考虑应力、位移及塑性区指标,选择矿房长度为 25 m。

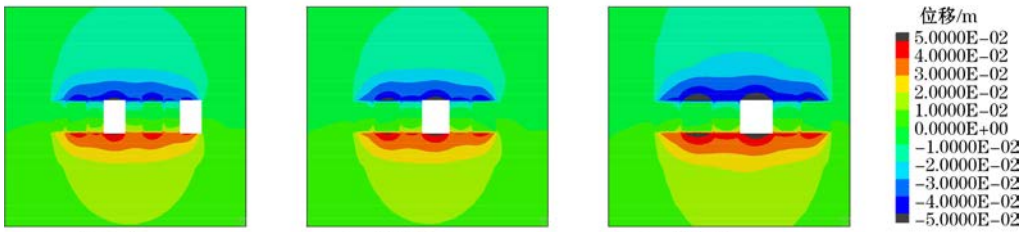


图 9 矿房长度 25 m 条件下的位移云图

Fig.9 Displacement cloud diagrams under the condition of 25 m mining room length

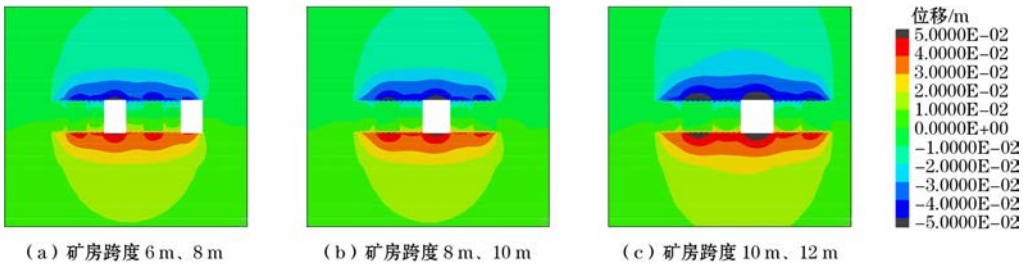


图 10 矿房长度 30 m 条件下的位移云图

Fig.10 Displacement cloud diagrams under the condition of 30 m mining room length

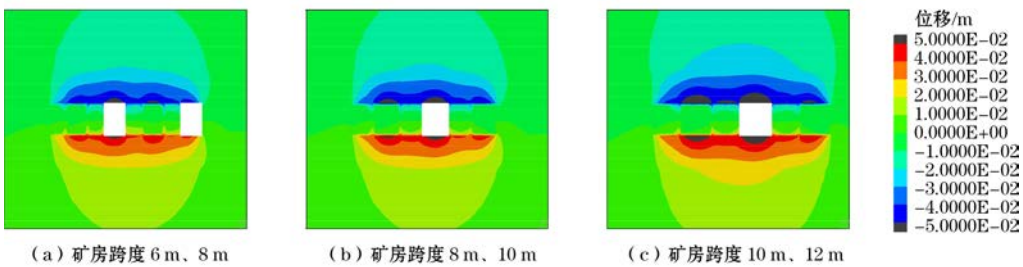


图 11 矿房长度 45 m 条件下的位移云图

Fig.11 Displacement cloud diagrams under the condition of 45 m mining room length

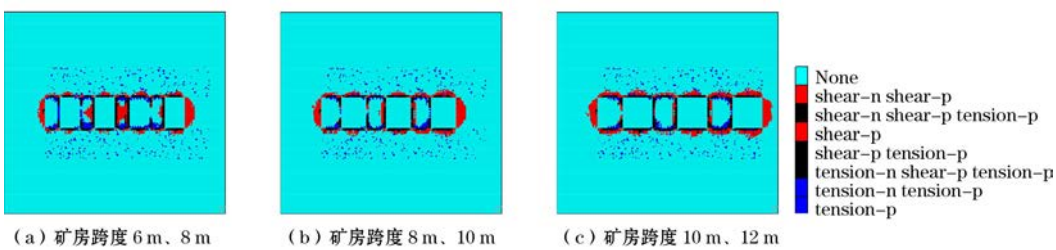


图 12 矿房长度 25 m 条件下塑性区云图

Fig.12 Cloud diagrams of plastic zone under the condition of 25 m mining room length

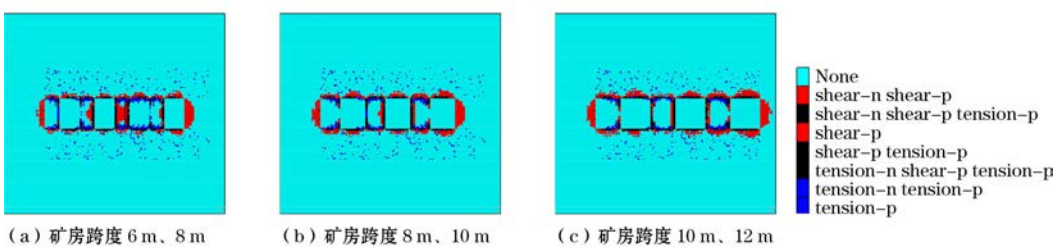
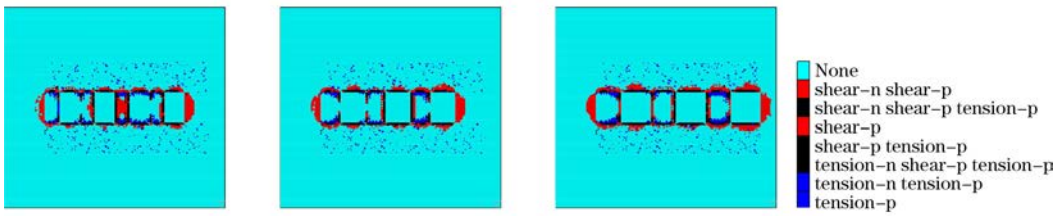


图 13 矿房长度 30 m 条件下塑性区云图

Fig.13 Cloud diagrams of plastic zone under the condition of 30 m mining room length



(a) 矿房跨度 6 m、8 m (b) 矿房跨度 8 m、10 m (c) 矿房跨度 10 m、12 m

图 14 矿房长度 45 m 条件下塑性区云图

Fig.14 Cloud diagrams of plastic zone under the condition of 45 m mining room length

5 结论

(1) 通过对下向进路充填采矿法与分段充填采矿法进行技术经济指标对比分析,选择回采工艺简单、生产成本低的分段充填采矿法回采残留矿柱。预计采用该方法回采矿柱可为矿山创造约 6 305.23 万元的经济效益。

(2) 留设顶柱能减少矿房顶板受拉区的范围,改变顶板塑性区破坏模式,同时可以对顶板沉降起到明显控制作用。矿房长度的增大会导致矿房顶板位移及塑性区增大。综合考虑经济效益及矿柱回采安全性,选择不留设顶柱、矿房长度为 30 m 的方案回采某铁矿的 606# 间柱,模拟结果表明,采用此方案回采矿柱时,矿房顶板位移不超过 50.00 mm,基本不会出现矿房围岩垮落,且顶板塑性区体积最小,仅为 1 534.55 m^3。

(3) 一、二步骤矿房跨度分别为 6 m 和 8 m 的条件下,在回采二步骤矿房时,一步骤矿房充填体中部塑性区贯通,充填体失稳,无法起到支撑作用。一、二步骤矿房跨度分别为 10 m 和 12 m 的条件下,整个顶、底板范围内存在潜在不稳定区域。一、二步骤矿房跨度分别为 8 m 和 10 m 时,顶板最大竖向位移在 58 mm 左右,顶板单位面积上的塑性区体积约为 1.07 m^3,且充填体内无塑性区贯通。基于数值模拟结果综合考虑,认为一步骤矿房 8 m、二步骤矿房跨度 10 m、矿房长度 25 m 是最合适的顶柱开采方案。

参考文献(References):

[1] 原绅师,聂兴信,远洋,等.赋存于软弱围岩下残矿回采方案优选[J].金属矿山,2024(8):10-18.
YUAN Shenshi, NIE Xingxin, YUAN Yang, et al. Optimization of residual ore mining scheme under weak surrounding rock[J]. Metal Mine,2024(8):10-18.

[2] 郭琦.某铅锌矿残矿矿柱回采方法优选和回采顺序模拟研究[D].昆明:昆明理工大学,2022.
GUO Qi. Optimization of mining method and simulation for residual ore mining sequence pillar in a lead-zinc mine[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2022.

[3] 陈祉颖,刘志祥,李夕兵,等.残矿矿柱回采方案数值模拟与优化研究[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(6):2150-2161.
CHEN Zhiying, LIU Zhixiang, LI Xibing, et al. Numerical simulation and optimization of recovery scheme for residual ore pillars[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2023,54(6):2150-2161.

[4] 侯国权,郭利杰,许文远.多中段复杂残留矿柱回采方案数值模拟分析[J].中国矿业,2023,32(增刊 1):337-343.
HOU Guoquan, GUO Lijie, XU Wenyuan. Numerical simulation analysis of mining schemes for complex residual pillars in multiple intermediate sections[J]. China Mining Magazine,2023,32(Suppl.1):337-343.

[5] 过江,赵岩,张为星,等.多向荷载作用下隔离矿柱采场矿壁受力分析[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(12):3020-3028.
GUO Jiang, ZHAO Yan, ZHANG Weixing, et al. Stress analysis of mine wall in panel barrier pillar-stope under multi-directional loads [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49 (12): 3020-3028.

[6] 刘博,王贤伟,石青,等.复杂环境下悬臂梁残矿体安全回采论证与实践[J].采矿技术,2022,22(5):19-25.
LIU Bo, WANG Xianwei, SHI Qing, et al. Demonstration and practice of safe mining of residual cantilever ore body under complex environment[J]. Mining Technology,2022,22(5):19-25.

[7] 胡世利,衣福强,周乐,等.傲牛铁矿三采区充填体稳定性及间柱回采顺序研究[J].金属矿山,2018(12):14-18.
HU Shili, YI Fuqiang, ZHOU Le, et al. Study on the stability of filling body and the rib pillar recovery sequence in three mining areas of Aoniu Iron Mine[J]. Metal Mine,2018(12):14-18.

[8] 陈顺满,吴爱祥,王贻明,等.深部回采矿柱稳定性影响因素分析及其应用[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(8):2050-2057.

CHEN Shunman, WU Aixiang, WANG Yiming, et al. Analysis of influencing factors of pillar stability and its application in deep mining [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2018,49(8):2050-2057.

[9] 刘洋,李旭东,陈世江,等.基于临界冒落跨度理论的残矿协同开采技术研究[J].矿业研究与开发,2022,42(10):13-18.
LIU Yang, LI Xudong, CHEN Shijiang, et al. Study on synergetic mining technology of remaining ore based on the critical caving span theory [J]. Mining Research and Development,2022,42(10):13-18.

[10] CHEN Qingfa, WU Shiwei, ZHAO Fuyu. Study on the mechanics and micro/macroeconomics of multiple strip-shaped pillar recovery [J]. Archives of Mining Sciences, 2020,65(1):19-33.

[11] 朱晨迪,朱胜利,江科,等.某钼矿矿柱回采方案及采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(5):1-8.
ZHU Chendi, ZHU Shengli, JIANG Ke, et al. Pillar recovery scheme and stope structure parameter optimization of a molybdenum mine [J]. Mining Research and Development,2024,44(5):1-8.

[12] 林敏,袁庆盟,王谦源.盘区矿柱回收与充填体稳定性的数值模拟研究[J].金属矿山,2022(6):24-28.
LIN Min, YUAN Qingmeng, WANG Qianyuan, et al. Numerical simulation study on panel pillar recovery and backfill stability[J]. Metal Mine,2022(6):24-28.

[13] LI Xibing, QIU Jiadong, ZHAO Yuzhe, et al. Instantaneous and long-term deformation characteristics of deep room-pillar system induced by pillar recovery [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2020, 30(10):2775-2791.

[14] 董世华.冬瓜山矿床盘区隔离矿柱回采工艺优化方案[J].金属矿山,2022(1):107-112.
DONG Shihua. Optimization scheme of the mining technology of isolated ore pillars of Dongguashan deposit[J]. Metal Mine,2022(1):107-112.

[15] 周鑫.金属矿深部采场结构参数设计及其稳定性分析[D].沈阳:东北大学,2020.
ZHOU Xin. Structural parameter design and stability analysis of deep stope in metal mine [D]. Shenyang: Northeastern University,2020.