**doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.02.004**
**引用格式：**秦忠虎，秦秀山，刘强，李亚楠，李逸豪. 阶段空场嗣后充填法回采顺序优化与采场稳定性控制[J]. 矿冶，2026，35(2)：190-203.
QIN Zhonghu, QIN Xiushan, LIU Qiang, LI Yanan, LI Yihao. Research on optimization of mining sequence and stability control in sublevel drilling-stage room and subsequent filling mining[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(2): 190-203.

# 阶段空场嗣后充填法回采顺序优化与采场稳定性控制

秦忠虎[1,2] 秦秀山[3] 刘 强[3] 李亚楠[1,2] 李逸豪[1,2]
（1. 紫金矿业集团股份有限公司，福建 上杭 364200；
2. 山西紫金矿业有限公司，山西 繁峙 034300；
3. 矿冶科技集团有限公司，北京 100160）

**摘 要：**为解决因斑岩型矿体开采地压规律不清、影响区域模糊而制约矿井安全高效开采的难题，以山西紫金矿业斑岩金矿1-6#勘探线范围为工程背景，提出了方案一“盘区顺序接续”、方案二“盘区间隔接续”2种单中段回采顺序方案，以及方案三“相邻盘区矿房对齐回采”、方案四“相邻盘区矿房错开回采”、方案五“相邻盘区矿房间隔回采”、方案六“盘区与矿房均间隔回采”4种相邻中段回采顺序方案。通过建立三维数值模型，对阶段空场嗣后充填法6种不同方案进行数值分析，结果表明：单中段回采工况下，方案一、二两者主要力学状态接近，其中方案一最大剪应力32.7 MPa，比方案二小0.1 MPa，最大变形8.11 cm仅比方案二小0.05 cm，从塑性区的分布看，方案二的塑性区体积大且分散不均匀不易控制；相邻中段同步回采工况下，方案三指标较优，方案四、五力学响应强烈，方案六表现出最优稳定性，其最大剪应力为27.1 MPa，最大变形7.32 cm，塑性区体积35 397.03 $m^3$，均为最低，且塑性区分布更分散。阶段空场嗣后充填法回采中，单中段宜采用相邻盘区依次接续顺序，相邻中段宜采用间隔盘区同步回采顺序，可有效控制采场稳定性。研究成果能够为同类矿山回采顺序优化及稳定性控制提供理论支撑与工程参考。

**关键词：**阶段空场嗣后充填法；回采顺序；数值模拟；方案优化；采场稳定性控制
**中图分类号：**TD853 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）02-0190-14

# Research on optimization of mining sequence and stability control in sublevel drilling-stage room and subsequent filling mining

QIN Zhonghu[1,2] QIN Xiushan[3] LIU Qiang[3] LI Yanan[1,2] LI Yihao[1,2]
(1. Zijin Mining Group Co., Ltd., Shanghang 364200, Fujian, China;
2. Shanxi Zijin Mining Group Co., Ltd., Fanshi 034300, Shanxi, China;
3. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

**Abstract:** To address the challenge of unclear geostatic pressure behavior and ambiguous influence zones in porphyry ore body mining, which restricts safe and efficient mining operations, this study focuses on the engineering context of the 1-6# exploration lines at Shanxi Zijin Mining's porphyry gold deposit. Two single-level mining sequence schemes are proposed: Scheme Ⅰ "Sequential Panel Succession" and Scheme Ⅱ "Alternate Panel Succession". Additionally, four adjacent-level mining sequence schemes are introduced: Scheme Ⅲ "Aligned Stope Mining in Adjacent Panels", Scheme Ⅳ "Staggered Stope Mining in Adjacent Panels", Scheme Ⅴ "Alternate Stope Mining in Adjacent Panels", and Scheme Ⅵ "Alternate Panel and Stope Mining". Through the establishment of a three-dimensional numerical model, a numerical analysis was conducted for these six different schemes of the open

**收稿日期：**2025-10-10 **修回日期：**2025-11-03 **录用日期：**2025-11-20
**基金项目：**“十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC2903804)
**第一作者：**秦忠虎，硕士，高级工程师，主要从事采矿与安全工程研究。E-mail：759373209@qq.com
**通信作者：**秦秀山，硕士，正高级工程师，E-mail：qinxiushan@bgrimm.com
©Mining and Metallurgy Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

stoping with subsequent backfill method. The results showed that under the single stage mining condition, the main mechanical states of Scheme 1 and Scheme 2 were similar. Among them, Scheme 1 had a maximum shear stress of 32.7 MPa, which was 0.1 MPa lower than Scheme 2, and a maximum deformation of 8.11 cm, which was only 0.05 cm smaller than Scheme 2. From the distribution of plastic zones, Scheme 2 had similar plastic deformation. The large volume and uneven dispersion of the area are difficult to control; Under the synchronous mining conditions of adjacent stages, Scheme 3 has better indicators, Schemes 4 and 5 have strong mechanical responses, and Scheme 6 shows the best stability, with a maximum shear stress of 27.1 MPa, a maximum deformation of 7.32 cm, and the plastic zone volume of 35 397.03 $m^3$ being the lowest, and the plastic zone distribution is more dispersed. In the sublevel drilling-stage room and subsequent filling method, adjacent panels should be sequentially connected in a single stage, and adjacent stages should be synchronously mined with interval panels, which can effectively control the stability of the mining area. The research results can provide theoretical support and engineering reference for optimizing the mining sequence and stability control of similar mines.

**Key words:** sublevel drilling-stage room and subsequent filling method; mining sequence; numerical simulation; plan optimization; mining stability control

合理的回采顺序是保障矿山安全高效开采的关键，部分矿山企业由于开发较早，通常依赖工程类比经验，未能进行科学合理的规划[1]。伴随矿山持续开发，原有开采方案及参数逐渐难以适配安全生产、成本控制、经济效益及开采效率等多元需求。基于此，生产矿山需结合自身长远发展规划，及时推进采场参数优化工作，以保障矿山系统高效稳定运行[2]。

当前，分段凿岩阶段空场嗣后充填法作为我国金属矿山主流开采技术之一[3]，具备采场生产能力突出、采充与劳动生产效率高、作业安全性强，且采矿成本与矿石贫损指标均较低的显著优势。专家学者们对此进行了一定程度的研究，如王志君[4]进行了李楼铁矿空场嗣后充填法运行管理探讨，补充了一定的采场管理理论；田欣等[5]开展了石人沟铁矿采空区分段充填治理方案研究与应用；陈霖等[6]、王玉丁等[7]利用Mathews稳定图法，进行了大直径深孔空场嗣后充填法采场结构参数优化；张瑞明等[8]采用FLAC3D数值模拟软件，对采场跨度及回采顺序进行了分析研究，得出最优回采顺序为“隔一采一”；甘德清等[9]以缓倾斜极厚矿体高阶段采场为背景，分别研究了隔一采一、隔二采一、隔三采一不同开采方案的顶板沉降以及间柱稳定性；龙翼等[10]给出了断层条件下低品位厚大矿体最佳开采方法为阶段凿岩空场嗣后充填法；黄敏等[11]进行了倾斜中厚矿体阶段空场嗣后充填采矿工艺优化研究；商昱等[12]以急倾斜极薄至薄矿体为背景，给出了最佳开采方案为小分段平底出矿空场法；张良兵等[13]以深部急倾斜厚大矿体为背景，对回采顺序进行了优化研究；熊朝辉等[14]、余昕等[15]、刘大可等[16]对高阶段嗣后分层胶结充填体强度及结构优化进行了研究；黄德镛等[17]对多中段空区稳定性分析及间柱回采顺序优选进行了研究；李冬萍等[18]进行了金矿破碎矿体高分段嗣后充填采矿技术优化研究；王社光等[19]提出高阶段充填采场顶板稳定性控制的最佳方案为的“预应力长锚索+锚网喷”联合支护；程爱平等[20]考虑拱效应和开采边界影响，结合薄板理论，构建高阶段充填体下采空区顶板力学模型，并验证了其应用的可行性；王谦源等[21]给出了一种中段矿房嗣后带式充填体结构。虽然研究者们对金属矿山嗣后充填法进行了不同程度的研究，取得了很大进展，但对斑岩矿研究较少，且现有研究较少以应力和位移为研究对象优选最佳回采顺序。本文以山西紫金矿业斑岩金矿1-6#勘探线之间矿区工程地质条件为背景，开展了阶段空场嗣后充填法回采顺序优化与采场稳定性控制研究，针对单中段内盘区间回采顺序设计了2种不同方案，并在此基础上提出了4种相邻中段不同回采方案，采用有限差分软件FLAC3D建立数值计算模型，对比分析了不同回采方案应力、位移及塑性区分布特征，确定了矿区回采顺序最佳方案，研究成果能为同类矿山回采顺序优化及稳定性控制提供理论支撑与工程参考。

## 1 工程背景

山西紫金矿业斑岩金矿矿区设计开采范围为1-6#勘探线之间610~950 m标高，开采深度约350~690 m，生产规模$218\times10^4$ $t\cdot a^{-1}$，采用“主井+斜坡道”联合开拓方式，采矿方法为大直径深孔阶段空场嗣后充填法（图1）。矿区地表标高约1 300 m，矿山自上而下

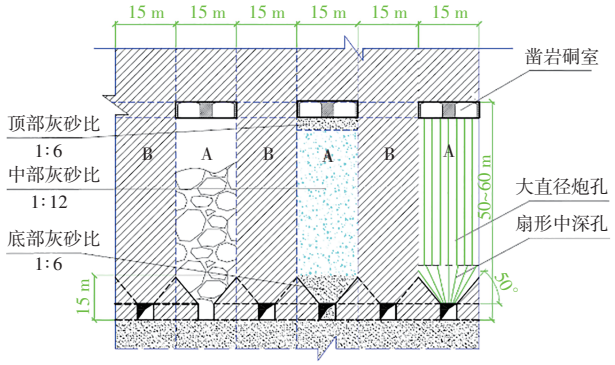



**图1 大直径深孔阶段空场嗣后充填采矿法**

**Fig. 1 Sublevel drilling-stage room and subsequent filling method with large diameter and deep holes**

分为3个采区，一采区按830、890 m的先后顺序依次开采，二采区按710、770 m的先后顺序依次开采，三采区按610、660 m的先后顺序依次开采；其中，首采中段为830 m中段。

开采过程中，610 m中段局部矿柱存在片帮现象，部分顶板围岩破碎。矿山前期设计未系统开展地压活动规律研究，对矿体开采引起的地压变化特征及影响区域缺乏划分依据，无法采取有针对性的地压活动控制和支护加固技术措施。因此，结合矿山开采现状和实际生产需求，优化回采顺序是解决当前问题、保障安全高效生产的关键。

## 2 矿区回采顺序优化研究方案

### 2.1 单中段回采顺序方案

如图2所示，针对盘区回采顺序（二盘—三盘—四盘）调整可能引发的地压活动规律差异问题，以710 m中段二至四盘区为案例，设计了两种接续方案，系统研究单中段内不同盘区回采顺序对采动地压活动的影响。

方案一采用矿山目前实际应用的二、三、四盘区依次接续顺序，先在二盘内遵循“隔三采一”的方式回采5、9、13矿房，接续到三盘回采4、8、12矿房，再接续到四盘回采5、9、13矿房，然后回采二盘开始下一个循环。

方案二采用二、四、三盘区接续的顺序，先在二盘内遵循“隔三采一”的方式回采5、9、13 矿房，接续到四盘回采5、9、13矿房，再接续到三盘回采4、8、12矿房，然后回采二盘开始下一个循环。

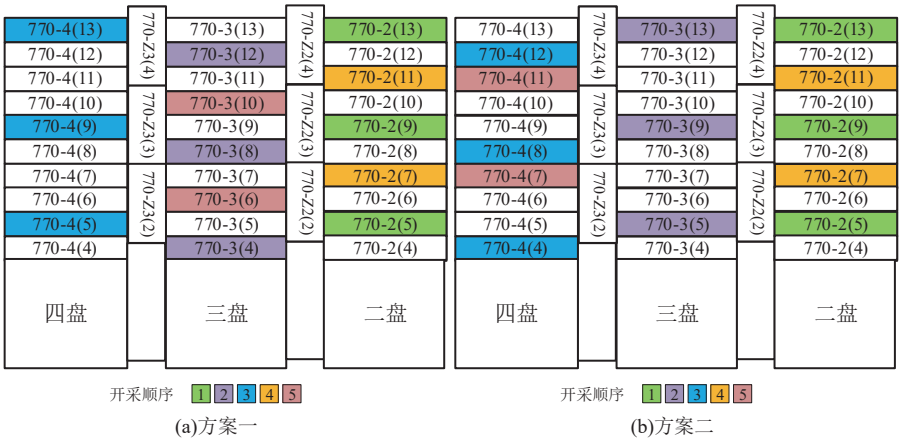



**图2 单中段回采顺序示意图**

**Fig. 2 Schematic diagram of single-stage mining sequence**

### 2.2 相邻中段同步回采方案

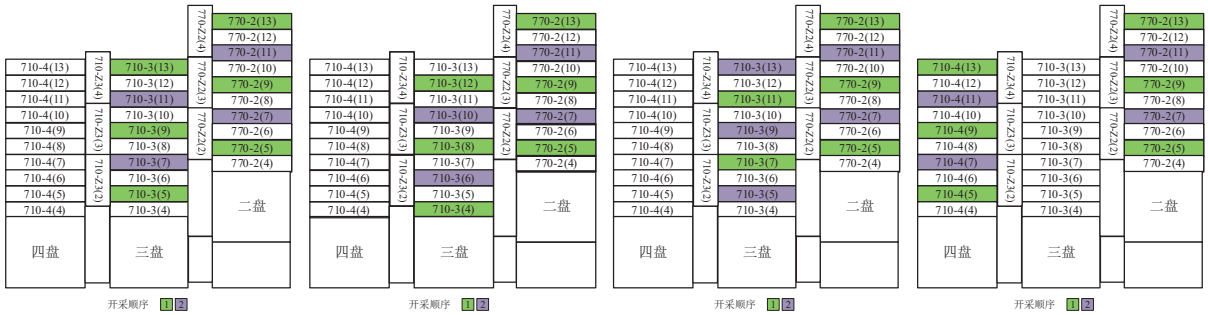
如图3所示，为研究相邻中段不同回采顺序布置的地压活动规律，研究相邻中段同步回采更优的回采顺序，以710 m中段二、三、四盘区为例，提出相邻中段同步回采的方案，所有方案遵循“隔三采一”的方式。

方案三先同时回采770 m二盘5、9、13矿房与710 m中段三盘5、9、13矿房，再同时回采770 m中段二盘7、11矿房与710 m中段三盘7、11矿房，后续沿用此顺序接续。

方案四先同时回采770 m中段二盘5、9、13矿房与710 m中段三盘4、8、12矿房，再同时回采770 m中段二盘7、11矿房与710 m中段三盘6、10矿房，后续沿用此顺序接续。

方案五先同时回采770 m中段二盘5、9、13矿房与710 m中段三盘7、11矿房，再同时回采770 m中段二盘7、11矿房与710 m中段三盘5、9、13矿房，后续沿用此顺序接续。

方案六先同时回采770 m中段二盘5、9、13矿房与710 m中段四盘7、11矿房，再同时回采770 m中




(a)方案三 (b)方案四 (c)方案五 (d)方案六

**图3 相邻中段同步回采顺序示意图**

**Fig. 3 Schematic diagram of adjacent stages synchronous mining sequence**

段二盘7、11矿房与710 m中段四盘5、9、13矿房，后续沿用此顺序接续。

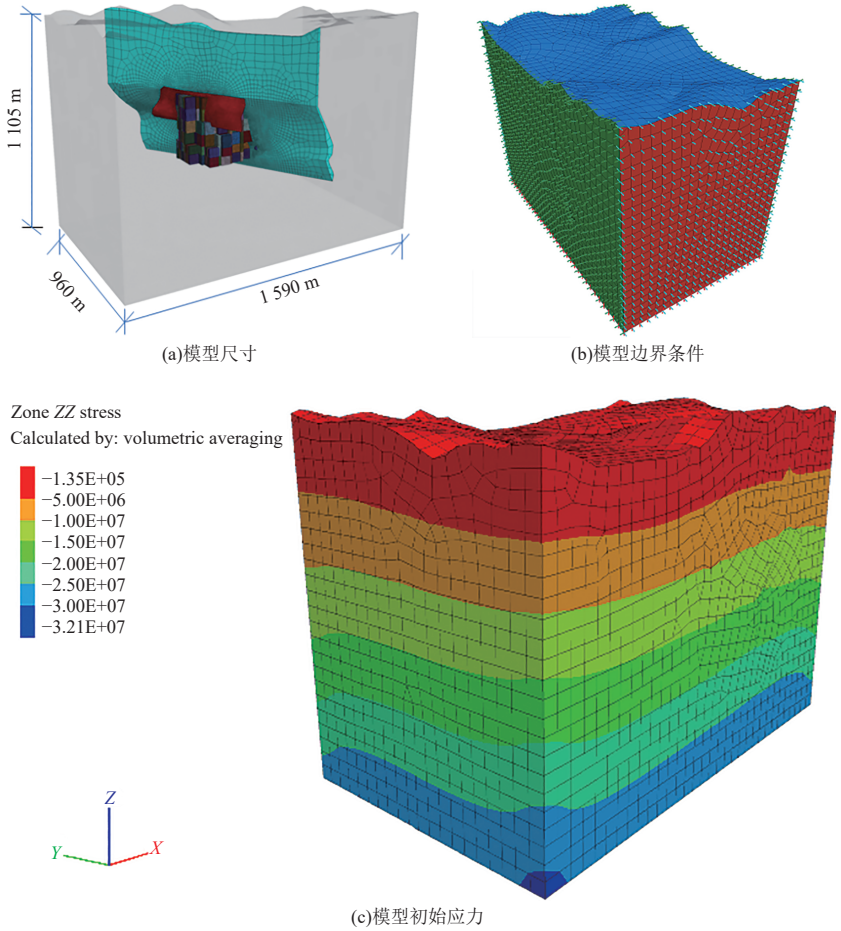
## 3 矿区回采顺序优化数值模拟研究

为揭示不同回采顺序下采场应力分布演化规律及围岩变形破坏机制，采用有限差分软件FLAC3D建立数值计算模型，通过对比分析不同方案的模拟结果，为优化回采设计提供依据。

### 3.1 数值模型建立

如图4所示，以610~950 m标高的斑岩矿体作为研究对象，建立包含地表、矿体、断层、中段、盘区、矿房、矿柱的三维模型，模型底部高程200 m，顶部高程1 305 m，地质模型长度1 590 m，宽度为960.4 m，最大高度1 105 m。其中$F_4$断层为区域性断层，断层延伸到地表面，$F_{4\text{-}1}$为局部断层，仅在矿体范围内。

在模型底部约束$Z$方向位移，在模型的四个竖直




(a)模型尺寸 (b)模型边界条件

(c)模型初始应力

**图4 斑岩矿数值计算分析模型**

**Fig. 4 Numerical computation and analysis model for the porphyry deposit**

边界面约束其法向位移，采用“Mohr-Coulomb”作为本构模型。模型底部及四个竖直边界面均约束法向位移，根据矿山历史资料修正初始地应力，岩层物理力学参数如表1所示。

**表1 各岩层物理力学参数**

**Table 1 Physical and mechanical parameters of each rock layer**

| 岩层 | 容重/(kN·m$^{-3}$) | 体积模量/GPa | 剪切模量/GPa | 内摩擦角/(°) | 黏聚力/MPa |
|---|---|---|---|---|---|
| 石英斑岩 | 25.4 | 10.45 | 7.51 | 44.51 | 3.09 |
| 片麻岩断层 | 27.5 | 15.59 | 12.23 | 49.46 | 4.00 |
| 粉砂岩 | 17.56 | 0.85 | 0.33 | 25.13 | 0.14 |
| 顶、底部充填体 | 17.35 | 0.25 | 0.14 | 30.11 | 0.33 |
| 中部充填体 | 16.23 | 0.93 | 0.05 | 25.68 | 0.21 |

### 3.2 单中段回采顺序数值模拟分析

#### 3.2.1 应力变化特征对比分析

方案一与方案二的剪切应力对比结果如图5所示。两种方案的剪应力变化规律基本相似，初始阶段方案二的剪应力增长较快，方案一峰值出现稍晚；峰值后两者剪应力均逐渐下降，随后均出现一次明显下降后急剧上升，最终剪应力值趋于接近，方案一为32.7 MPa，方案二为32.8 MPa。

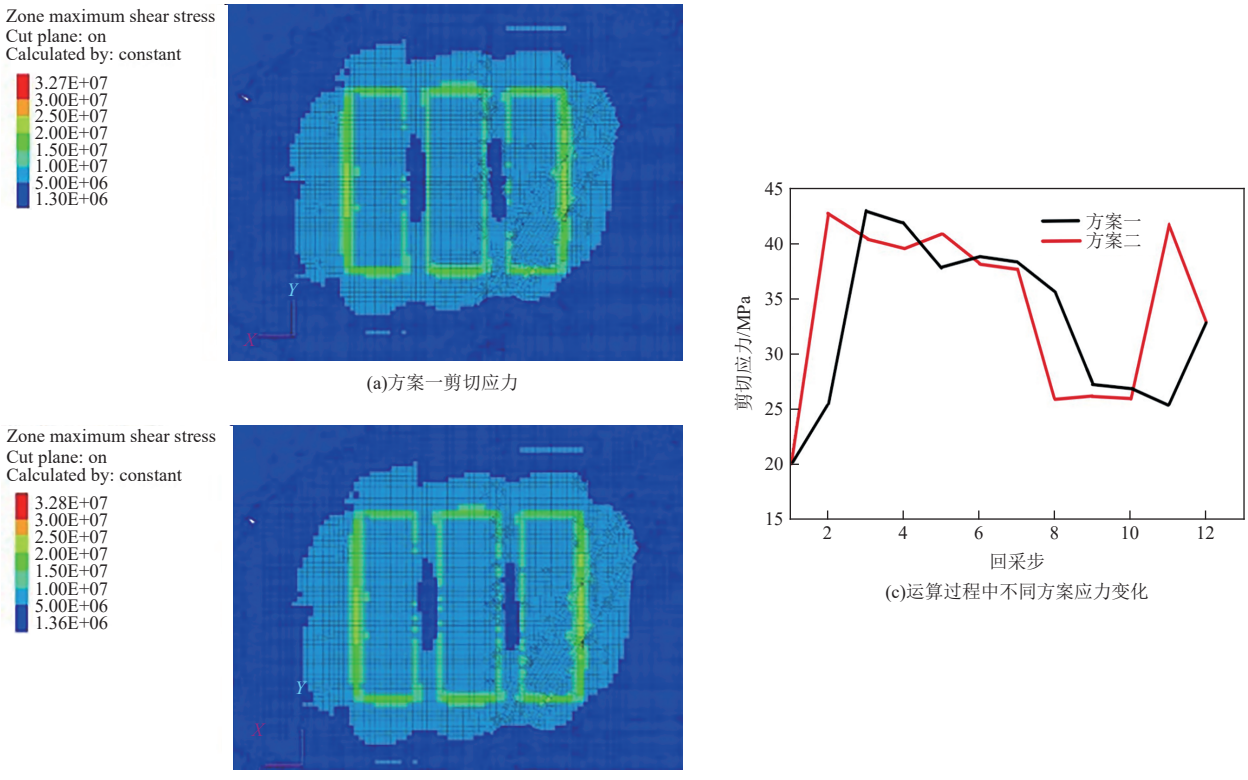



**图5 不同方案剪切应力对比图**

**Fig. 5 Shear stress comparison charts for different schemes**

#### 3.2.2 位移变化特征对比分析

图6为两种方案在开采过程中最大位移的变化规律。在回采步1~6，方案一与方案二的位移均呈缓步增长，且方案一位移始终大于方案二；回采步6~10，两方案的位移变化趋势基本一致；自回采步9起，两者位移均开始增长；回采步10后，方案一的位移持续大于方案二；在回采步10~11，方案二位移增长较为平缓，而从回采步11起则迅速增大，直至开采结束。最终方案二的最大位移为8.16 cm，略大于方案一的8.11 cm。

如图7、图8所示，方案一和方案二最大合位移均发生在$Z$=824 m高程处，距离开采矿房顶部$Z$=830 m较近，最大位移发生在中部已开采矿房上。变形以竖向变形为主，方案一最大$Z$向变形为8.10 cm，方案二最大$Z$向变形为8.15 cm，水平方向变形表现为指向矿房内部的收缩变形。

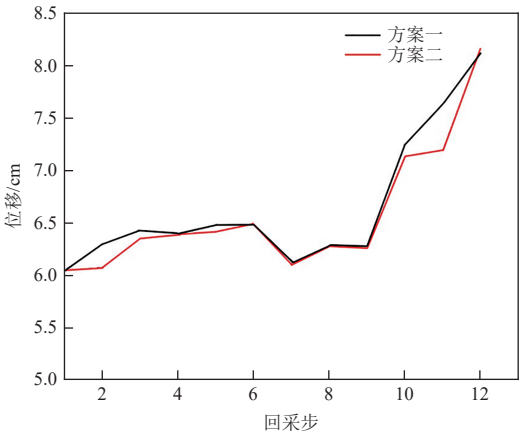
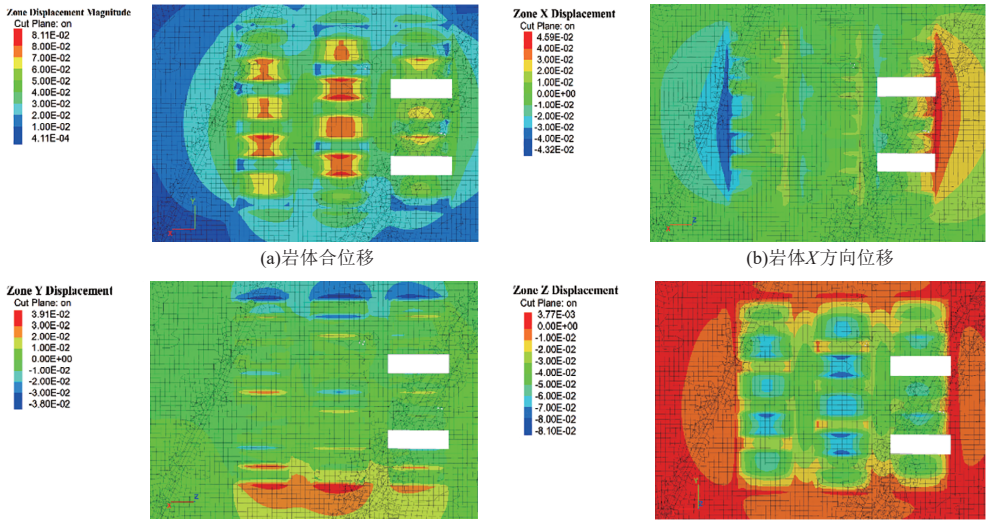



图6　不同方案位移变化特征

**Fig. 6　Characteristics of displacement changes in different schemes**

3.2.3　塑性区破坏区域对比分析

方案一与方案二塑性区破坏对比见图9。图9揭示了矿体开挖后开采区域附近岩体塑性区的分布规律。可以看出，方案一塑性区的体积明显小于方案二。其中，方案一中塑性破坏主要由剪切破坏构成，主要集中在开挖处和开挖处左侧区域，既开挖处左侧岩体强度较弱；其中开采步11造成塑性破坏体积最大值为187 267.2 $m^3$。局部岩体由于张应力产生集中应力破坏最大值为90.738 67 $m^3$；方案二中塑性破坏主要由剪切破坏构成，主要集中在开挖处岩体区域，部分剪切破坏分散在开挖处两侧；其中开采步11造成塑性破坏体积最大值为176 450.3 $m^3$，局部岩体由于张应力产生集中应力破坏体积为55.61 $m^3$。

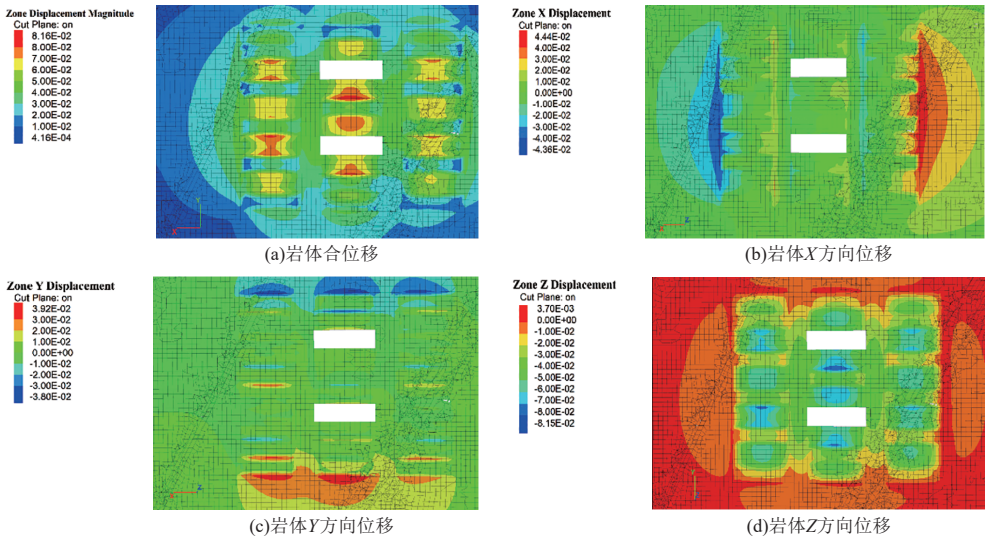



(a)岩体合位移　(b)岩体$X$方向位移

(c)岩体$Y$方向位移　(d)岩体$Z$方向位移

图7　方案一最终开采位移分布

**Fig. 7　Final displacement distributions for scheme 1**

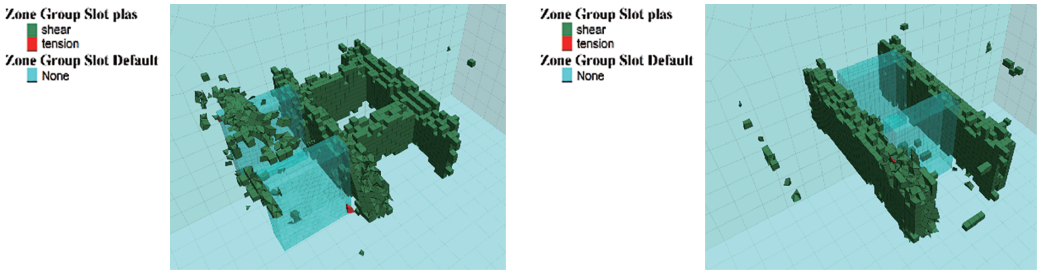



(a)岩体合位移　(b)岩体$X$方向位移

(c)岩体$Y$方向位移　(d)岩体$Z$方向位移

图8　方案二最终开采位移分布

**Fig. 8　Final displacement distributions for scheme 2**




(a)方案一塑性区分布　(b)方案二塑性区分布

**图9　单中段不同回采顺序方案塑性区分布**

**Fig. 9　Plastic zone distribution for different mining sequence schemes in a single level**

### 3.3　相邻中段同步回采数值模拟分析

#### 3.3.1　应力变化特征对比分析

各方案的剪应力变化规律如图10所示。在初始阶段，方案四的剪应力增长速度大于方案三，两者均在回采步2达到峰值，至回采步3期间，两者应力均出现下滑。自回采步3起，方案四剪应力急剧上升，而方案三则转为缓慢增长，方案五与方案六的变化趋势一致。整体来看，方案三的应力波动幅度最小，其最大剪应力为23.13 MPa，在所有方案中为最低。

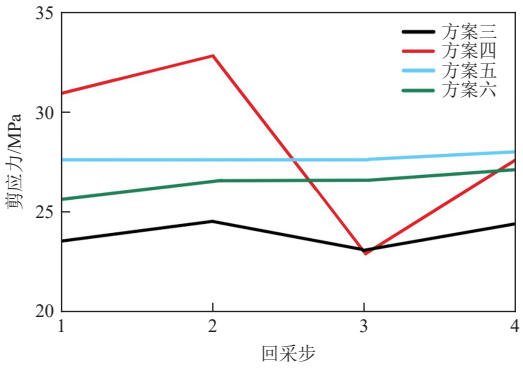


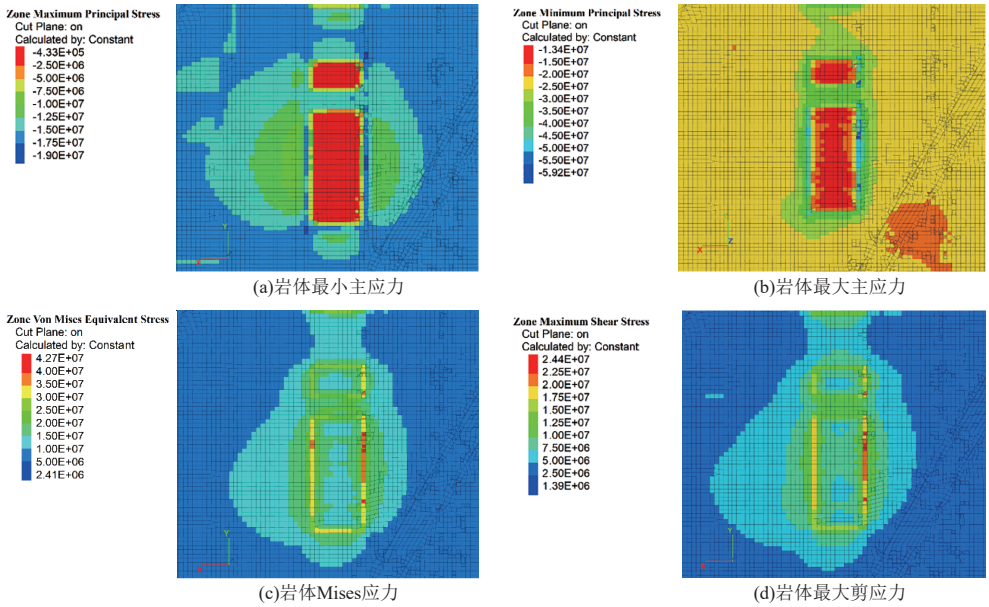

**图10　方案三至方案六剪切应力**

**Fig. 10　Shear stress for schemes three to six**

4种回采顺序方案下的地压分布规律（图11~14）较为相似，从Mises应力和剪应力的分布规律看，开采矿房的下部边缘出现较为明显的应力集中区，方案三、方案四、方案五与方案六对应的最大剪应力均位于开采区域右侧，分别为24.4、27.6、28.0、27.1 MPa。

#### 3.3.2　位移变化特征对比分析

4种方案在开采过程中的最大位移变化规律如图15所示。在回采步1~2过程中，方案三与方案四均趋于稳定，方案五大幅上升，方案六小幅下降，方案五位移大于方案六，方案三与方案四相近；在回采步2~3过程中，方案四和方案六位移变化规律接近一致，方案三位移减少，方案五位移增加；从回采步3开始，方案三与方案六以相似变化规律增加位移，方案三位移变化均大于方案六；在回采步3~4过程中，

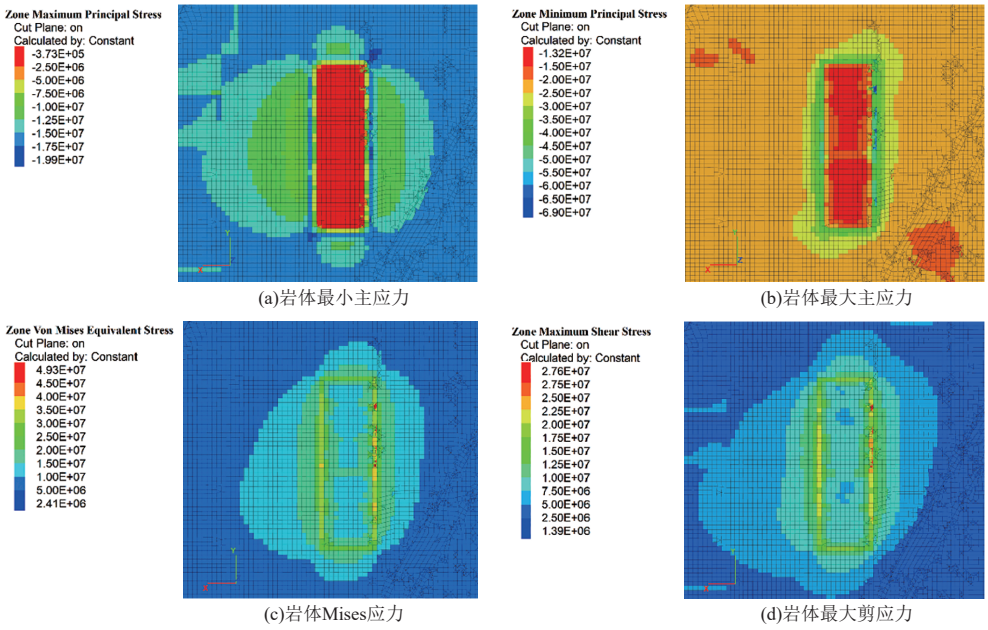



(a)岩体最小主应力　(b)岩体最大主应力

(c)岩体Mises应力　(d)岩体最大剪应力

**图11　方案三最终开采地压分布规律**

**Fig. 11　Distribution patterns of final mining ground pressure for scheme 3**

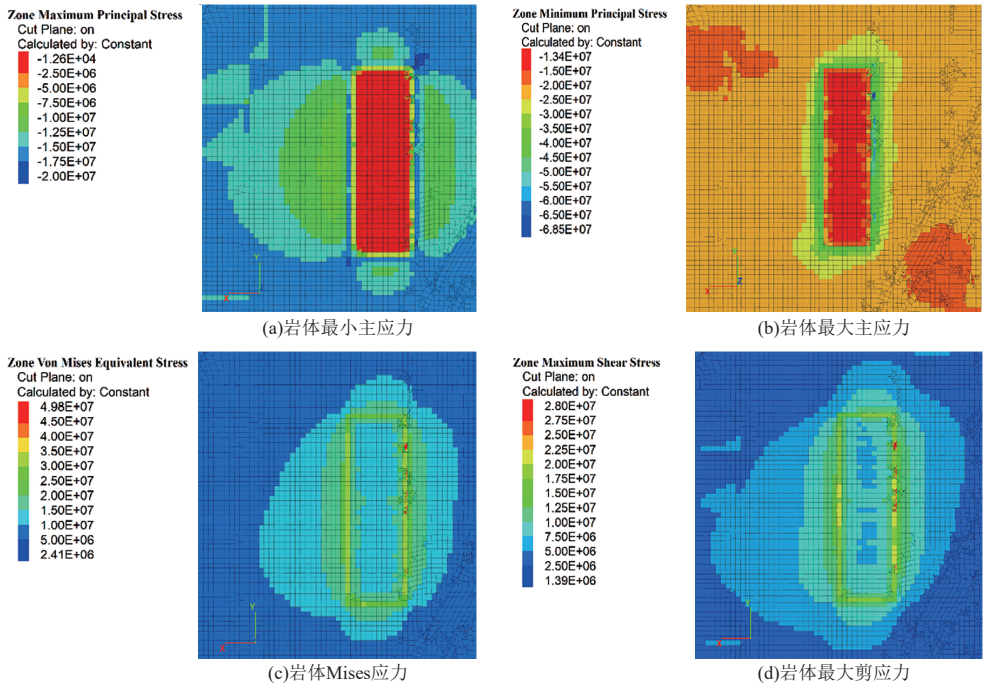



(a)岩体最小主应力　(b)岩体最大主应力

(c)岩体Mises应力　(d)岩体最大剪应力

**图12　方案四最终开采地压分布规律**

**Fig. 12　Distribution patterns of final mining ground pressure for scheme 4**




(a)岩体最小主应力　(b)岩体最大主应力

(c)岩体Mises应力　(d)岩体最大剪应力

**图13　方案五最终开采地压分布规律**

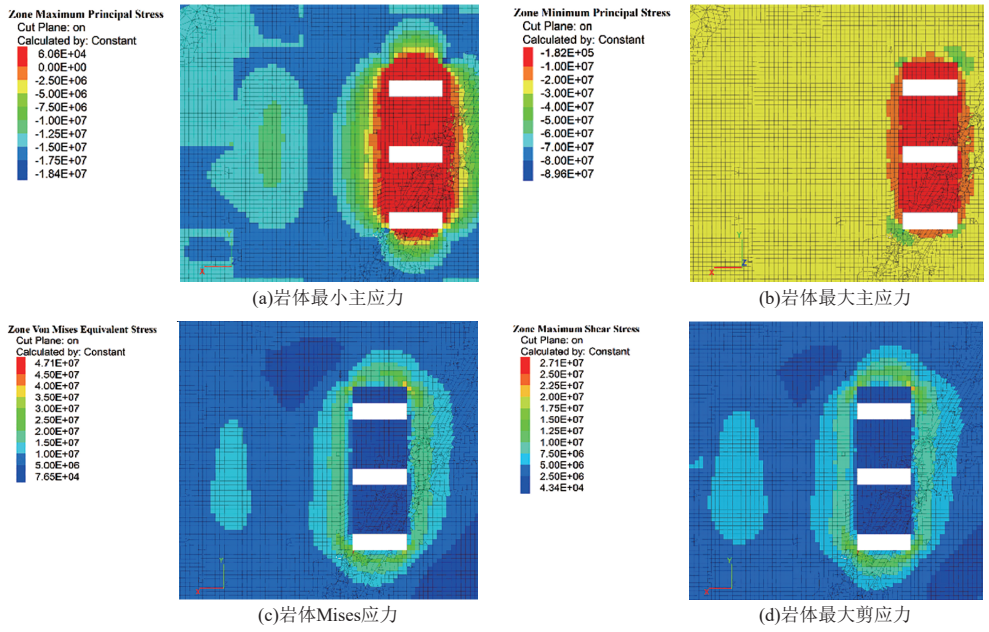
**Fig. 13　Distribution patterns of final mining ground pressure for scheme 5**

方案五位移增长较为平缓；从回采步1~6方案六位移均为最小值，其最小位移为6.41 cm。

如图16~19所示，方案四和方案六的最大合位移发生均发生在$Z$=739 m高程处，方案三的最大合位移发生在$Z$=743 m高程处，方案五的最大合位移发生在$Z$=816 m高程处，距离开采矿房顶部$Z$=830 m较近，最大位移发生在中部已开采矿房上。变形以竖向变形为主，方案三最大竖向变形为5.30 cm，方案四最大竖向变形为4.72 cm，方案五最大竖向变形为15.8 cm，方案六最大竖向变形为4.59 cm，水平方向变形均表现为指向矿房内部的收缩变形。

3.3.3　塑性区破坏区域对比分析

如图20所示，随着回采步骤的增加，塑性区的总体积呈现上升趋势。由于部分回采步产生的塑性区在相邻矿房内，在下一开采步被挖除，因此会出现一定的波动。方案三、方案四、方案六的塑性区以剪




(a)岩体最小主应力　(b)岩体最大主应力

(c)岩体Mises应力　(d)岩体最大剪应力

**图14　方案六最终开采地压分布规律**

**Fig. 14　Distribution patterns of final mining ground pressure for scheme 6**

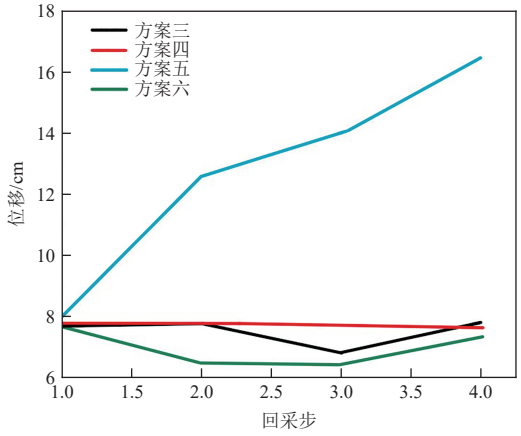


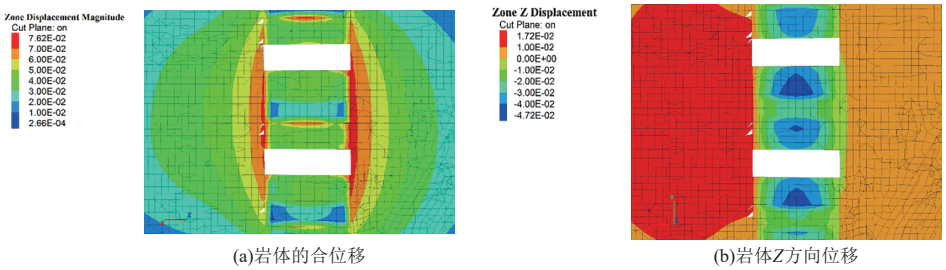

**图15　方案三至方案六剪切位移**

**Fig. 15　Shear displacement for schemes three to six**

切屈服为主，方案五的塑性区以拉伸屈服为主，具有明显的差异性；方案三与方案四、方案六总塑性破坏变化规律与剪切破坏规律相近；方案五总塑性区破坏变化规律与拉伸破坏规律相似。

### 3.4　矿区回采顺序最佳方案

对比单中段回采顺序方案一和方案二，从最终状态看，方案一的最大剪应力为32.8 MPa，最大变形为8.11 cm，塑性区体积为160 847.13 $m^3$；方案二的最大剪应力为32.7 MPa，最大变形为 8.16 cm，塑性区体积为168 893.15 $m^3$，两者主要力学状态接近。从塑性区的分布看，方案二的塑性区体积大，厚度较大，易对开采安全产生一定的影响。因此，从最大剪



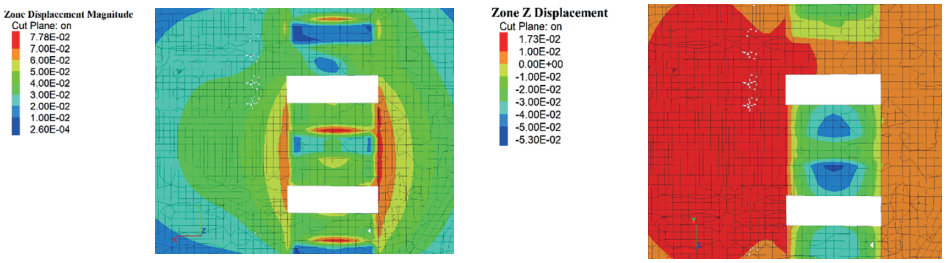

(a)岩体的合位移　(b)岩体*Z*方向位移

**图16　方案三最终开采位移分布规律**

**Fig. 16　Distribution patterns of final mining displacement for scheme 3**

应力、最大变形量、塑性区体积及分布方面综合比较两个方案，建议优选方案一，即单中段内相邻盘区按照盘区顺序依次开采的方式更佳。

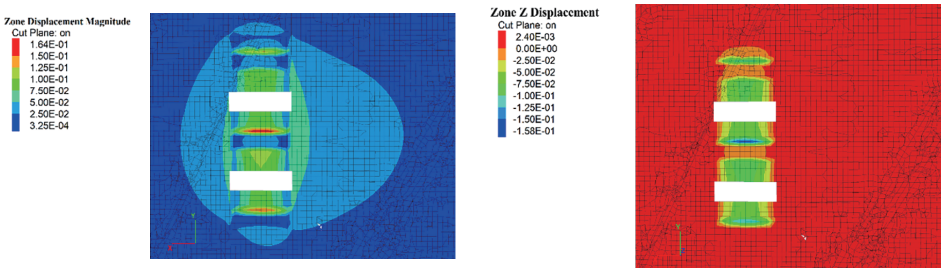
对比相邻中段同步回采方案三、四、五、六，从最终状态看，方案三的最大剪应力为24.4 MPa，最大变形为7.78 cm，塑性区体积为85 738.24 $m^3$；方案四的最大剪应力为27.6 MPa，最大变形为7.62 cm，塑性区体积为71 443.43 $m^3$；方案五的最大剪应力为28.0 MPa，




(a)岩体的合位移　　(b)岩体Z方向位移

**图17　方案四最终开采位移分布规律**

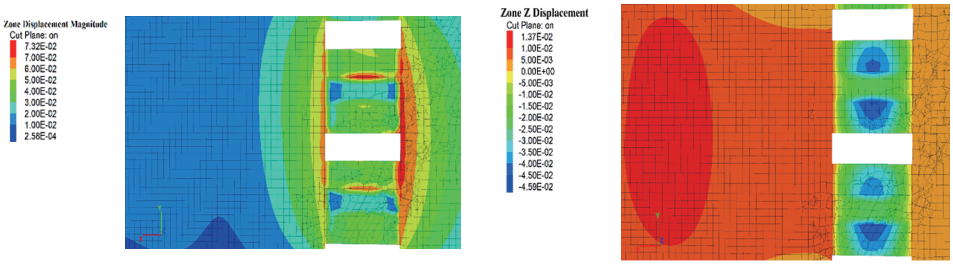
**Fig. 17　Distribution patterns of final mining displacement for scheme 4**




(a)岩体的合位移　　(b)岩体Z方向位移

**图18　方案五最终开采位移分布规律**

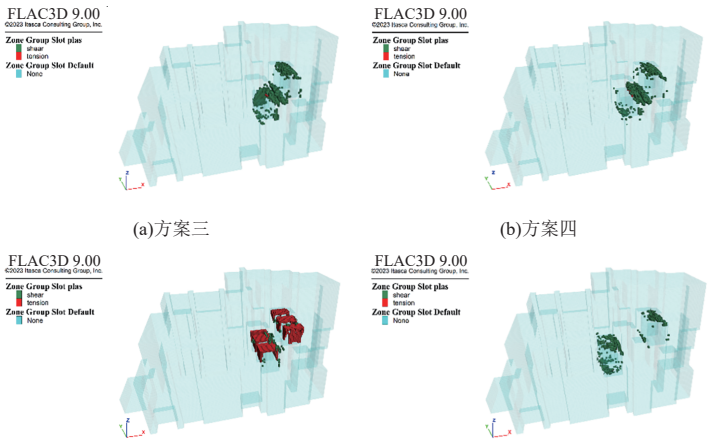
**Fig. 18　Distribution patterns of final mining displacement for scheme 5**




(a)岩体的合位移　　(b)岩体Z方向位移

**图19　方案六最终开采位移分布规律**

**Fig. 19　Distribution pattern of final mining displacement for plan 6**




(a)方案三　　(b)方案四

(c)方案五　　(d)方案六

**图20　相邻中段不同回采顺序方案塑性区分布**

**Fig. 20　Plastic zone distributions for different mining sequence schemes in adjacent levels**

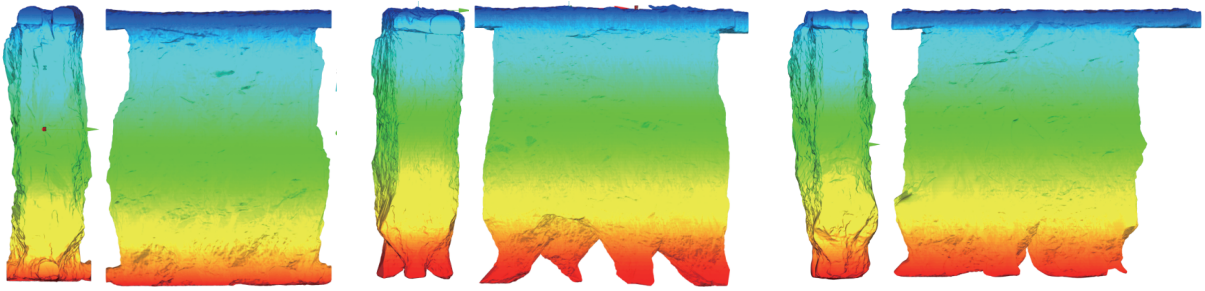
最大变形为15.40 cm，塑性区体积为111 509.12 $m^3$；方案六最大剪应力为27.1 MPa，最大变形为7.32 cm，塑性区体积为35 397.03 $m^3$。方案四、五较方案三、六最大剪应力、最大变形、塑性区体积都较大。从塑性区的分布看，方案六的塑性区体积最小，分布区域更分散。因此，从最大剪应力、最大变形量、塑性区体积及分布方面综合比较四个方案，建议优选方案六，即相邻中段同步回采时按照间隔一个盘区开采的方式更佳。

### 3.5 现场应用效果

山西紫金矿业斑岩金矿矿区按照上述最佳方案布置回采顺序，取得了良好的地压控制效果。

如图21所示，利用三维激光扫描仪对已采矿房开展轮廓扫描与体积计算，770~710 m中段二盘4#矿房设计方量41 994.29 $m^3$，实测总方量41 866.736 $m^3$，垮塌总量642.865 $m^3$，垮塌率(垮帮量/设计矿量)为1.53%。660~610 m中段四盘4#矿房设计方量39 130 $m^3$，实测总方量36 176.711 $m^3$，垮塌总量2 961.906 $m^3$，垮塌率为7.57%。890~830 m中段五盘12#矿房设计方量52 361.74 $m^3$，实测总方量51 202.398 $m^3$，垮塌总量2 111.592 $m^3$，垮塌率4.88%。

上述已采矿房三维激光扫描成果显示，多数矿房边界保持规整，跨帮现象得到有效控制，整体稳定性显著提升，未出现大规模垮塌。同时，该方案还降低了二步骤回采时充填体混入量，进而提升了资源回收效率，降低了损失贫化。



(a)770~710 m中段二盘4#矿房　(b)660~610 m中段四盘4#矿房　(c)890~830 m中段五盘12#矿房

**图21 已采矿房三维激光扫描点云图**

**Fig. 21 3D laser scanning point cloud map of mined-out stopes**

## 4 支护控制措施

山西紫金矿业斑岩金矿采场周边各类凿岩巷道、拉底巷道、石门、主要运输巷道、盘区运输巷道的位于不同的矿岩内，数值模拟结果各区域应力环境各不相同，而且各类工程的服务年限不同，应根据其影响因素制定支护等级标准，主要考虑的因素如下：

1)矿岩完整性

岩体完整性是影响斑岩金矿顶板稳定性的主要影响因素之一，断层影响区域围岩呈块状破坏，层状节理发育的局部区域顶板破碎。主要软弱结构面(断层或破碎带)的产状与巷道轴向呈不同的组合关系，对顶板稳定性的影响程度不同。

2)矿岩质量

斑岩金矿主要岩组主要包括石英斑岩岩组、片麻岩岩组，各岩组岩体质量$Q$值在不同开采水平略有不同，斑岩金矿石英斑岩岩组与片麻岩岩组的岩体级别均为好~一般，因而矿岩质量是影响顶板稳定性的因素之一。

3)采动影响

根据数值模拟分析结果，斑岩金矿在开采过程中，不同回采阶段、区域的地压活动规律具有较大差异，局部硐室、巷道会受采动的影响形成应力集中或产生破坏变形；因此，采动影响是顶板等级划分的主要考虑因素之一。

4)地下水影响

根据地下水出露的3种状态：干燥或较干燥、潮湿活滴状出水、淋雨状出水分别给出权值。

5)服务功能

矿山采掘工程种类较多，采场、硐室、巷道的重要程度、顶板暴露面积彼此间有较大差异，服务年限各不相同。比如，运输平巷要比装矿进路的重要程度高，装矿进路顶板的破坏只是影响局部，而运输平巷顶板的垮冒将导致整个矿块的报废。因此，采掘工程的服务功能及重要程度也是顶板等级划分的考虑因素之一。

6)地压监测结果

地压监测结果反映了监测区域的实时地压状

态，通过微震、应力等监测系统监测矿山重点地压区域，超前分析地压情况，根据发布预警信息，及时判断监测区域顶板稳定状态，作为顶板等级划分的考虑因素之一。

根据上述六个因素对围岩稳定影响程度的不同，分别给出一定的权值，见表2。

针对具体地压显现区域权值总和，按照表3划分支护等级，并结合现场实际情况选择支护形式。

**表2　支护等级划分及影响因素权值**

**Table 2　Support level classification and weighting of influencing factors**

| 影响因素 | 类型程度 | 权值范围 |
|---|---|---|
| 矿岩完整性 | 大断层（断距>1 m）裂隙很发育，节理面间距<0.1 m，节理连续，岩体破碎，近似散体 | 30 |
| | 有中等断层（断距0.3~1.0 m），裂隙较发育，节理面间距0.3~1.0 m，岩体完整性中等，块状岩 | 20 |
| | 有小断层（断距<0.3 m），节理面间距>1.0 m，裂隙稍发育，岩体较完整 | 10 |
| 矿岩质量 | 软性岩石，岩质很差，遇水岩质显著变坏（断层角砾岩、部分石英斑岩） | 20 |
| | 半坚硬岩石到软岩，岩质中等（石英斑岩、黑斑岩） | 10 |
| | 岩石坚硬，岩质很好（片麻岩） | 0 |
| 采动影响 | 大 | 20 |
| | 一般 | 10 |
| | 小 | 0 |
| 地下水的影响 | 淋雨状出水 | 10 |
| | 潮湿、滴状出水 | 5 |
| | 干燥、较干燥 | 0 |
| 服务功能 | 重要，顶板暴露面积大，服务年限长 | 10 |
| | 一般，顶板暴露面一般，服务年限一般 | 5 |
| | 不重要，顶板暴露面小，服务年限较短 | 0 |
| 地压监测结果 | 预警区域 | 10 |
| | 重点区域 | 5 |
| | 正常区域 | 0 |

**表3　支护等级划分及支护形式**

**Table 3　Support level classification and support types**

| 权值 | 100~61 | 60~31 | <30 |
|---|---|---|---|
| 支护等级 | Ⅰ级顶板 | Ⅱ级顶板 | Ⅲ级顶板 |
| 适用范围 | 适应于大的断层、破碎带等特殊地段、巷道顶板有渗水地段或因采场出现变形、冒落，存在一定安全隐患需要继续生产的地段的支护 | 适用于围岩不稳固的巷道或布置在矿体内部的巷道，以及重要工程的破碎不稳地段，即对应岩体质量较差的区域 | 适应于处于欠稳固区域的井巷工程及采场，如采场凿岩硐室、进路等巷道 |
| 支护形式 | U型钢支护、浇砼支护 | 锚网喷联合支护 | 锚网支护或不支护 |

## 5　结论

1）对比单中段回采顺序方案一和方案二，从最终状态看，方案一和方案二两者主要力学状态接近。从最大剪应力、最大变形量、塑性区体积及分布方面综合比较两个方案，建议优选方案一，即单中段内相邻盘区按照盘区顺序依次开采的方式更佳。

2）对比相邻中段同步回采方案三、四、五、六，从最终状态看，方案四、五较方案三、六最大剪应力、最大变形、塑性区体积都较大。从塑性区的分布看，方案六的塑性区体积最小，分布区域集中程度更低。从最大剪应力、最大变形量、塑性区体积及分布方面综合比较两个方案，建议优选方案六，即相邻中段同步回采时按照间隔一个盘区开采的方式更佳。

3）按照最佳方案规划回采顺序，矿山地压控制效果良好，多数矿房边界较为清晰规整，有效控制了跨帮率，未出现大规模变形垮塌情况。同时，减少了二步骤回采矿房充填体混入量，降低了回采损失贫化率。

4）针对斑岩金矿采场周边各类巷道所处矿岩条件、应力环境及服务年限差异，需依据多因素制定支护等级。主要考虑矿岩完整性、矿岩质量、采动影响、地下水状态、工程服务功能及地压监测结果六项因素，通过赋予各因素相应权值，划分支护等级并选取合理支护形式。

参考文献

[1] 王连成，邵安林，曲福明，等. 金属矿山开采技术发展现状与展望[J]. 工程科学学报，2025, 47(5): 971-983.
WANG L C, SHAO A L, QU F M, et al. Current status and outlook of metal mining technology development[J]. Journal of Engineering Science, 2025, 47(5): 971-983.

[2] 柳小波，丛峰武，张宝金，等. 我国金属矿山智慧化转型实践与展望[J]. 金属矿山, 2025(5): 1-16.
LIU X B, CONG F W, ZHANG B J, et al. Practices and prospects of intelligent transformation in China's metal mines[J]. Metal Mine, 2025(5): 1-16.

[3] 许文远. 破碎矿体交错布置大跨度下向分段充填采矿技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2024.
XU W Y. Research on large-span downward segmented filling mining technology for interlaced arrangement of broken ore bodies[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2024.

[4] 王志君. 李楼铁矿空场嗣后充填法运行管理探讨[J]. 金属矿山, 2022(6): 35-39.
WANG Z J. Operational management of the subsequent backfilling method at the Lilou iron ore mine[J]. Metal Mine, 2022(6): 35-39.

[5] 田欣，何荣兴，张贤，等. 石人沟铁矿采空区分段充填治理方案研究与应用[J]. 金属矿山, 2023(8): 162-170.
TIAN X, HE R X, ZHANG X, et al. Research and application of segmented backfilling management plan for the abandoned mine areas in Shirengou iron mine[J]. Metal Mine, 2023(8): 162-170.

[6] 陈霖，黄明清，唐绍辉，等. 大直径深孔空场嗣后充填法采场结构参数优化及稳定性分析[J]. 金属矿山, 2022(11): 44-51.
CHEN L, HUANG M Q, TANG S H, et al. Optimization of structural parameters and stability analysis for large-diameter deep-hole open-stoping mine with subsequent backfilling method[J]. Metal Mine, 2022(11): 44-51.

[7] 王玉丁，林卫星，欧任泽，等. 分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法采场跨度的优化[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(6): 19-25.
WANG Y D, LIN W X, OU R Z, et al. Optimization of mining span in segmented drilling-and-blasting stage with subsequent backfilling mining method[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(6): 19-25.

[8] 张瑞明, 魏丁一, 杜翠凤, 等. 阶段空场嗣后充填采矿法采场跨度及回采顺序优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(3): 10-14.
ZHANG R M, WEI D Y, DU C F, et al. Optimization of mining span and cutting sequence in stage-by-stage subsequent filling mining method[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(3): 10-14.

[9] 甘德清，孟岐，刘志义，等. 缓倾斜极厚矿体高阶段采场开采顺序优化[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5): 28-34.
GAN D Q, MENG Q, LIU Z Y, et al. Optimization of mining sequence for high-stage mining areas in gentle-dip, ultra-thick ore bodies[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(5): 28-34.

[10] 龙翼，陈绍民，严鹏. 断层条件下低品位厚大矿体采矿方法优化研究[J]. 金属矿山, 2023(4): 27-32.
LONG Y, CHEN S M, YAN P. Research on optimizing mining methods for low-grade, thick ore bodies under fault conditions[J]. Metal Mine, 2023(4): 27-32.

[11] 黄敏, 王晓军, 邱纪香, 等. 倾斜中厚矿体阶段空场嗣后充填采矿工艺优化研究[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(4): 483-492.
HUANG M, WANG X J, QIU J X, et al. Research on optimization of step-by-step backfilling mining process for inclined medium-to-thick ore bodies[J]. Journal of Mining Science, 2024, 9(4): 483-492.

[12] 商昱，崔忠贵，龚华平，等. 基于采矿工艺重构与协同开采的小分段平底出矿小阶段空场法开发研究[J]. 矿产保护与利用, 2025, 45(4): 22-28.
SHANG Y, CUI Z G, GONG H P, et al. Research on small-segment flat-bottomed ore-discharge small-stage open-stoping method based on mining process reconstruction and cooperative mining[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(4): 22-28.

[13] 张良兵，毛德华，李杰林，等. 朱兰铁矿深部急倾斜厚大矿体回采顺序优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(3): 26-31.
ZHANG L B, MAO D H, LI J L, et al. Research on optimization of mining sequence for deep, steeply dipping, thick ore bodies in Zhulan iron mine[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(3): 26-31.

[14] 熊朝辉，谭玉叶，楚立申，等. 高阶段嗣后分层胶结充填体强度及结构优化研究[J]. 金属矿山, 2022(3): 35-42.
XIONG Z H, TAN Y Y, CHU L S, et al. Research on strength and structural optimization of high-stage post-stratified grout filling[J]. Metal Mine, 2022(3): 35-42.

[15] 余昕，熊朝辉，宋卫东，等. 高阶段嗣后胶结充填法矿柱与充填体动态稳定性研究[J]. 矿业研究与开发，2022，42(4): 26-31.
YU X, XIONG Z H, SONG W D, et al. Study on dynamic stability of mine pillars and backfill in high-stage post-grouting backfilling method[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(4): 26-31.

[16] 刘大可，张浩强，郭翔，等. 帕鲁特金矿破碎矿体嗣后充填采矿法采场结构参数优化[J]. 矿业研究与开发, 2025, 45(1): 32-40.
LIU D K, ZHANG H Q, GUO X, et al. Optimization of mining area structural parameters for subsequent backfilling mining method in the Parutkin gold mine broken ore body[J]. Mining Research and Development, 2025, 45(1): 32-40.

[17] 黄德镛，高聪，贾子月，等. 多中段空区稳定性分析及间柱回采顺序优选[J]. 有色金属工程, 2023, 13(6): 105-114.
HUANG D Y, GAO C, JIA Z Y, et al. Stability analysis of multi-level goaf and optimization of inter-pillar mining sequence[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(6): 105-114.

[18] 李冬萍，张浩强. 金矿破碎矿体高分段嗣后充填采矿技术优化研究[J]. 金属矿山，2021(12): 102-105.
LI D P, ZHANG H Q. Research on optimizing high-segmentation subsequent backfilling mining technology for crushed gold ore bodies[J]. Metal Mine, 2021(12): 102-105.

[19] 王社光，向伟华，赵兴东，等. 高阶段充填采场顶板稳定性及支护参数优化研究[J]. 矿业研究与开发，2025, 45(2): 33-41.
WANG S G, XIANG W H, ZHAO X D, et al. Research on roof stability and support parameter optimization in high-stage backfilled mining areas[J]. Mining Research and Development, 2025, 45(2): 33-41.

[20] 程爱平，杜澳宇，楚立申，等. 考虑拱效应的高阶段充填体下采空区顶板跨度和厚度计算模型[J]. 采矿与安全工程学报，2025, 42(1): 218-228.
CHENG A P, DU A Y, CHU L S, et al. Calculation model for span and thickness of roof in high-stage backfill areas considering arch effect[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(1): 218-228.

[21] 王谦源，袁庆盟，林敏，等. 空场嗣后充填体稳定性分析与带式充填结构设计[J]. 矿业研究与开发，2024, 44(6): 26-33.
WANG Q Y, YUAN Q M, LIN M, et al. Stability analysis of subsequent backfill in open pits and design of belt-type backfill structures[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(6): 26-33.