思山岭铁矿高地应力层状矿体采场结构参数优化设计*

崔松[1],幸安康[2],王晓南[1],曾子强[2],丁勇[1],苏伯阳[1],马宇东[1],汪昕[2]

(1.本溪龙新矿业有限公司, 辽宁 本溪市 117013;
2.深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:针对深部矿山采场在高地应力与复杂地质条件下稳定性不足的问题,以思山岭铁矿为工程背景,建立"理论-经验-数值"协同优化的采场结构参数优化方法。首先,利用Mathews稳定性图解法,依据Q系统修正值和形状因子初步筛选采场暴露面积与矿柱安全范围;其次,通过工程类比分析国内外类似矿山采场尺寸经验,确定合理的顶板暴露面积和采场几何参数;最后,采用三维离散元数值模拟构建采场开挖模型,对3种不同采场结构参数方案的应力、位移、塑性区体积和张拉破裂数进行定量评估,确定最优方案。结果表明:矿房最优参数为80 m(长)×20 m(宽)×60 m(高),该方案顶板沉降量(1.76 cm)和边墙位移量(4.46 cm)均低于安全阈值,且塑性区体积(23 543 m^3)及张拉破裂数(2 157个)显著优于其他方案;采场开挖后顶板以张拉破坏为主、边墙呈拉剪混合破坏的应力重分布特征,为支护设计和灾害防控提供了定量依据。多方法协同优化体系为采场结构参数设计提供了科学依据,对千米级深井矿山具有重要工程借鉴价值。

关键词:深部开采;采场结构参数优化;高地应力;层状矿体;Mathews稳定性图解法;离散元模拟

中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0001-13

Optimal Design of Stope Structure Parameters for High In-situ Stress Stratified Orebodies in Sishanling Iron Mine

CUI Song[1], *XING Ankang*[2], *WANG Xiaonan*[1], *ZENG Ziqiang*[2], *DING Yong*[1], *SU Boyang*[1], *MA Yudong*[1], *WANG Xin*[2]

(1.Benxi Longxin Mining Co., Ltd., Benxi, Liaoning 117013, China;
2.State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: To address the stability challenges of stopes under high in-situ stress and complex geological conditions in deep mining operations, based on the engineering background of Sishanling Iron Mine, a "theoretical-empirical-numerical" collaborative optimization method for the stope structure parameters was established. Firstly, using the Mathews stability graphical method, the exposed area of the stope and the safety range of the pillars were initially screened based on the correction value of the Q system and the shape factor. Secondly, through engineering analogy analysis of the experience of similar stopes in both domestic and foreign regions, the reasonable exposed area of the roof and the geometric parameters of the stope were determined. Finally, a three-dimensional discrete element numerical simulation was employed to construct the mining excavation model. The stress, displacement, volume of the plastic zone, and the number of tensile fractures for the three different mining structure parameter schemes were quantitatively evaluated to determine the optimal scheme. The results show that the optimal parameters for the mining room are 80 m (length)×20 m (width)×60 m (height). The roof settlement (1.76 cm) and sidewall displacement (4.46 cm) of this scheme are both below the safety threshold, and the volume of the plastic zone (23 543 m^3) and the number of tension fractures (2 157) are significantly better than those of other schemes. After the stope excavation, the roof of the working face mainly undergoes tensile failure, while the side walls exhibit a mixed failure mode of tension and shear. This stress redistribution characteristic provides a quantitative basis for the design of support structures and disaster prevention. The multi-method collaborative optimization system provides a scientific basis for the design of stope structure parameters, and has significant engineering reference value for deep well mines with a depth of several kilometers.

Key words: Deep mining, Optimization of stope structure parameter, High in-situ stress, Stratified orebody, Mathews stability graphical method, Discrete element simulation

---

* **收稿日期**:2025-04-08

基金项目:辽宁省科学技术计划项目(2023JH1/10400004);国家重点研发计划项目(2023YFC2907201)

作者简介:崔松(1985—),男,河南开封人,硕士,高级工程师,主要从事智能采矿、采矿工艺、爆破等方面的管理和研究工作。E-mail:cuisong124@ejianlong.com

通信作者:汪昕(1986—),男,陕西柞水人,博士,教授,主要从事矿山岩体力学方面的教学与研究工作。E-mail:wangx@mail.neu.edu.cn

0 引言

随着浅部矿产资源的逐步枯竭,深部开采已成为金属矿山开发的必然趋势[1]。深部赋存的高应力、高地温、强扰动等复杂地质力学环境,导致开采过程中围岩稳定性控制难度显著上升[2-3]。深部矿山开采过程中,采场结构参数的合理性直接影响采场地压显现规律、矿产资源回收率及充填体协同承载性能。尤其在层状矿体开采中,陡倾层理与构造应力的作用引发非对称应力分布与层间滑移,传统参数优化方法面临严峻挑战[4-6]。层状岩体失稳机理的认知不足已成为制约安全高效开采的瓶颈。

采场结构参数作为控制矿山岩体扰动演化的核心要素,其时空优化直接影响开采安全性与资源回收效率[7]。在深部采场参数优化领域,多数学者通过现场监测、理论分析、室内试验及数值模拟等多种方法,对采场结构参数进行了系统研究,积累了丰富的实践经验,并提出了诸多具有参考价值的结论[8-9]。Mathews 稳定性图解法作为经典理论,通过 Q 系统分级与形状因子阈值判定暴露面积[10]。李施庆等[11]应用 Mathews 稳定性图解法中稳定系数的计算方法计算出每个矿房的稳定系数,通过矿房稳定系数在 Mathews 稳定性图上计算出每个矿房的水力半径值和极限跨度。但 Mathews 稳定性图解法基于静态强度准则,未考虑高地应力动态损伤累积效应[12-14]。通常,多数学者利用 Mathews 稳定性图解法进行采场稳定性分析,再结合数值模拟进行交叉验证[15-16]。杨立新等[17]通过拓展的 Mathews 稳定性图解法、FLAC3D 数值模拟软件进行研究,并基于 Mathews 稳定性图解法分析暴露时间对采空区稳定性的影响。工程类比法通过相似矿山数据筛选参数,具有经验优势,但是不同矿山实际情况的复杂多变导致其适应性不佳[18-19]。现有研究普遍存在三方面不足:其一,理论、经验与数值方法割裂,缺乏协同验证框架;其二,动态修正模型缺失,未量化层理倾角与应力路径的耦合效应;其三,多尺度评价指标(暴露面积、塑性区体积、变形阈值)未形成系统判据,难以支撑全生命周期优化。

针对上述问题,本研究以思山岭铁矿为工程载体,提出“理论-经验-数值”多方法协同优化框架。首先,开展 Mathews 稳定性图解法研究,通过 Q 系统分级与形状因子动态阈值判定,为层状矿体暴露面积控制提供了理论依据;其次,集成国内外相似矿山数据,构建经验数据库,筛选矿房布局;最后,采用 3DEC 构建三维离散元模型,模拟不同参数组合下的应力-位移场演化规律,量化塑性区体积、顶板沉降等关键指标。通过多方法交叉验证,提出兼顾安全性与经济性的采场参数优化方案,为深部层状矿体安全高效开采提供理论与技术支撑。

1 工程概况

思山岭铁矿作为典型深部金属矿床,其开采实践面临深部高应力场与复杂地质构造协同作用的重大挑战。矿区位于辽宁省本溪市南芬区,赋存于太古界鞍山群茨沟组第三含铁岩段,盖层厚度 404～1 445 m,矿体埋深 404～1 934 m,赋矿标高－134～－1 713 m,属隐伏盲矿体。矿区构造以不对称向斜为主体,轴向 110°,轴面倾角 70°,核部及两翼由赤铁石英岩、磁铁石英岩及混合岩化围岩构成,北翼矿体厚大连续(最大厚度 753.82 m),南翼矿体分支复合显著,夹石比例高达 22.14%。断裂系统以北东向 F25、F26、F27 断层为主,虽未破坏矿体连续性,但加剧了围岩结构面发育,形成多组弱面交切的地质特征,为深部开采地压控制埋下隐患。

矿山设计采用“分步扩能”策略,总规模 1 500×10^4 t/a,分－1 020 m 下采区(750×10^4 t/a)与－840 m 上采区(750×10^4 t/a)两期实施,当前已完成主副井、回风井及－960～－1 060 m 水平关键巷道的掘砌贯通,形成主副井开拓系统与对角式通风网络。针对深部高应力环境,采矿方法以大直径深孔空场嗣后充填采矿法(占比 95%)为核心,辅以分段空场嗣后充填采矿法处理上盘缓倾矿体边缘。矿体划分 200 m 宽盘区单元,盘区间留设 60 m 宽条形矿柱,采用“中间向两翼”的回采时序:一步采场优先回采并实施灰砂比 1∶8～1∶12 的全尾砂胶结充填,待充填体强度达标后间隔回采二步采场,最终集中回采矿柱。思山岭铁矿面临着矿体分布集中、年生产能力大,以及 40～60 MPa 高地应力、薄层陡倾岩体等问题,该矿矿体层状结构极度发育,高应力会引起岩体板裂、片帮、冒顶,地质环境复杂多变和岩体灾害频发。在此背景下,优化采场设计方案和进行采场稳定性分析等均对矿山安全生产起着重要作用。因此,为更好地服务矿山开发与生产,亟需进行薄层陡倾状矿岩体大结构采场优化设计研究,从地质力学角度为矿山数字化和采矿设计合理化提供技术支撑。

2 多方法协同采场稳定性分析与优化

针对思山岭铁矿深部采场“双超”开采的围岩稳定性挑战,融合 Mathews 稳定性图解法、工程类比法与离散元数值模拟,建立多方法协同优化框架。首先,基于 Mathews 稳定性图解法,通过修正岩体质量、应力及节理参数,计算稳定性指数与水力半径,界定采场顶板与矿柱的最大安全暴露面积;其次,利用工程类比法初选矿房长宽高参数及间柱布局;最后,通过离散元法构建三维动态模型,模拟不同参数组合下的应力-位移场演化规律,定量分析几何参数对围岩变形及能量积聚的影响,筛选最优结构方案。研究旨在突破深部高地应力与复杂地质构造对采场稳定的制约,通过多方法交叉验证,提出兼顾安全与经济的矿房参数优化策略,为深部资源高效回采提供技术支撑。

2.1 Mathews 稳定性图解法

Mathews 稳定性图解法是深埋硬岩矿山采场设计的核心方法,在 Q 系统分级的基础上,利用稳定性指数 N 和形状因子(水力半径)S,进而确定采场暴露面积[20](见图 1),为层状矿体暴露面积控制提供了理论依据。

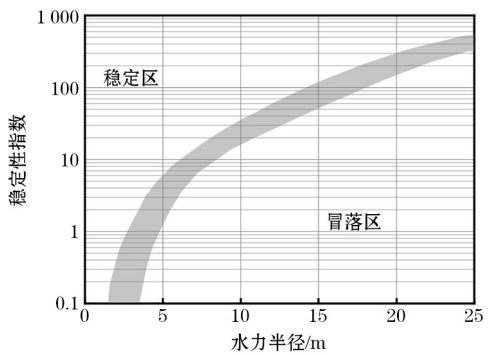


图 1 Mathews 稳定性图[10]

Fig.1 Mathews stability diagram[10]

岩体稳定性指数 N 的计算方法如式(1)所示:

$$N=Q'ABC \tag{1}$$

式中:Q'为修正后的 Q 系统分级值;A 为岩石强度因子;B 为节理方向调整因子;C 为重力调整因子。

(1) Q'修正值的确定。

根据 Barton 等提出的 Q 系统分类法,可以得到 Q:

$$Q=RQD\cdot J_r\cdot J_w/(J_n\cdot J_a\cdot SRF) \tag{2}$$

式中:RQD 为岩体质量指标;J_r为节理粗糙度;J_w为节理裂隙水折减系数;J_n为节理组数;J_a为节理蚀变系数;SRF 为应力折减系数。

假设节理水和应力折减系数均为 1,因此 $J_w/SRF=1$ 时,计算出的 Q 值即为 Q'值。

$$RQD=\frac{l_t}{l}\times 100\% \tag{3}$$

式中:l 为钻孔长度;l_t 为 10 cm 以上岩芯累计长度。

岩体质量指标分类标准见表 1。

表 1 岩体质量指标分类标准

Table 1 Classification standard for rock mass quality indications

很差	差	一般	好	很好
<25	25~50	50~75	75~90	>90

根据思山岭铁矿地质钻孔取样可知,-1 020 m 水平磁铁矿岩石质量为好,$RQD=80$;根据思山岭铁矿现场工程地质情况,磁铁矿石为平行层理构造,节理发育遍布,因此节理组数 J_n取 15;该矿磁铁矿石为平行层理构造,节理为平行层理,符合粗糙或不规则的平面状节理,因此节理粗糙度 J_r取 1.5;该矿节理紧密接触、无充填物、不透水,因此节理蚀变系数 J_a取 0.75。

采场处于低地应力时,SRF 取 2.5;中等地应力时,SRF 取 1;高地应力时,SRF 取 0.5~2.0。因此,其他参数保持不变的前提下,随着应力的增高,SRF 逐渐减小。思山岭铁矿-1 020 m 水平最大主应力量级为 30~40 MPa,该中段属于高应力至极高应力。因此,SRF 取 0.5。

根据思山岭铁矿现场水文地质情况,-1 020 m 中段节理发育遍布,存在中等流量或中等地下水压力,偶然发生节理充填物被冲刷现象,因此节理裂隙水折减系数 J_w 取 0.66。

将以上参数代入式(2),可得出本次研究 Q 值为 14.08。因此该矿-1 020 m 中段某采场的 Q'值为 14.08。

(2) 参数 A、B、C 的选定。

①A 为岩石强度因子,根据采空区临空面边界上岩石单轴抗压强度 σ_c与诱生的压应力 σ_1 之比取值,范围如式(4)所示:

$$A=\begin{cases}0 & (\sigma_c/\sigma_1)<2\\ 0.1(\sigma_c/\sigma_1) & 2\leqslant(\sigma_c/\sigma_1)<10\\ 1 & (\sigma_c/\sigma_1)\geqslant 10\end{cases} \tag{4}$$

根据现场开采技术条件,-1 020 m 处于深埋高应力状态,采场顶部的诱生压应力较大,而思山岭铁矿岩石抗压强度可以达到 150 MPa,σ_c/σ_1 的数值为 3.75,故本研究中 A 取 0.375。

②B 为节理方向调整因子,根据主节理组倾角与暴露面倾角之间的夹角 α 进行取值,见表 2。

表 2 节理方向调整因子 *B* 值取值

Table 2 Values of joint direction adjustment factor *B*

α/(°)	B 值
90	1.0
60	0.8
45	0.4
20	0.3
0	0.5

根据现场结构面调查,岩体结构面倾角主要集中在 40°～90°之间,因此,本次研究 B 取 0.8。

③C 为重力调整因子,本研究中 C 取 1。

形状因子 S 值(水力半径)计算方法如下:

$$S=\frac{LL_1}{2(L+L_1)} \tag{5}$$

式中:L 为采场长度;L_1 为采场宽度。

根据上述参数计算岩体稳定性指数 N 值及形状因子 S,并估算采场顶板暴露面积,见表 3。

表 3 Mathews 稳定性图解法估算采场暴露面积

Table 3 Exposed area of stope roof estimated by Mathews stability graphical method

采场尺寸(长×宽)/m	N	Q'	A	B	C	S	顶板暴露面积/m²
40×40	11.27	14.08	0.375	0.8	1	10.00	1 600
40×20	11.27	14.08	0.375	0.8	1	6.67	800
80×20	11.27	14.08	0.375	0.8	1	8.00	1 600

通过计算采场的稳定性指数 N 和采场尺寸形状因子,根据 Mathews 稳定性图解法,判断不同规格尺寸的采场处于稳定区、相对稳定区、不稳定区。当采场长宽为 40 m×40 m 时,稳定性指数大于 40 才能达到稳定区,稳定性指数大于 20 才能达到相对稳定,故该尺寸方案不安全;当采场长宽为 40 m×20 m 时,稳定性指数大于 20 才能达到稳定区,稳定性指数大于 9 才能达到相对稳定区,故该尺寸方案较安全;当采场长宽为 80 m×20 m 时,稳定性指数大于 15 才能达到稳定区,稳定性指数大于 5 才能达到相对稳定区,故该尺寸方案较安全。该矿岩体稳定性指数 N 值为 11.27,采场设计时需要满足形状因子 S 值小于 8 的要求。

2.2 工程类比法确定矿房合理暴露面积

目前,阶段空场嗣后充填采矿法以其高回采强度和显著提升的劳动生产率而著称。该采矿法在国内外典型应用矿山包括红透山铜矿、冬瓜山铜矿、安庆铜矿、李楼铁矿、加拿大百周年钼矿等。国内外相似矿山开采现状见表 4。根据国内外矿山采用高阶段嗣后充填采矿方法的开采情况,采场顶板暴露面积超过 1 500 m² 的矿山较为罕见,暴露面积通常控制在 1 500 m² 以内,少数矿山达到 1 800 m²。通常情况下,当顶板暴露面积超过 1 500 m² 时,采场岩体的稳定性相对较差。

表 4 国内外相似矿山开采现状[21]

Table 4 Mining status of similar mines at home and abroad[21]

矿山名称	采矿方法	采场尺寸(长×宽×高)/m	暴露面积/m²
红透山铜矿	阶段空场嗣后充填采矿法	80×12×60	960(顶板) 4 800(侧帮)
李楼铁矿	高阶段空场嗣后充填采矿法	50×20×100	1 000(顶板) 5 000(侧帮)
安庆铜矿	大孔侧向崩矿采矿法	70×15×115	1 050(顶板) 8 050(侧帮)
马城铁矿	阶段空场嗣后充填采矿法	18×45×60	810(顶板) 2 700(侧帮)
新城金矿	阶段空场嗣后充填采矿法	15×40×50	600(顶板) 750(侧帮)
张庄铁矿	大直径深孔阶段空场嗣后充填采矿法	15～18×100×60	1 800(顶板) 6 000(侧帮)
阿舍勒铜矿	大直径深孔采矿法	12×50×50	600(顶板) 2 500(侧帮)
斯特拉斯康纳矿(加拿大)	VCR 法	61×12×45	732(顶板) 2 745(侧帮)

分析国内外采用同类型采矿方法的矿山,发现采场形状多为长条形,长边长度为 40～80 m,短边长度为 10～20 m,高度为 40～120 m。思山岭铁矿采场矿岩体强度较高,但由于节理裂隙发育,岩体稳

定性受到影响，巷道边墙岩体呈片状剥落。考虑高地应力和层理的影响，采场高度不宜过高，否则边墙和顶板岩体可能沿着层理面发生剪切滑移。

通过分析相似矿山顶板和边墙的暴露面积，建议将思山岭铁矿的顶板暴露面积控制在 1 600 m^2 以内。综上所述，对矿房结构参数进行优化时，既要保证顶板形状因子小于等于临界 S 值，又要保证顶板暴露面积在上述范围内。思山岭铁矿矿房结构参数取值见表 5。

表 5　思山岭铁矿矿房结构参数取值

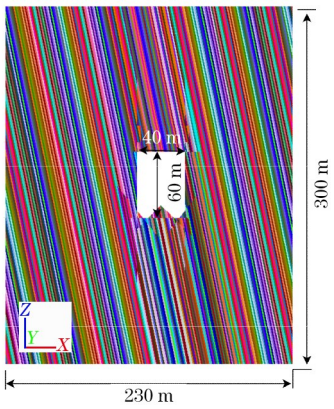
Table 5　Values of structural parameters of mining room in Sishanling Iron Mine

序号	长度/m	宽度/m	顶板暴露面积/m^2	顶板形状因子 S
1	30	20	600	6.00
2	40	20	800	6.67
3	50	20	1 000	7.14
4	60	20	1 200	7.50
5	70	20	1 400	7.77
6	80	20	1 600	8.00
7	30	15	450	5.00
8	40	15	600	5.45
9	50	15	750	5.76
10	60	15	900	6.00
11	70	15	1 050	6.17
12	80	15	1 200	6.31
13	30	10	300	3.75
14	40	10	400	4.00
15	50	10	500	4.16
16	60	10	600	4.28
17	70	10	700	4.37
18	80	10	800	4.44

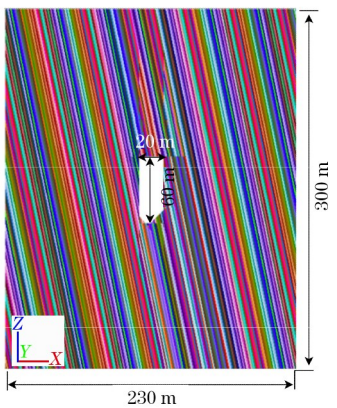
2.3　三维离散元数值模拟

(1) 模型构建。

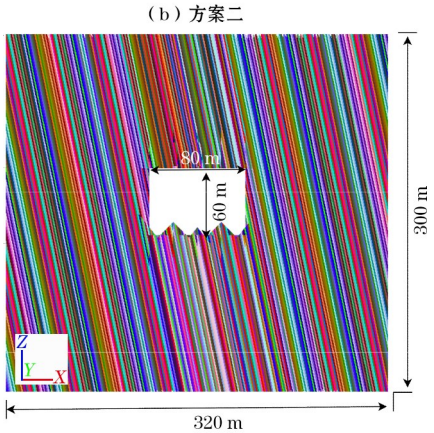
以思山岭铁矿－1 020 m 中段为工程依托，8#、12#采场巷道矿体平行层理倾角 78°～82°、倾向 NW48.73°、厚度 5～12 m。采场的回采方法为大直径深孔阶段空场嗣后充填采矿法，结合思山岭铁矿当前 60 m 的中段高度，根据上述矿房结构参数研究成果，对－1 020 m 中段矿体的矿房进行规划设计，初步拟设 3 种采场开挖方案，即长×宽×高分别为 40 m×40 m×60 m(方案一)、40 m×20 m×60 m(方案二)、80 m×20 m×60 m(方案三)。地应力按现场大小施加，从应力、位移、接触张拉破裂数、塑性区体积、采场周边位移测线等多指标进行对比分析，分析不同尺寸的矿块开挖后围岩的稳定性，根据分析结果，选择最佳的采场规格，确保采场的稳定性和安全性。建立的 3DEC 模型如图 2 所示。



(a) 方案一



(b) 方案二



(c) 方案三

图 2　3DEC 计算模型

Fig.2　3DEC numerical models

(2) 本构模型。

块体本构模型选择应变软化塑性模型，应变软化塑性模型需要的参数有密度、体积模量、剪切模量、摩擦角、黏聚力、剪胀角和抗拉强度、残余摩擦角和残余黏聚力等参数。节理模型选择节理面接触的库伦滑移模型，此节理模型需要的参数有法向刚度、切向刚度、节理摩擦角、节理黏聚力、节理剪胀角和抗拉强度等参数。

(3) 原岩应力。

根据《辽宁本溪思山岭铁矿水压致裂地应力测

量分析报告》,分析 GK-8 钻孔总结出其地应力分布规律,即:

$$\begin{cases}\sigma_H=0.335+0.037D\\ \sigma_h=0.233+0.027D\\ \sigma_V=\rho gD\end{cases}\tag{6}$$

式中:σ_H为最大水平主应力;σ_h为最小水平主应力;σ_V为垂直应力,MPa;ρ 为岩体密度,kg/m^3;g 为重力加速度,m/s^2;D 为钻孔深度(向下为正),m。

(4) 参数选取。

离散元数值模拟的块体参数和接触参数见表 6。

表 6 数值模拟参数

Table 6 Numerical simulation parameters

块体参数			接触参数				
杨氏模量 E/GPa	泊松比 υ	密度 ρ/(kg/m^3)	法向刚度 k_n/(GN/m)	切向刚度 k_s/(GN/m)	摩擦角 φ/(°)	黏聚力 C/MPa	抗拉强度 T/MPa
50	0.17	3 500	105	52.5	45	30	0.5

(5) 约束条件及监测点布置。

考虑层理和高地应力对采场开挖稳定性的影响,数值模拟中初始平衡阶段采用位移边界条件,模型的四周边界在水平方向上施加约束,而顶部和底部则在竖直方向上施加边界约束。模型地应力平衡后,开挖几何形状的采场。开挖过程中对采场边墙、顶底板不同位置处的 X、Y、Z 方向位移及应力进行监测,监测点布置如图 3 所示。

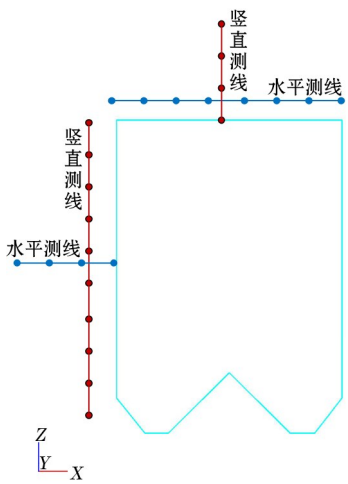


图 3 监测点布置

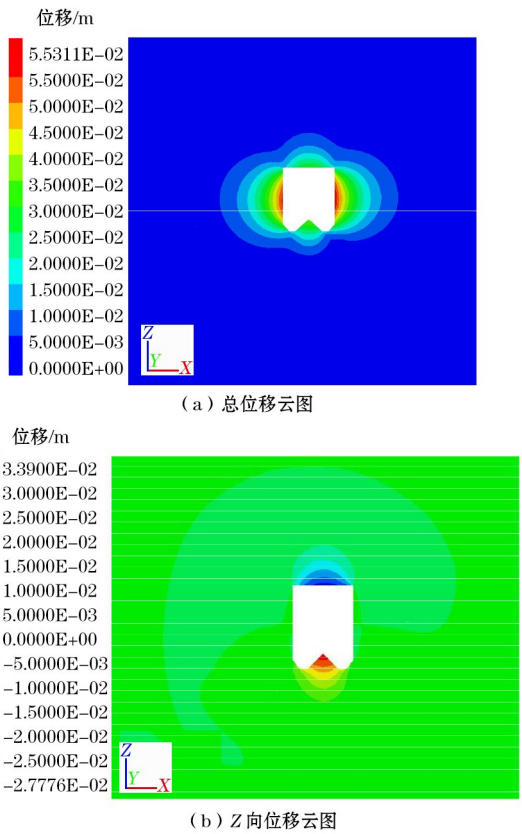
Fig.3 Layout of monitoring points

3 数值模拟结果分析

3.1 方案一采场稳定性分析

矿房采场开挖后,会形成采空区,原岩应力场发生改变,围岩应力重新分布,采空区周边围岩产生一定变形,顶板发生沉降,底板发生底鼓,边墙可能发生崩塌、岩层溃屈、剥落、滑移等岩体失稳灾害,靠近采空区周边的岩体容易产生移动变形,可能会诱发岩体向开挖空间挤压甚至破裂,因此,回采后的采场变形量是稳定性分析的重要指标。在采场边墙和顶板水平方向和竖直方向布置测线,监测位移变形量,开展位移云图及监测点数据分析;通过位移云图可明确矿房开挖后位移变化范围及变化量,以及开挖过程中矿块周边位移动态变化规律,分别如图 4 和图 5 所示。

从图 4 和图 5 可以看出,矿块回采后,采场在东西侧边墙产生较大变形,最大位移量为 5.53 cm,变形具有一定的对称性,顶板沉降量为 2.78 cm,符合容许位移量,岩体可以保持稳定。岩层受到挤压时,边墙容易发生溃屈、剪切滑移。



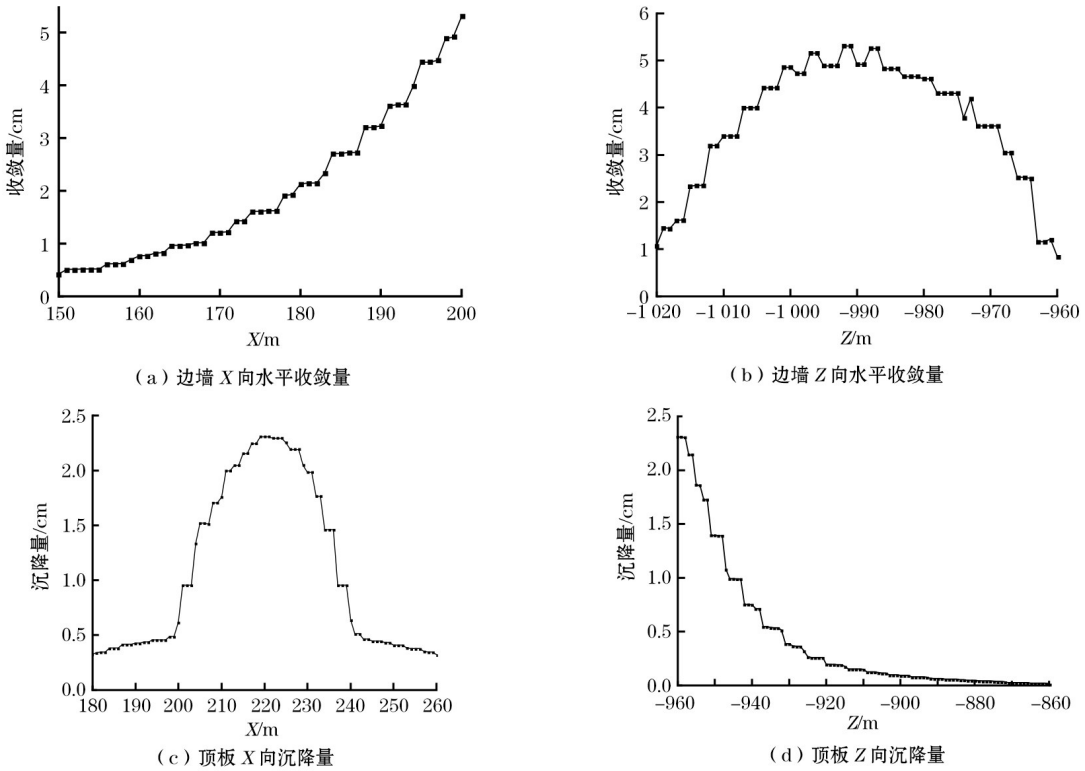
(a) 总位移云图

(b) Z 向位移云图

图 4 方案一不同方向剖面位移云图

Fig.4 Displacement nephograms of section in different directions for scheme 1

由于在采场底部掘进巷道,高应力得以释放,底部结构桃形矿柱和凿岩巷道变形量较小。当岩层倾角竖直时,两侧壁围岩发生弯曲变形,向内弯折破坏,严重时会产生溃屈破坏、剪切滑移。



(a) 边墙 X 向水平收敛量　(b) 边墙 Z 向水平收敛量

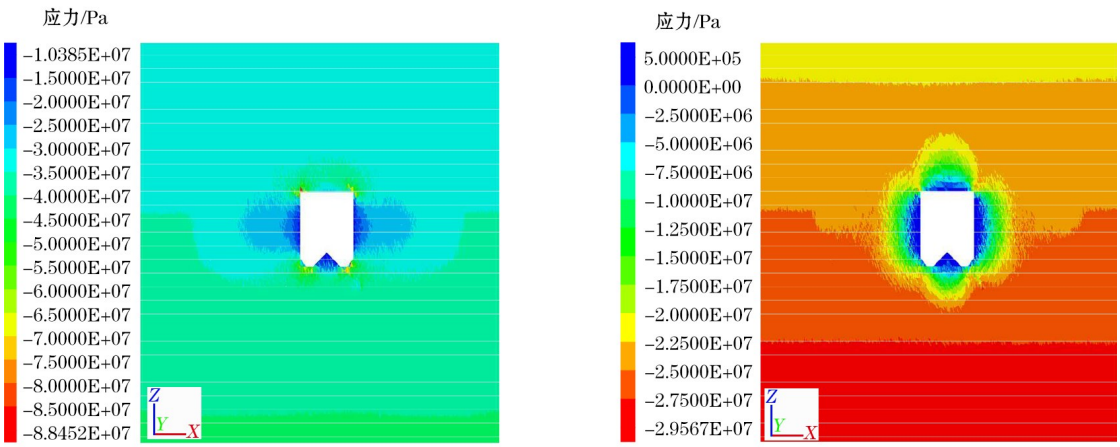
(c) 顶板 X 向沉降量　(d) 顶板 Z 向沉降量

图 5　方案一顶板和边墙的位移变化曲线

Fig.5　Displacement curves of the roof and side wall for scheme 1

通过图 6 应力云图和图 7 测线应力监测发现,当采场开挖时,周围区域的应力在开挖瞬间得到释放,矿房顶部的最大主应力、最小主应力瞬间减少,并出现大幅度波动,此时区域地压处于不平衡状态,随着计算进行,区域地压逐渐平衡,最大主应力逐渐增大。这表明随着采场的开挖,区域应力场出现波动,开挖处应力一部分随着开挖的进行得以释放,另一部分则转移到了周围岩体中。

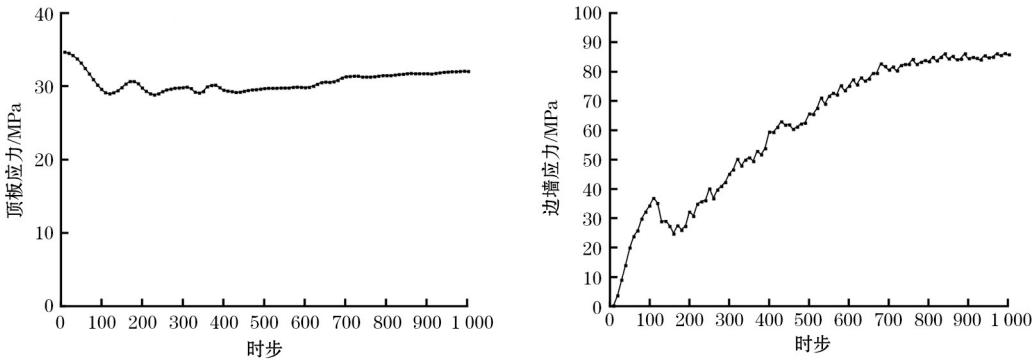
采空区周围均出现了应力集中现象,其中采场顶板底部出现拉应力,矿房两帮区域表现为应力释放,采场四周墙角和底板出现压应力集中,应力达到 60 MPa。



(a) 最大主应力　(b) 最小主应力

图 6　方案一应力云图

Fig.6　Stress nephograms for scheme 1



(a) 顶板应力 (b) 边墙应力

图 7 方案一顶板和边墙的应力变化曲线

Fig.7 Stress curves of the roof and side wall for scheme 1

采场开挖时,周边应力释放,边墙存在拉应力区,采场墙角处出现局部应力集中,回采巷道底板出现应力集中,桃形矿柱处应力释放矿房出现了拉应力集中。拉应力主要集中在采空区周边,开挖完毕后均出现了拉应力,但是没有达到矿体的极限抗拉强度,所以采场处于安全范围。矿房开挖过程中,压应力向矩形采场的墙角处集中,围岩最小主应力卸压区位于采场两侧。根据图 8 分析,在采场顶板和底板应力集中显著,采场顶板最易发生岩体破裂,从而引起顶板离层、冒落等岩体灾害。

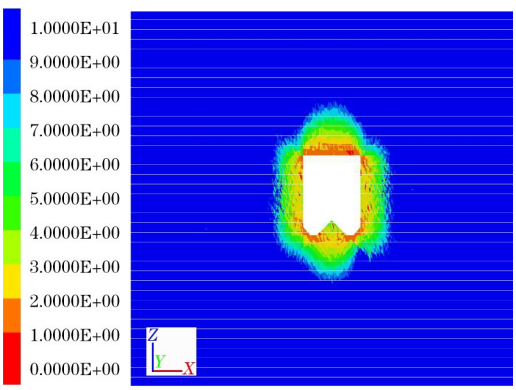
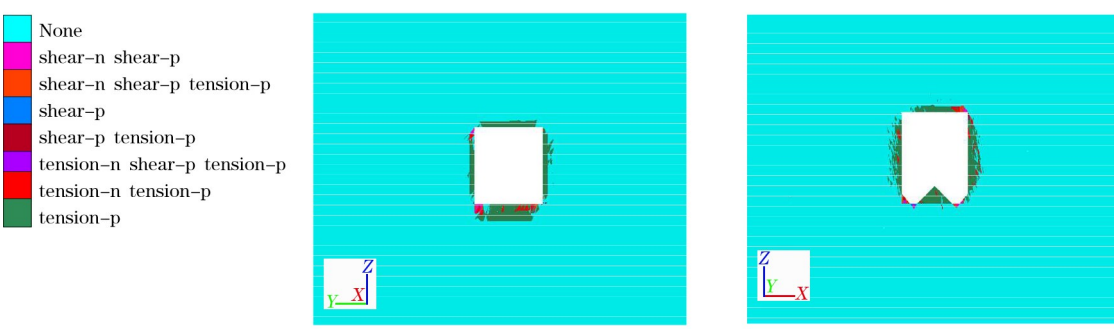


图 8 *X* -*Z* 方向剖面应力强度比云图

Fig.8 Nephogram of stress intensity ratio for *X* -*Z* section

采场开挖后,周围矿岩体应力逐渐平衡,局部发生应力集中,容易引发岩体灾害,岩体承受的较大压力超过其抗拉、抗压、抗剪强度,发生拉剪破坏,岩体由弹性向塑性状态转变。因此,需对其开挖后的塑性区分布进行分析,了解采空区围岩体破坏形式,判断采场稳定性。方案一塑性区分布如图 9 所示。

单采场开采时围岩塑性区体积较小,由图 9 可知,矿房开挖后顶底板及侧帮均出现了不同形式的塑性区,其中顶底板出现了张拉破坏塑性区。底部结构区域出现了少量剪切破坏塑性区,由于采场开挖后采空区周边塑性区范围较小,不易发生大规模坍塌,边墙拉剪状态混合存在,发生局部岩块剥落、离层现象,因此采空区处于稳定状态。采空区塑性区深度较小,影响深度大约为 4 m,岩体以张拉破坏屈服状态为主,少量剪切破坏屈服状态。顶板受到上部岩体的荷载时会发生弯曲,弯曲会导致顶板中间部位产生拉应力,弯曲的上部受到压应力,而下部则受到拉应力。同时,由于层状岩体倾角为 80°,易发生层理剪切滑移破坏。



(a) *Y*-*Z* 剖面 (b) *X*-*Z* 剖面

图 9 方案一塑性区分布

Fig.9 Plastic zone distribution for scheme 1

3.2 方案二采场稳定性分析

当采场规格为 40 m×20 m×60 m 时,采场开挖后,由于层理的存在,采场东西两侧边墙变形为非对称,且西侧边墙变形量比东侧边墙要大,采空区周边最大变形发生在西侧边墙,两侧边墙变形量达到 5.76 cm。通过图 10 位移云图分析可知,顶板沉降量为 1.83 cm,底部出矿堑沟两帮变形为 1.56 cm。矿块回采后,两侧边墙由于采场开挖后泄压释放应力,应力重分布,采场顶部和底部存在应力集中的现象,局部应力达到 50 MPa,同时采空区边缘处产生拉应力,不利于顶板的稳定性。

在采场左侧和顶板布设测线监测,结果如图 11 所示。通过测线监测结果可知,随着围岩与左侧边墙距离的增加,矿岩体水平位移收敛值越来越小。通过分析左侧边墙 Z 向测线可以发现,边墙竖直方向上中部位置水平收敛量最大,两侧变形量小,中间部位变形量达到 6 cm,边墙上下部的变形量呈现对称分布的特征,距离边墙中央部位 30 m 处,变形量不足 1.5 cm,随距离的变化呈现“∩”形状。通过分析顶板 X 向测线可知,顶板中间部位下沉量最大,达到 1.3 cm,两侧下沉量较小,不足 0.3 cm,测线上的变形量呈现先增加后减小的趋势。通过分析顶板 Z 向测线可知,随着距离采空区顶板的距离增加,顶板沉降量越来越小,直至为零,顶板最大沉降量为 1.42 cm,采空区周边从塑性状态向远处原岩弹性区转变。

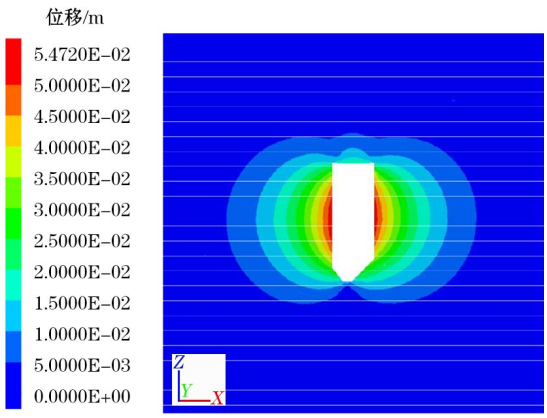


图 10 方案二位移云图

Fig.10 Displacement nephogram for scheme 2

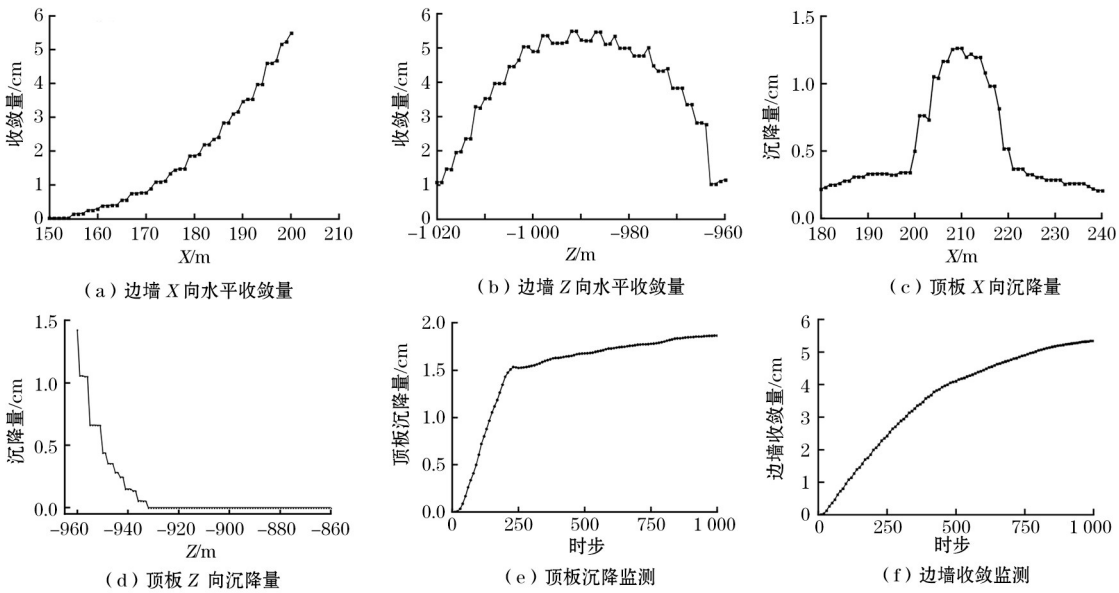


图 11 方案二顶板和边墙的位移变化曲线

Fig.11 Displacement curves of the roof and side wall for scheme 2

方案二采场采空区周围岩体塑性区分布如图 12 所示,采场两侧边墙主要发生张拉破坏,顶板发生张拉和剪切的混合破坏,以张拉破坏为主,由于顶板抗拉能力较差,在一定的拉应力作用下,会发生拉伸破坏,底部凿岩巷道岩体存在一定的剪切塑性区。随着采场开挖后计算时步数增加,采空区周边矿岩体的塑性区体积呈现先迅速增加后保持动态平衡的趋势,塑性区体积达到 14 000 m^3。在截面上围岩松弛区形状呈现椭圆形,塑性区影响深度为 8.8 m。可见底部桃形矿柱整体上处在屈服状态,基本上没有大的应力集中现象,桃形矿柱内部应力已经释放,且大部分已经屈服,不会产生严重的应力型破坏现象。相对较大的变形出现在矿柱的浅表层部位,底柱偶尔会有较大的应力集中现象,但对桃型矿柱稳定性影响不大。

方案二采场接触面的张拉破裂数随计算时步的增

加而不断增加,总数达到 1 200 个(见图 13),子接触以剪切破坏为主,表明剪切破坏是岩体失稳的主要原因。

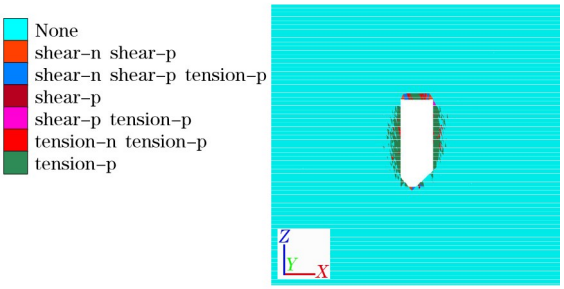


图 12 方案二塑性区分布

Fig.12 Plastic zone distribution for scheme 2

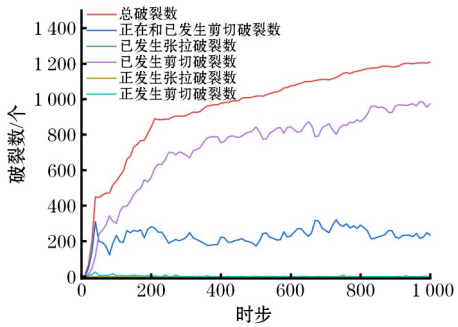
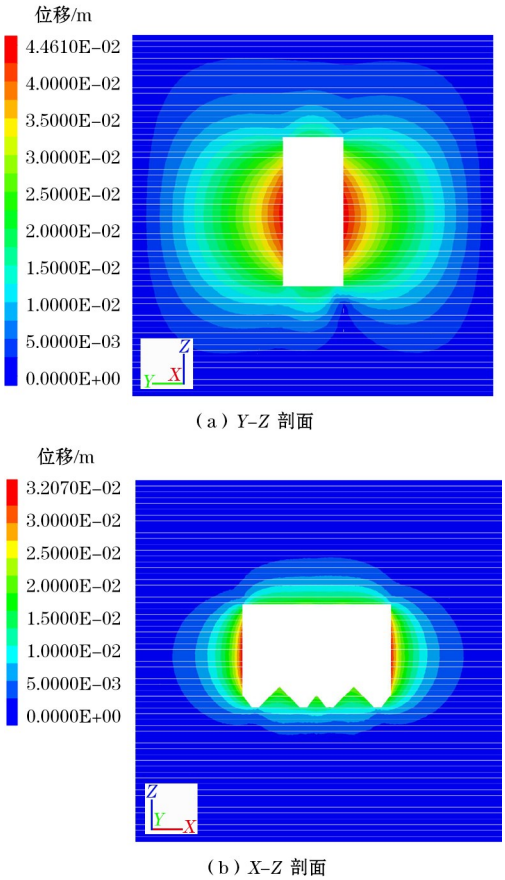


图 13 方案二采场接触面的张拉破裂数

Fig.13 Number of tensile fractures at the stope contact surface for scheme 2

3.3 方案三采场稳定性分析

采场不同剖面的位移云图(见图 14)显示了采场东西两侧边墙相较于南北两侧变形小,东西侧边墙位移最大值为 3.2 cm,南北侧边墙位移最大值为 4.46 cm,由于采场长边沿矿体走向方向,南北边墙临空面暴露面积较大,在无支护的情况下,在高地应力的作用下,岩体开挖卸荷发生松弛。顶板最大下沉量 1.83 cm,桃形矿柱鼓起 2 cm,出矿堑沟巷道底鼓 1.93 cm。



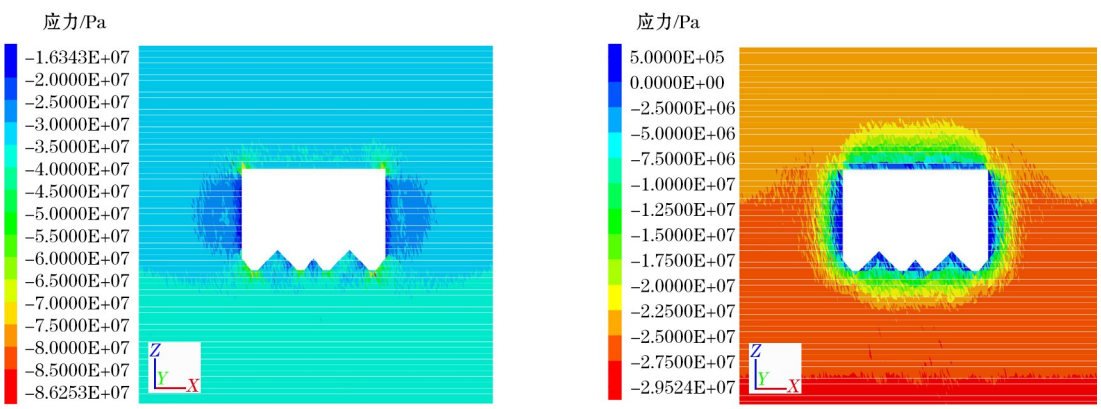
(a) *Y*-*Z* 剖面

(b) *X*-*Z* 剖面

图 14 方案三不同方向剖面位移云图

Fig.14 Displacement nephograms of section in different directions for scheme 3

方案三应力云图如图 15 所示。图 15(a)显示在顶板墙角处和底部出矿堑沟存在应力集中区,应力水平达到 60 MPa,局部应力可以达到 80 MPa。由于开挖卸荷,采场边墙应力释放,边墙应力水平为 16～20 MPa。最小主应力云图(见图 15(b))显示,采空区四周存在拉应力区,拉应力为 0.5 MPa。



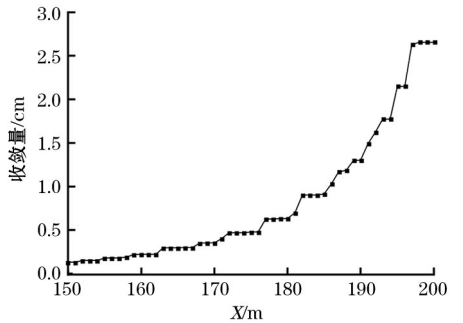
(a) 最大主应力

(b) 最小主应力

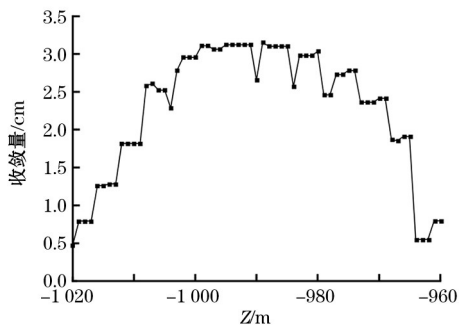
图 15 方案三应力云图

Fig.15 Stress nephograms for scheme 3

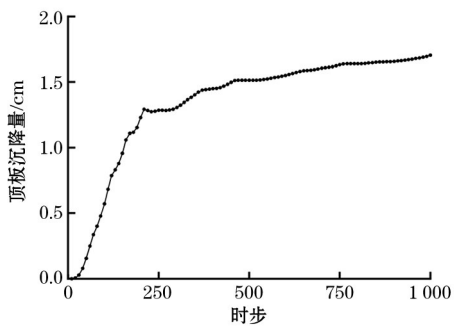
方案三顶板和边墙的位移变化曲线如图 16 所示。随着距采场边墙距离的增加，矿岩体收敛量越来越小，距离采场边墙 150 m 处收敛量为 0.15 cm。边墙上部和下部位移基本上对称，在边墙中部－990 m 处收敛量最大。顶板监测点最大沉降量为 1.78 cm，边墙监测点最大收敛量为 2.7 cm。



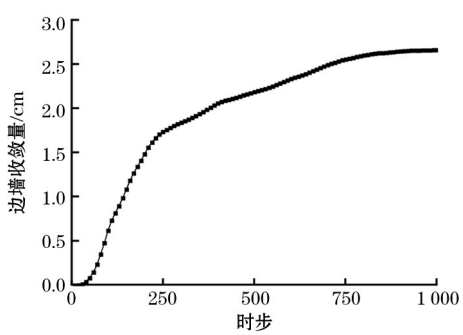
（a）边墙 X 向水平收敛量



（b）边墙 Z 向水平收敛量



（c）顶板沉降监测



（d）边墙收敛监测

图 16　方案三顶板和边墙的位移变化曲线

Fig.16　Displacement curves of the roof and side wall for scheme 3

塑性区的屈服状态以拉伸屈服破坏为主，剪切屈服破坏为辅。从图 17 塑性区云图观察，采场顶板、边墙、桃形矿柱基本上发生拉伸屈服，出矿堑沟底板发生剪切屈服。方案三采场接触面的张拉破裂总数达到 2 157 个（见图 18），破裂类型主要为剪切破坏，其次为拉伸破坏。

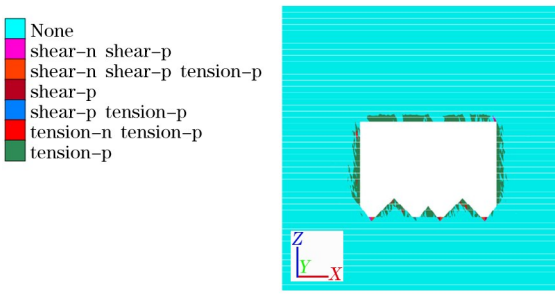


图 17　方案三塑性区分布

Fig.17　Plastic zone distribution for scheme 3

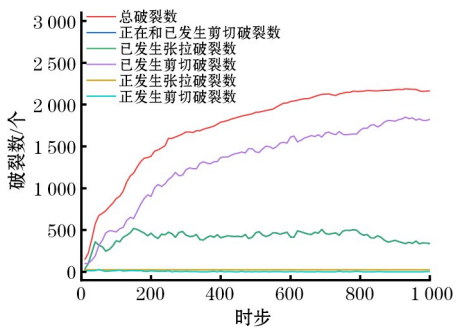


图 18　方案三采场接触面的张拉破裂数

Fig.18　Number of tensile fractures at the stope contact surface for scheme 3

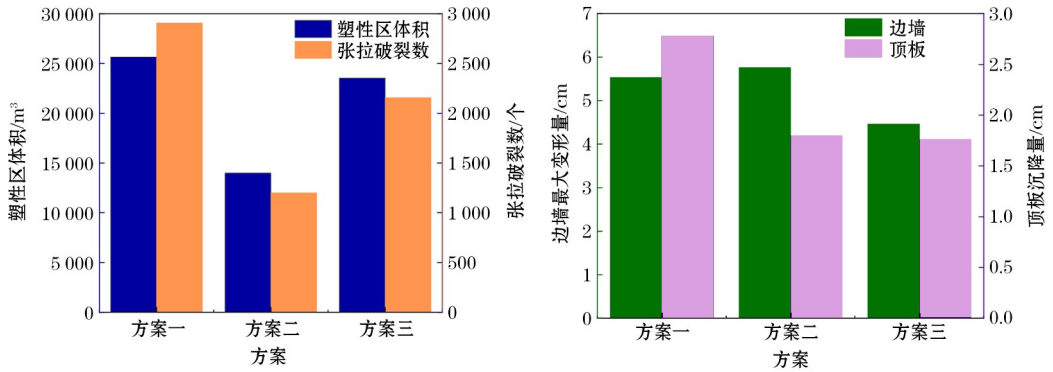
3.4　对比分析

3 种不同尺寸规格的采场开挖后，对比分析各方案的塑性区体积、子接触张拉破裂数、边墙变形量、顶板沉降量等指标，结果见图 19 和表 7。从塑性区体积来看，方案二的塑性区体积最小，方案三次之，方案一最大；从张拉破裂数来看，方案一张拉破裂数最大，方案三次之，方案二最小；从边墙最大变形量来看，方案三边墙最大变形量最小，方案二最大，方案一次之；从顶板沉降量来看，方案一顶板下沉最大，方案二与方案三顶板沉降量基本相当。以采场周边围岩内的岩体屈服体积为例，方案二的采场优于方案一的采场。

合理的结构参数对矿柱开挖的安全影响较大，分析不同采场尺寸参数下的围岩应力场分布特征可知，随着采场跨度的增加，围岩塑性区范围增大，围岩位移值显著增加，采场跨度对采场稳定性的影响

程度最大。对比数值计算结果可知,方案二的塑性区体积最小,围岩塑性区未发生贯通,因此,方案二的稳定性最好。

但值得注意的是,方案二单采场的回采矿石量为方案一和方案三的二分之一,即该方案虽然会有较高的稳定性,但是生产能力降低,若使矿山满足1 500 万 t 年产量,需在中段内回采更多矿块。综合考虑经济效益及边墙、顶板变形量,建议思山岭铁矿深部高应力层状矿体采用方案三进行开采,即最优采场结构参数为 80 m(长)×20 m(宽)×60 m(高)。



(a) 塑性区体积、张拉破裂数 (b) 顶板、边墙变形量

图 19 不同方案变形对比

Fig.19 Deformation comparison of different schemes

表 7 三个方案采场变形结果对比

Table 7 Comparison of stope deformation results among the three schemes

方案	塑性区体积/m³	边墙最大变形量/cm	张拉破裂数/个	顶板沉降量/cm
方案一	25 639	5.53	2 909	2.78
方案二	14 000	5.76	1 200	1.80
方案三	23 543	4.46	2 157	1.76

3.5 讨论

本研究的优势在于构建了理论分析、工程类比与三维离散元模拟相结合的多方法协同优化体系,但仍存在数值模拟假设简化、缺乏长期现场验证等局限性。相较于以往依赖单一经验方法或静态数值分析的研究,建立了更具系统性与适应性的参数优化框架,提升了设计的工程可行性与适用性。虽然方案三采场尺寸在安全性与经济性间实现了较好平衡,但较大的顶板跨度和局部应力集中特征要求实际应用中需加强预支护与动态管理。未来工作应重点开展采场围岩实时监测、智能模型动态更新、应力-结构耦合演化规律研究,并在试验区进行分阶段工程验证,以持续优化采场设计,支撑深部矿山安全高效与智能化发展。

4 结论

(1) 通过构建“理论-经验-数值”协同优化框架,集成 Mathews 稳定性图解法、国内外相似矿山工程类比数据及三维离散元动态模拟,实现采场参数的优化设计。

(2) 确定了思山岭铁矿深部采场最优结构参数为 80 m(长)×20 m(宽)×60 m(高)。离散元模拟表明,该方案下顶板沉降量(1.76 cm)与边墙最大变形量(4.46 cm)均低于容许阈值,塑性区体积(23 543 m³)及张拉破裂数(2 157 个)显著优于其他方案,验证了参数设计的合理性。

(3) 揭示了深部采场开挖后应力重分布特征:顶板以张拉破坏为主,边墙呈现拉剪混合破坏模式,应力集中区分布于采场墙角与底板。

参考文献(References):

[1] 郭奇峰,蔡美峰,吴星辉,等.面向 2035 年的金属矿深部多场智能开采发展战略[J].工程科学学报,2022,44(4):476-486.
GUO Qifeng, CAI Meifeng, WU Xinghui, et al. Technological strategies for intelligent mining subject to multifield couplings in deep metal mines toward 2035[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(4):476-486.

[2] 袁亮.深部采动响应与灾害防控研究进展[J].煤炭学报,2021,46(3):716-725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J].Journal of China Coal Society,2021,46(3):716-725.

[3] 崔喜旺,赵纯林,李洋洋,等.思山岭铁矿深井多中段大断面马头门快速施工技术[J].采矿技术,2017,17(3):33-35.
CUI Xiwang, ZHAO Chunlin, LI Yangyang, et al. Rapid construction technology of multi-section large section ingate in deep well of Sishanling Iron Mine[J]. Mining Technology,2017,17(3):33-35.

[4] 王其虎,刘一航.沟谷地形下非均匀条带开采采场结构参数优化[J].中国矿业,2024,33(1):130-137.

WANG Qihu, LIU Yihang. Optimization of stope structural parameters in non-uniform strip mining under valley terrain [J]. China Mining Magazine,2024,33(1):130-137.

[5] 高乐,郭晓胜,刘勋.深井高应力托顶煤巷道锚索梁支护结构优化研究[J].煤矿机械,2024,45(9):125-128.
GAO Le, GUO Xiaosheng, LIU Xun. Optimization research on anchor beam support structure for highstress supporting roof coal roadway in deep mine[J]. Coal Mine Machinery, 2024,45(9):125-128.

[6] 石劲,张欢,梅林芳,等.大冶铁矿高阶段并段开采结构参数稳定性研究[J].有色金属(矿山部分),2024,76(4):36-42+53.
SHI Jin, ZHANG Huan, MEI Linfang, et al. Stability of structural parameters of high stage combination mining in Daye Iron Mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024,76(4):36-42+53.

[7] 覃庆韩,郭泽洋,韦峰.基于 FLAC3D 模拟的破碎矿柱群安全回采顺序优化研究[J].现代矿业,2023,39(7):68-71.
QIN Qinghan, GUO Zeyang, WEI Feng. Optimization of safe mining sequence for broken pillar group based on FLAC3D simulation[J]. Modern Mining,2023,39(7):68-71.

[8] 甘德清,孟岐,刘志义,等.基于响应曲面的采场结构参数优化方法与敏感性分析[J].矿业研究与开发,2025,45(3):31-40.
GAN Deqing, MENG Qi, LIU Zhiyi, et al. Optimization method and sensitivity analysis of stope structural parameters based on response surface[J]. Mining Research and Development,2025,45(3):31-40.

[9] 梅林芳,邓朋,何志义,等.某铁矿床充填采矿方案优选及采场结构参数优化[J].矿业研究与开发,2025,45(2):25-32.
MEI Linfang, DENG Peng, HE Zhiyi, et al. Selection of filling mining scheme and optimization of stope structure parameters of an iron deposit[J]. Mining Research and Development,2025,45(2):25-32.

[10] MATHEWS K E, HOEK D C, WYLLIE, et al. Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1 000 meters in hard rock[R]. Ottawa: Canada Centre for Mining and Energy Technology,1980.

[11] 李施庆,熊庭永,曲伟勋,等.采场结构参数优化的 Mathews 稳定图法[J].现代矿业,2019,35(5):153-155+160.
LI Shiqing, XIONG Tingyong, QU Weixun, et al. Mathews stability diagram method for optimization of stope structure parameters[J]. Modern Mining,2019,35(5):153-155+160.

[12] 黄世顶,刘尧,邓红卫,等.基于修正 Mathews 稳定图法与 FLAC3D 的采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):10-18.
HUANG Shiding, LIU Yao, DENG Hongwei, et al. Optimization of stope structure parameters based on modified Mathews stability diagram method and FLAC3D [J]. Mining Research and Development,2024,44(4):10-18.

[13] 舒帆,张敏思,林才泽,等.改进的 Mathews 稳定图法在新城金矿-530 m 中段采场设计中的应用[J].中国矿业,2024,33(10):185-192.
SHU Fan, ZHANG Minsi, LIN Caize, et al. Application of improved Mathews stability diagram method in stope design of -530 m middle section of Xincheng Gold Mine[J]. China Mining Magazine,2024,33(10):185-192.

[14] 赵兴东,牛佳安.基于扩展的 Mathews 稳定图法的采场稳定性评价及参数优化[J].金属矿山,2020(2):141-147.
ZHAO Xingdong, NIU Jia'an. Stability evaluation and parameter optimization of stope based on extended Mathews stability graph method[J]. Metal Mine,2020(2):141-147.

[15] 李翠,张良兵,陈涛,等.基于 Mathews 和 FLAC3D 的采场结构参数优化研究[J].钢铁钒钛,2023,44(5):1-7.
LI Cui, ZHANG Liangbing, CHEN Tao, et al. Optimization of stope structure parameters based on mathews and FLAC3D[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023,44(5):1-7.

[16] 黄聪,魏超城,丘永富.基于修正 Mathews 稳定图法与 FLAC3D 的阿舍勒铜矿深部回采方案优化研究[J].中国矿业,2023,32(11):168-177.
HUANG Cong, WEI Chaocheng, QIU Yongfu. Optimization of deep mining scheme in Ashele Copper Mine based on modified Mathews stability graph method and FLAC3D[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(11): 168-177.

[17] 杨立新,陈俊智,任春芳,等.基于拓展的 Mathews 稳定图法和数值模拟的采空区稳定性分析[J].有色金属(矿山部分),2024,76(1):40-46.
YANG Lixin, CHEN Junzhi, REN Chunfang, et al. Stability analysis of goaf based on extended Mathews stability map method and numerical simulation [J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2024,76(1):40-46.

[18] 李世辉.锚喷支护分析预测的典型类比分析法[J].煤炭学报,1994,19(1):33-39.
LI Shihui. Typical analogic analysis engineering for prediction of rock-bolting and shotcreting support [J]. Journal of China Coal Society,1994,19(1):33-39.

[19] 龚宇.经验类比法在液压支架支护强度确定中的应用[J].煤炭技术,2014,33(6):188-190.
GONG Yu. Application of experience analogy method for determining strength of hydraulic support [J]. Coal Technology,2014,33(6):188-190.

[20] 刘学增,翟德元.矿柱可靠度设计[J].岩石力学与工程学报,2000(1):85-88.
LIU Xuezeng, ZHAI Deyuan. The reliability design of pillar [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000(1):85-88.

[21] 罗方伟.大红山铜矿深部采场结构参数优化研究[D].昆明:昆明理工大学,2022.
LUO Fangwei. Research on optimization of stope structural parameters in deep mining areas of Dahongshan Copper Mine[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2022.