深部采动作用对巷道围岩稳定性影响分析及进路参数优化*

尹安然[1],彭超[1],胡赏[1],贾瀚文[2],刘国栋[3]

(1.山东黄金集团有限公司深井开采实验室, 山东 莱州市 261442;
2.山东黄金矿业股份有限公司, 山东 济南 250100;
3.山东黄金矿业(莱州)有限公司三山岛金矿, 山东 莱州市 261400)

摘要:为解决深部进路开采扰动对巷道围岩稳定性影响的问题,以三山岛金矿为工程背景,结合FLAC3D数值模拟与现场监测数据,对比分析了不同进路参数和回采顺序下分段平巷与采场主穿巷道围岩破坏演化规律,并依据巷道位移及应力分布特征,对开采方案进行了优选。结果表明:进路开采扰动影响下,巷道顶板位移随开采进程的推进呈四阶段非线性增长,采场主穿巷道的位移普遍大于分段平巷,且不同开采方案顶板位移的最快增速阶段存在差异。采场主穿巷道及分段平巷的帮部应力集中程度均高于肩部,其中,分段平巷右侧应力增速明显大于左侧,呈现非对称特征。另外,采用上向进路开采时,采场主穿巷道应力会发生明显的阶段性突变,采用下向进路开采时,应力增长则较为平缓。进路宽度由4 m增大到5 m时,巷道应力及位移增幅较小,而进路宽度由5 m增大到6 m时,进路宽度变化对巷道稳定性影响显著。因此,综合巷道稳定性与开采效率分析,5 m下向进路开采方案更契合现场安全生产要求。现场监测结果进一步验证了参数优化的可靠性,研究结果可为深部巷道布置及稳定性控制提供参考。

关键词:深部巷道;进路开采;采动影响;巷道围岩稳定性;开采方案优化

中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)07-0001-11

Analysis on the Influence of Deep Mining Activities on Roadway Surrounding Rock Stability and the Optimization of Stoping Parameters

Yin Anran[1], *Peng Chao*[1], *Hu Shang*[1], *Jia Hanwen*[2], *Liu Guodong*[3]

(1.Deep Mining Laboratory of Shandong Gold Group Co., Ltd., Laizhou, Shandong 261442, China;
2.Shandong Gold Mining Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100, China;
3.Sanshandao Gold Mine, Shandong Gold Mining (Laizhou) Co., Ltd., Laizhou, Shandong 261400, China)

Abstract: To solve the problem of the influence of disturbance induced by deep approach mining on roadway surrounding rock stability, Sanshandao Gold Mine was taken as the engineering background. Combined with FLAC3D numerical simulation and on-site monitoring data, the failure evolution laws of surrounding rock in sublevel roadways and stope main roadways under different approach parameters and stoping sequences were compared and analyzed. According to the displacement and stress distribution characteristics of roadways, the mining schemes were optimized. The results show that under the disturbance of approach mining, the displacement of roadway roof increases nonlinearly in four stages with the advancement of mining process. The displacement of stope main roadways is generally larger than that of sublevel roadways, and the stage with the fastest growth rate of roof displacement differs among different mining schemes. Thestress concentration levelin the sidewalls of stope main roadways and sublevel roadways is higher than that in the shoulders, and the stress growth rate on the right side of sublevel roadways is significantly greater than that on the left side, exhibiting asymmetric characteristics. In addition, when upward approach mining is adopted, the stress in stope main roadways undergoes obvious staged mutations, while the stress increaseis relatively gradual under downward approach mining. When the approach width increases from 4 m to 5 m, the increments of roadway stress and displacement are relatively small. However, when the approach width increases from 5 m to 6 m, the variation of approach width exerts a remarkable influence on roadway stability. Therefore, based on a comprehensive

* **收稿日期**:2025-08-29
基金项目:山东省自然科学基金青年项目(ZR2024QE103)
作者简介:尹安然(1997—),男,山东日照人,硕士,主要从事采矿与岩石力学相关的研究工作。E-mail:yinanran@sd-gold.com
通信作者:贾瀚文(1990—),男,山东烟台人,博士,高级工程师,主要从事采矿与岩石力学方面的研究工作。E-mail:jiahanwen@sd-gold.com

analysis of roadway stability and mining efficiency, the downward approach mining scheme with a width of 5 m better meets the requirements of on-site safe production. The on-site monitoring results further verify the reliability of parameter optimization. The research results can provide references for the layout and stability control of deep roadways.

Key words: Deep roadway, Approach mining, Mining-induced influence, Roadway surrounding rock stability, Mining scheme optimization

0 引言

在金属矿山的深部开采作业中,地压问题是影响矿山安全高效生产的关键因素之一[1-4]。随着开采深度的不断增加,巷道围岩受采动应力的影响愈发显著[5],进路充填采矿法作为金属矿山深部开采的优选方案[6-7],其进路宽度和开采时序的差异均会引发采场围岩力学响应的显著变化,进而影响巷道围岩稳定性。对此,国内外学者进行了大量研究[7-12],其中,李彦龙等[13]通过数值模拟分析了不同进路开采顺序下采场应力场、位移场及塑性区分布规律,并采用组合赋权与模糊综合评价相结合的方法对进路开采顺序进行了优化。卢西洲等[14]利用理论计算得出了大体积充填体下回采进路极限宽度,同时借助数值模拟分析了不同进路参数下断面的应力、位移、平均屈服率变化特征及采场安全系数。尚雪义等[15]研究表明,承载层拉应力受进路宽度的影响较大,并提出了"小宽度、大高度"的断面优化思路。张宝等[16]采用下向大尺寸进路充填采矿法盘曲卸荷回采技术,卸荷效果明显,有效控制了回采进路的围岩收敛变形。然而,现有研究对进路开采扰动作用下巷道围岩损伤破坏演化规律的深入探究较少。当前开采方案优化研究也多聚焦于采场应力与位移分析,针对巷道长期性工程特性开展系统性的稳定性研究较少。

本文以三山岛金矿深部矿区为工程背景,通过设计不同进路宽度和开采时序的开采方案,运用FLAC3D数值模拟,深入研究了进路开采动压对巷道围岩稳定性的影响规律,系统分析了6种开采方案的巷道变形和应力的分布规律,这不仅对优化开采方案、保障矿山安全具有重要的工程实际意义,也可为类似条件下的金属矿山深部开采地压控制问题提供参考。

1 工程背景

三山岛金矿深部矿体主要赋存于主断层F1下盘的黄铁绢英岩中,矿体走向20°左右,倾向东南,倾角约为40°,厚度在3～40 m之间,形态复杂多变,存在分支复合现象,以粒状、网脉状矿化为主。矿体的上下盘近矿围岩为绢英岩,间接围岩为黑云角闪英云闪长岩或黑云斜长片麻岩、黑云变粒岩等。目前三山岛金矿已进入深部开采阶段,多采用进路式上向水平分层充填采矿法,采场阶段高度为15 m,分为4个分层进行开采,进路宽度为4 m,部分巷道出现了不同程度的挤压变形、片帮等现象。地压问题明显,不仅制约矿山的安全高效生产,也威胁作业人员的生命及财产安全。

2 开采方案设计

2.1 数值模型建立

根据目标巷道的实际地质情况,使用FLAC3D数值模拟方法,研究不同进路宽度和开采时序对目标巷顶板变形规律及两帮应力分布的影响。

模型以坐标轴Z方向为竖直方向,坐标轴Y方向沿矿体走向,坐标轴X方向垂直矿体走向,模型长700 m,宽400 m,高150 m,根据现场实测地应力,在模型表面施加垂直应力27.00 MPa,X,Y方向侧压系数分别设置为1.48和0.88,采用摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则,限制模型四周和底部位移,矿体、围岩及巷道的相对位置如图1所示。

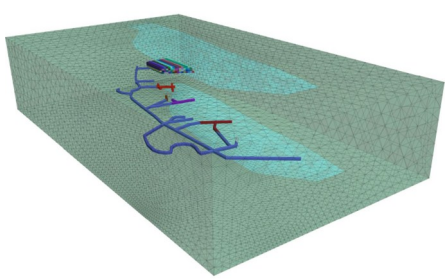


图1 三维数值模型

Fig.1 Three-dimensional numerical model

2.2 开采方案设计

为研究进路充填开采在不同进路宽度和开采时序下对巷道围岩破坏的影响规律,根据单一变量原则和现场实际情况,共设计6种回采方案,各方案均采用4个分层进行开采,通过调整进路宽度(4 m、5 m、6 m)和回采方向(上向或下向)进行组合设计,具体方案见表1。

表 1　开采方案设计

Table 1　Design of mining schemes

方案名称	进路宽度/m	回采方向
A	4	上向
B	4	下向
C	5	上向
D	5	下向
E	6	上向
F	6	下向

各方案严格按照采矿流程，从分段平巷、采场主穿巷道、进路回采充填等环节进行全过程模拟，并在分段平巷、采场主穿巷道分别设置两帮应力及顶板位移监测点，断面监测点布置如图 2 所示。

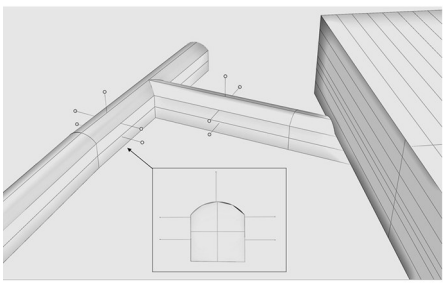
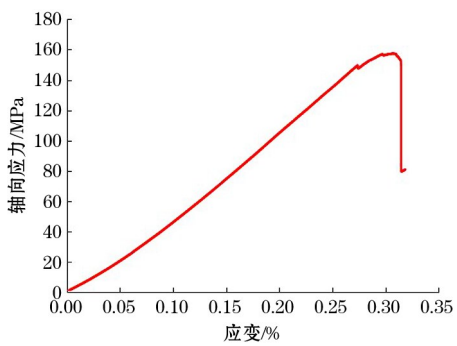


图 2　断面监测点布置

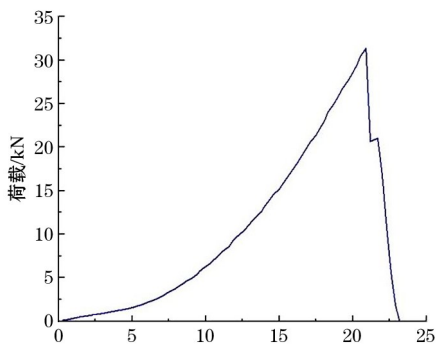
Fig.2　Layout of cross-section monitoring points

2.3　模型材料参数计算

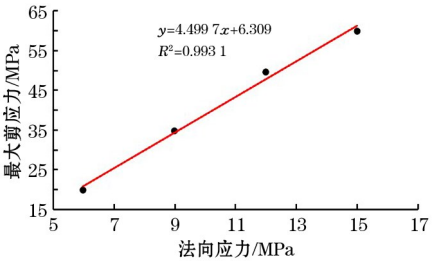
将现场矿体、围岩及充填体加工成不同试样，分别进行单轴压缩试验、巴西劈裂试验及直剪试验，获取试样基本力学参数，部分试验数据曲线如图 3 所示。



（a）轴向应力-应变曲线



（b）荷载-时间曲线



（c）最大剪应力-法向应力曲线

图 3　部分试验数据曲线

Fig.3　Partial test data curve

结合现场结构面赋存情况，对岩体稳固性进行分级，并通过 Hoek-Brown 强度准则对岩石力学参数进行折减[17]，具体公式如式(1)所示。

$$\begin{cases}\sigma_1=\sigma_3+\sqrt{m\sigma_c\sigma_3+s\sigma c_2}\\ m=m_i e^{\frac{G-100}{28-14D}}\\ s=e^{\frac{G-100}{9-3D}}\\ E_m=(1-\dfrac{D}{2})\cdot 10^{(\frac{G-10}{40})}\end{cases}\tag{1}$$

式中：σ_1 为最大主应力；m 为岩体的软硬强度参数；σ_c 为岩块单轴抗压强度；σ_3 为最小主应力；m_i 为完整岩石的软硬强度参数；G 为地质强度指标；E_m 为岩体弹性模量；D 为岩体受扰动损伤程度参数；s 为岩体完善性系数。

在给定的主应力范围内，将 Hoek-Brown 强度曲线与 Mohr-Coulomb 强度曲线通过式(2)进行线性拟合，可得岩体的黏聚力 c 和内摩擦角 φ。

$$\sigma_1=\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}\sigma_3+2c\ \frac{\cos\varphi}{1-\sin\varphi}\tag{2}$$

通过转换后的材料参数能够真实地反映现场岩体力学性质。数值模拟所选矿体与围岩材料参数见表 2。充填体材料参数见表 3。

表 2　矿体与围岩材料参数

Table 2　Material parameters of ore body and surrounding rock

岩性	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)	密度/(g/cm³)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/MPa
围岩(花岗岩)	11.64	0.27	47	2.565	7.86	0.7	1.2
矿体	21.26	0.19	50	2.663	25.33	2.0	1.8

表 3　充填体材料参数

Table 3　Material parameters of backfill

体积模量/MPa	剪切模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	密度/(g/cm³)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	黏聚力/kPa
80.9	58.2	0.21	36.9	1.82	1.07	0.1	143

3 采动影响下巷道稳定性规律分析

3.1 巷道顶板位移演化规律分析

在进路充填采矿法工程实践中,巷道顶板位移与进路尺寸及开采时序密切相关。图 4 为不同开采方案下巷道顶板位移变化曲线。分段平巷及采场主穿巷道的顶板位移均随着开采进程的推进呈现四阶段非线性式增长,当进行每个分层的上盘进路开采时,位移增长速率较缓,随着开采进路逐步逼近监测区域,采动应力影响增强,顶板位移增长速率明显提升。由于采场主穿巷道直接位于应力集中带,而分段平巷相较于采场主穿巷道距离采场较远,受采场扰动应力的影响较小,分段平巷顶板位移监测点的最大位移始终低于采场主穿巷道。

另外,从每分层开采对巷道顶板位移的影响来看,开采时序的变化会导致顶板位移在时空维度呈现差异化演变趋势。当采用上向进路开采时,无论进路宽度为多少,巷道顶板下沉速度最快的阶段均为开采第一分层时。而当采用下向进路开采,进路宽度为 4 m 和 5 m 时,在开采第三分层时,巷道顶板下沉速度最快。当进路宽度为 6 m 时,巷道顶板下沉速度则在开采第二分层时最快。

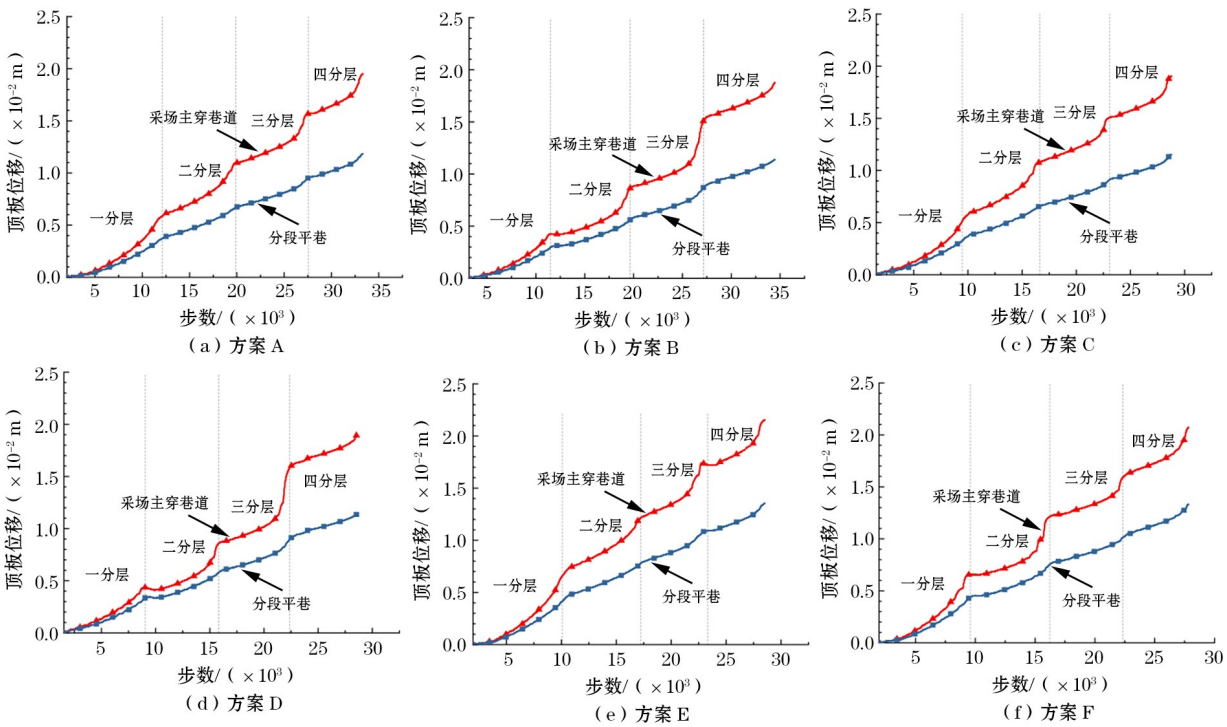


图 4 不同开采方案下巷道顶板位移变化曲线

Fig.4 Displacement change curves of roadway roof under different mining schemes

3.2 巷道应力分布演化规律分析

不同开采方案下分段平巷应力变化曲线如图 5 所示。整体来看,6 种开采方案下巷道顶板位移的演化趋势差距不大,巷道帮部应力集中程度均大于肩部,未进行开采活动时,由于巷道右侧监测点位于采场主穿巷道的应力释放区,因此巷道左帮及左肩的应力略大于巷道右帮及右肩,随着开采进程的推进,分段平巷两帮及肩角处应力均呈现非线性增长态势,但由于采场位于分段平巷的右侧,开采活动形成的非对称应力场对巷道右侧的影响大于巷道左侧,巷道右帮及右肩角的应力增加速率明显高于左帮及左肩角。

图 6 为不同开采方案下采场主穿巷道应力变化曲线。由图 6 可知,采场主穿巷道的应力分布特征与分段平巷相似,即帮部应力高于肩部应力。但受采动影响时,采场主穿巷道的应力增幅显著高于分段平巷,表现出更为强烈的应力动态演化特征。此外,在进路宽度相同的条件下,开采方式对采场主穿巷道应力演化规律存在显著影响:采用上向进路开采时,应力在第一分层和第二分层开采阶段出现急剧跃升,表现出明显的阶段性突变特征;而采用下向进路开采时,应力增长过程更为平缓均匀,呈现出相对稳定的渐进式变化趋势。

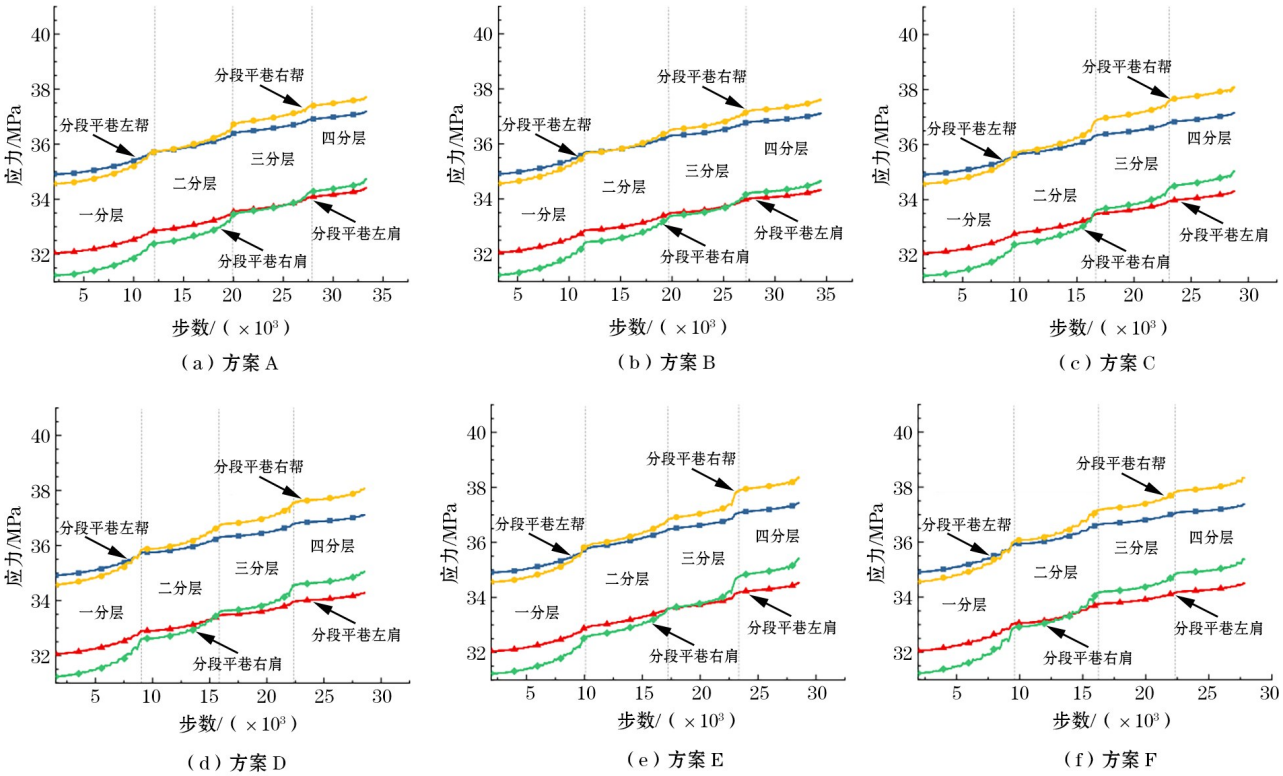


图5　不同开采方案下分段平巷应力变化曲线

Fig.5　Stress change curves of sublevel roadway under different mining schemes

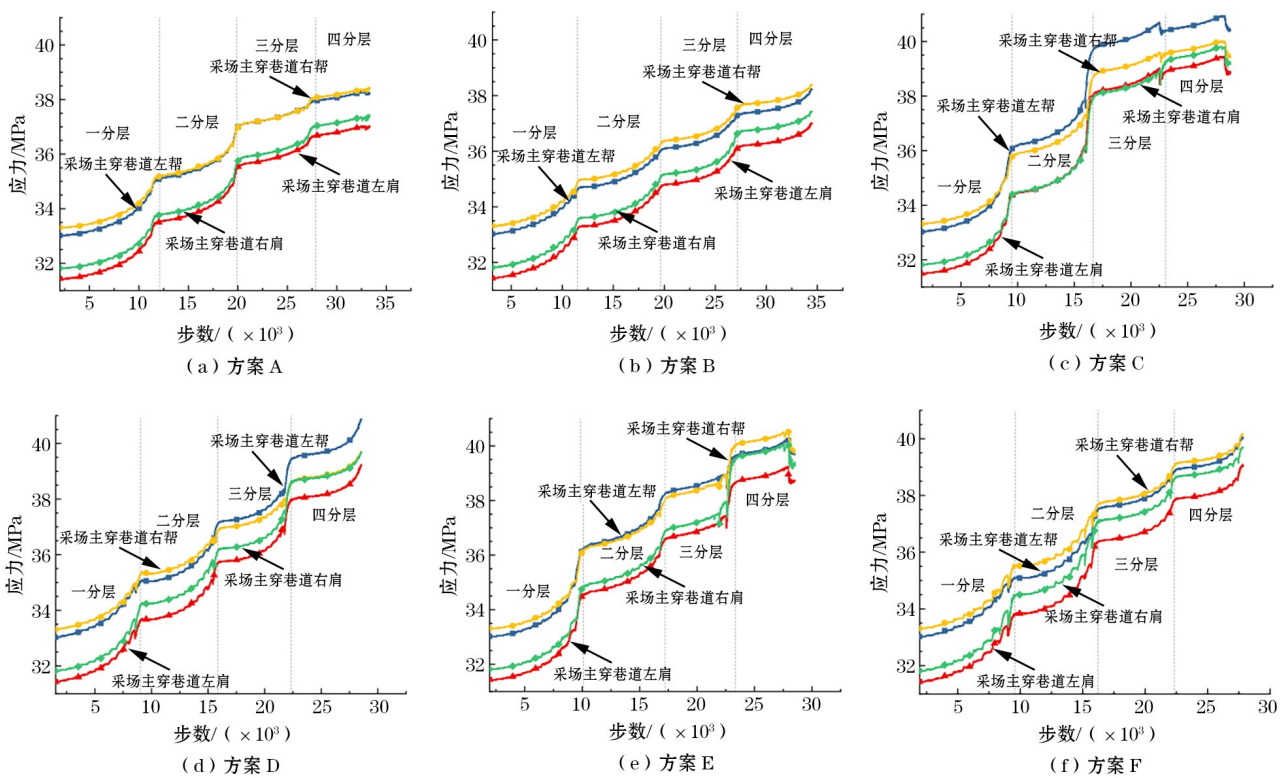


图6　不同开采方案下采场主穿巷道应力变化曲线

Fig.6　Stress change curves of stope main roadway under different mining schemes

4 开采方案优化分析

4.1 不同开采方案巷道围岩变形量分析

通过对图 7 和图 8 中 6 种不同开采方案下的巷道位移云图进行系统分析可知,采场主穿巷道与分段平巷的位移分布呈现出显著的非对称性分布特征,具体而言,采场主穿巷道最大位移均出现在巷道顶板偏右位置,而分段平巷最大位移分布在巷道右肩角及右帮上侧。当进路宽度为 4 m 时,上向进路开采工况下,采场主穿巷道顶板监测点最大位移达 18.1 mm,分段平巷顶板监测点最大位移为 11.3 mm;采用下向进路开采时,采场主穿巷道与分段平巷顶板监测点最大位移分别为 17.6 mm 和 10.9 mm。随着进路宽度增至 5 m,上向进路开采使采场主穿巷道的顶板最大位移提升至 18.2 mm,微增 0.1 mm,分段平巷顶板位移则维持在 11.3 mm;下向进路开采时,采场主穿巷道和分段平巷最大位移增加至 17.9 mm 和 11.1 mm,较进路宽度 4 m 时,最大位移分别增长 0.3 mm 和 0.2 mm。当进路宽度进一步增至 6 m,上向进路开采致使采场主穿巷道和分段平巷顶板监测点最大位移分别达到 19.0 mm 和 11.9 mm,较进路宽度 5 m 时,最大位移分别增长 0.8 mm 和 0.6 mm;下向进路开采时则达到 19.0 mm 和 11.7 mm。较进路宽度 5 m 时,最大位移分别增长 1.1 mm 和 0.6 mm。

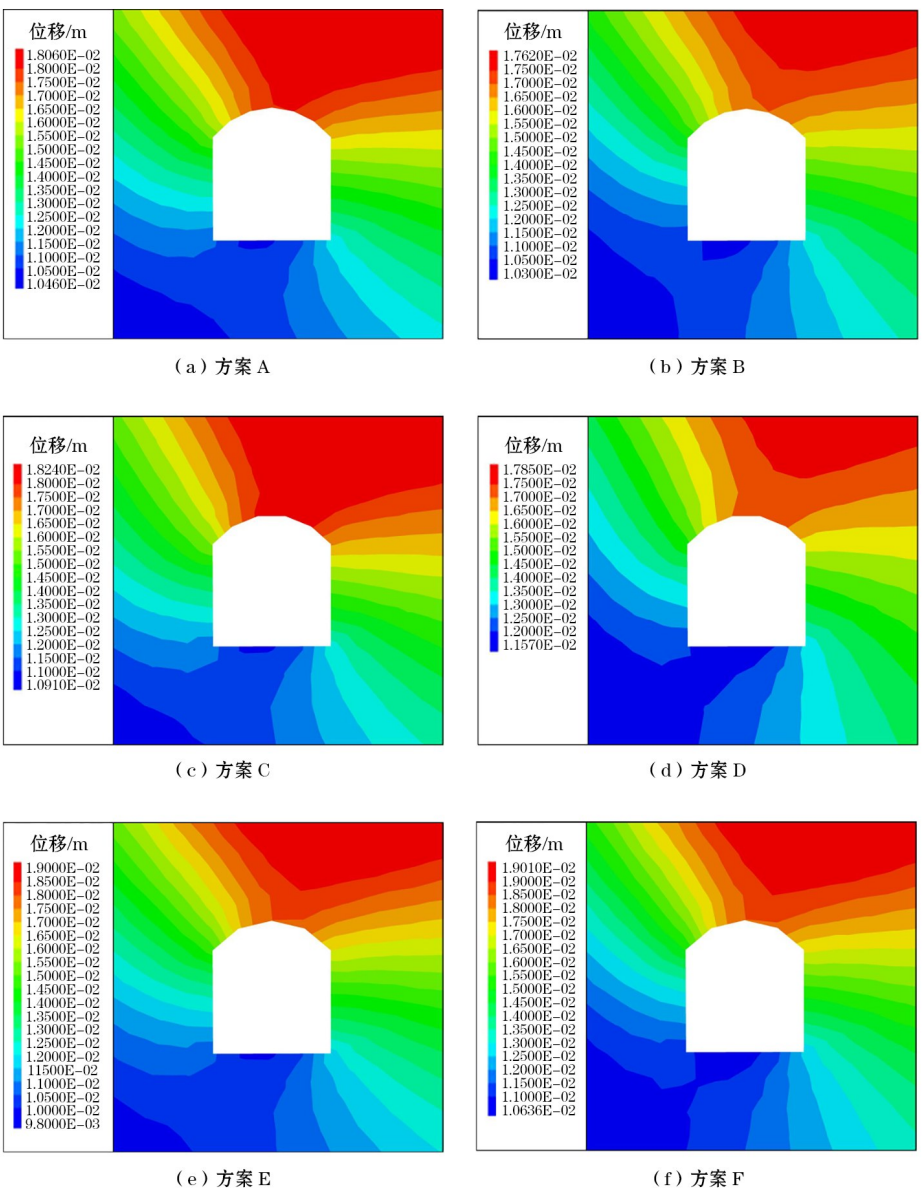


图 7 不同开采方案下采场主穿巷道围岩变形云图

Fig.7 Deformation cloud diagrams of surrounding rock in stope main roadway under different mining schemes

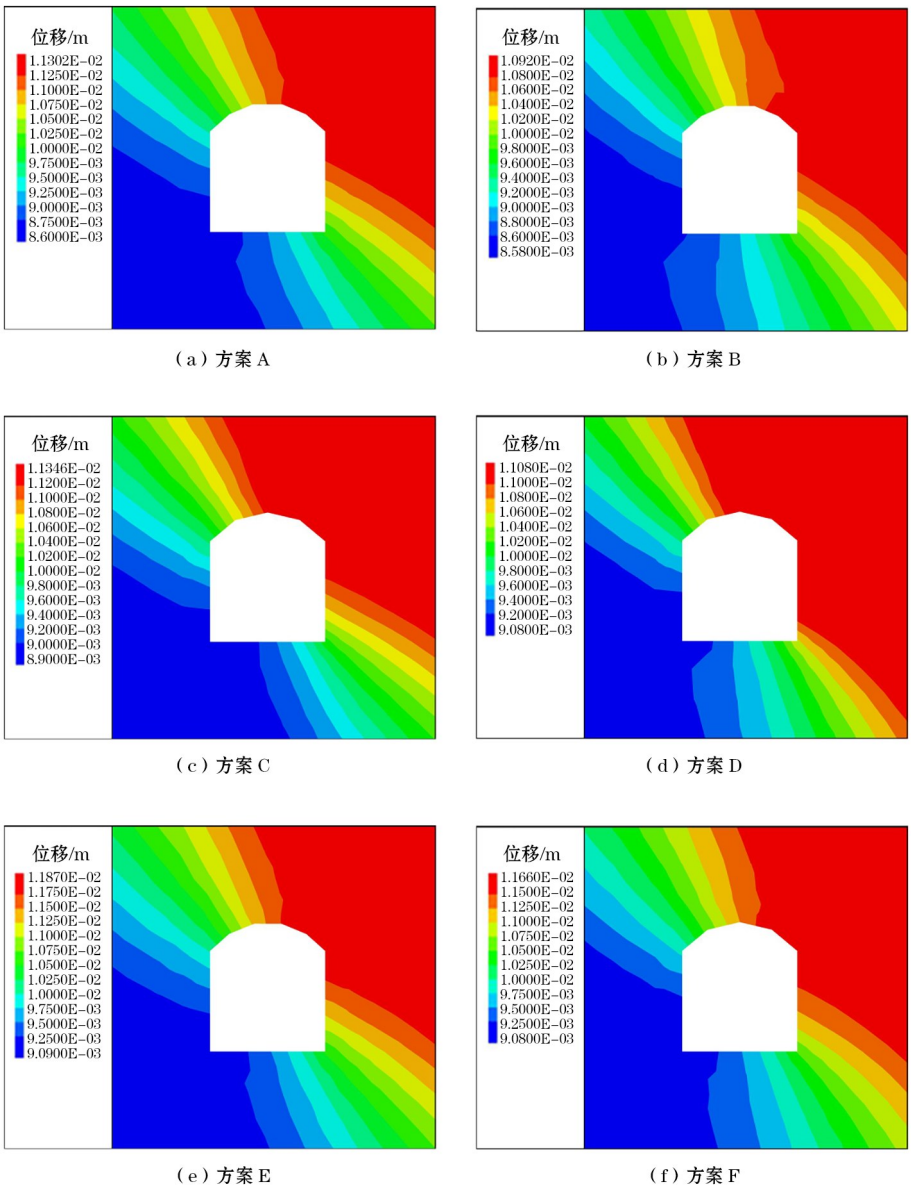


图 8　不同开采方案下分段平巷围岩变形云图

Fig.8　Deformation cloud diagrams of surrounding rock in sublevel roadway under different mining schemes

综合数据分析可知，在相同进路宽度条件下，下向进路开采对巷道顶板稳定性的影响稍小。但无论是上向进路开采还是下向进路开采，随着进路宽度的增大，采场主穿巷道和分段平巷顶板位移增幅均呈现增大趋势，其中，进路宽度从 4 m 增大至 5 m 时，巷道顶板位移变化幅度均较小，对巷道顶板稳定性的负面影响尚不显著，进路宽度从 5 m 增大至 6 m 时，对巷道顶板位移存在显著影响。

4.2　不同开采方案巷道应力分析

6 种不同开采方案下的采场主穿巷道和分段平巷的应力分布云图分别如图 9 和图 10 所示。在进路宽度为 4 m 时，上向进路开采下采场主穿巷道及分段平巷的最大应力分别为 50.8 MPa、46.4 MPa；进路宽度 5 m 时分别为 51.6 MPa、46.9 MPa，较进路宽度 4 m 时，最大应力增幅分别为 1.6%和 1.1%；进路宽度 6 m 时则分别为 53.6 MPa、47.8 MPa，较进路宽度 5 m 时，最大应力增幅分别为 3.9%和1.9%。下向进路开采时，采场主穿巷道及分段平巷的最大应力在巷道宽度为 4 m、5 m、6 m 时依次为 50.2 MPa、46.2 MPa，51.0 MPa、46.8 MPa，53.2 MPa、48.1 MPa。进路宽度由 4 m 增大到 5 m 时，采场主穿巷道和分段平巷的最大应力增幅分别为1.6%和 1.3%；进路宽度由 5 m 增大到 6 m 时，采场主穿巷道和分段平巷的最大应力增幅则分别为4.3%和 2.8%。

一方面,进路宽度一定时,相较于上向进路开采,下向进路开采时巷道两帮应力集中程度相对较小。另一方面,无论开采顺序如何,巷道宽度的增大会导致巷道围岩承载面积扩大,应力集中效应加剧。但两类巷道的应力变化幅度均与进路宽度呈现显著的非线性关联特性,具体来说,进路宽度从 4 m 变化到 5 m 时,应力变化幅度较小,增幅处于可控范围。而进路宽度从 5 m 变化到 6 m 阶段,巷道围岩应力出现明显跃升,不仅大幅增加了巷道变形失稳的风险,也对支护结构的承载能力提出了更高要求。

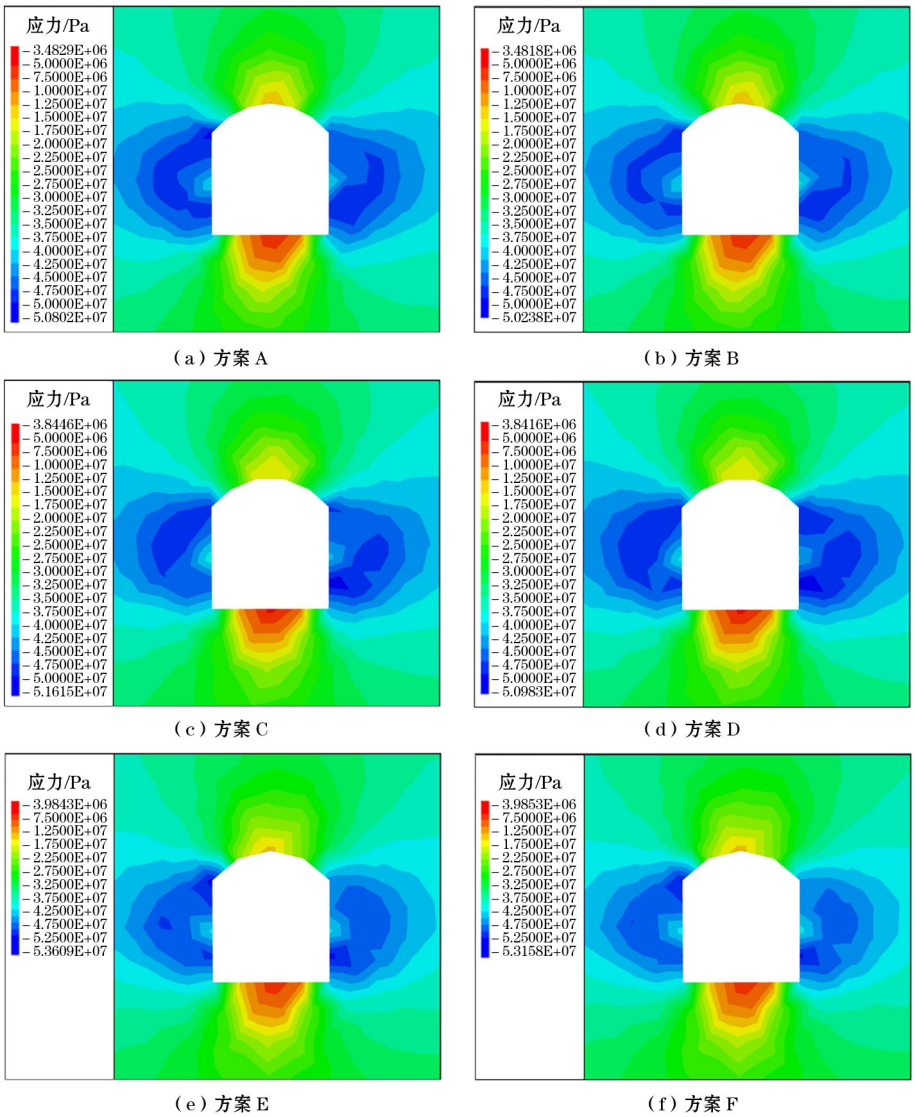
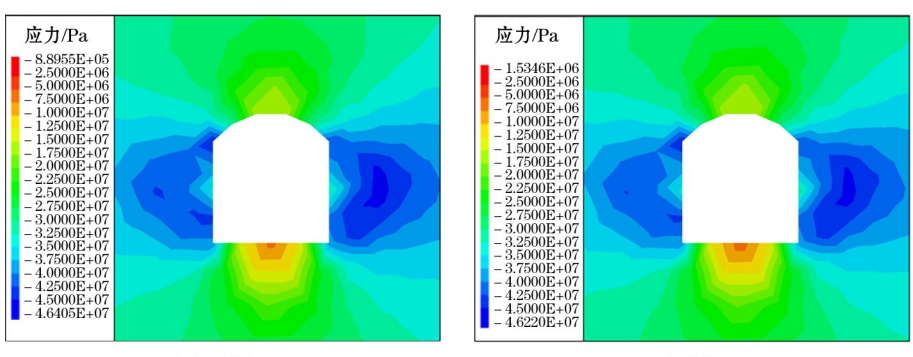


图 9 不同开采方案下采场主穿巷道应力分布云图

Fig.9 Stress distribution diagrams of stope main roadway under different mining schemes



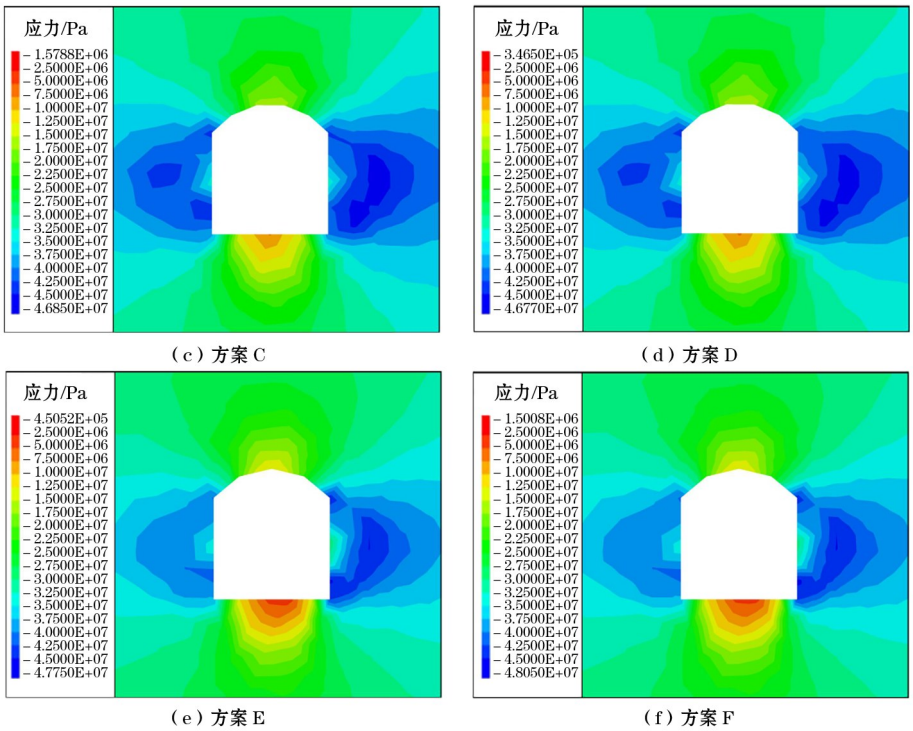


图 10 不同开采方案下分段平巷应力分布云图

Fig.10 Stress distribution diagrams of sublevel roadway under different mining schemes

4.3 开采方案优选

综合上述巷道围岩位移和应力分布规律分析,巷道进路宽度由 4 m 增大到 5 m 时,巷道稳定性受影响较小;效率上,增大了单次开采断面面积,有助于提升矿石开采效率,减少单位产量的开采作业次数;同时,与进路宽度 6 m 相比,无需投入过多成本用于加强巷道支护。此外,相较于上向进路开采,下向进路开采时巷道两帮应力集中程度相对较小,应力增长过程也更为平缓均匀,采场因在人工假顶下作业,还显著降低了顶板的支护需求,因此在满足开采需求的前提下,5 m 下向进路开采平衡了效率与成本,实现经济效益最大化,展现出更优的工程适用性。但开采过程中仍需对分段平巷左侧及采场主穿巷道采取必要的卸压或支护措施,以维持巷道的整体稳定性。

5 现场工业试验

为验证分析结论的准确性,在三山岛金矿深部采用 5 m 下向进路进行开采试验,并在对应分段平巷设置监测断面。监测断面内布置了 4 支光纤钻孔应力传感器和 1 支光纤顶板离层传感器,其安装位置分别对应数值模拟中应力和位移的监测点位,现场安装情况如图 11 所示。



图 11 现场安装情况

Fig.11 On-site installation

5.1 巷道顶板位移监测数据分析

监测断面顶板离层传感器数据变化趋势如图 12 所示。

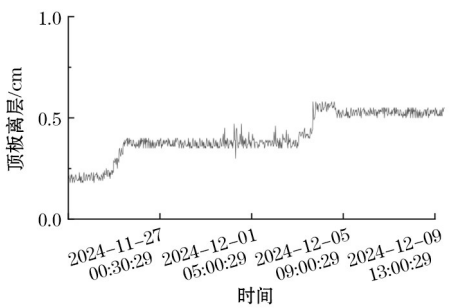


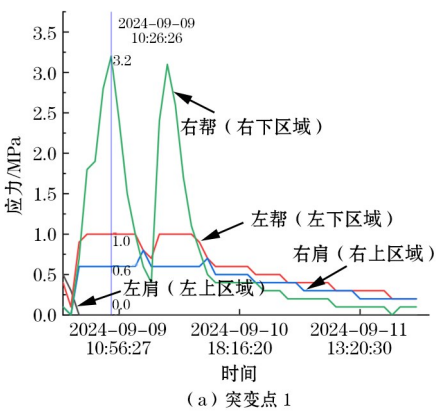
图 12 监测断面顶板离层传感器数据变化趋势

Fig.12 Change trend of roof separation sensor data in monitoring section

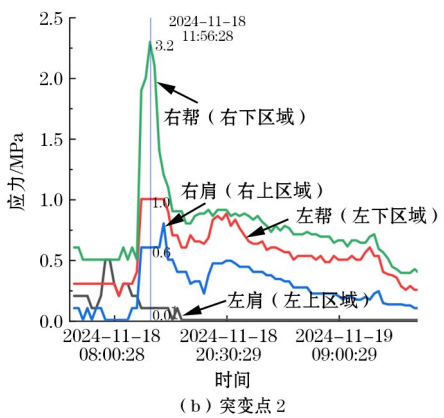
受现场施工环境影响,顶板离层仪仅采集到第一分层开采时部分顶板位移数据,但从监测数据中仍可以看出,顶板离层传感器数据呈现缓慢上升趋势。实际开采过程中,每条进路的施工存在一定时间间隔,使得巷道顶板位移监测数据会经历一段平稳期。仅分析巷道位移的增长趋势可知,巷道位移增长量呈逐步增加态势,且第一分层开采结束后顶板位移为 0.5 cm,这与模拟中 5 m 下向进路开采时巷道位移的增长规律高度吻合,直接印证了前文位移演化规律及参数优化的可靠性。

5.2 巷道应力监测数据分析

监测断面钻孔应力数据突变时间分析如图 13 所示。



(a) 突变点 1



(b) 突变点 2

图 13 监测断面钻孔应力数据突变时间分析

Fig.13 Analysis of mutation time of borehole stress data in monitoring section

应力传感器在安装时预先设置了 2 MPa 的预压值,并将该值校准为监测数据的 0 基准点。应力数据突变分析结果表明,巷道右帮(右下区域)受采动影响最为剧烈,其次为左帮(左下区域),随后依次是右肩(右上区域)与左肩(左上区域)。这一实测结果与前文应力分析结果相互契合,进一步验证了前文应力演化规律及参数优化的可靠性。

6 结论

(1) 进路开采扰动影响下,巷道顶板位移随开采进程的推进呈现四阶段非线性增长,采场主穿巷道的顶板位移大于分段平巷。上向进路开采时,顶板下沉量最快的阶段为开采第一分层时;下向进路开采时,进路宽度为 4 m 和 5 m 时,在开采第三分层时巷道顶板下沉速度最快,进路宽度为 6 m 时,巷道顶板下沉速度则在开采第二分层时最快。

(2) 采场主穿巷道及分段平巷的巷道帮部应力集中程度均高于肩部,分段平巷右侧帮部及肩角受扰动影响更大,应力增长速率更快。上向进路开采时,采场主穿巷道应力呈阶段性突变增长,而下向进路开采时,应力增长更为平缓均匀。

(3) 进路宽度对巷道稳定性影响显著,进路宽度从 4 m 增至 5 m 时,顶板位移和应力增幅较小,对稳定性影响有限,同时能增大单次开采断面面积,提升开采效率,减少作业次数;进路宽度从 5 m 增至 6 m 时,位移和应力增幅明显加大,巷道变形失稳风险显著增加。

(4) 相同进路宽度下,下向进路开采对巷道稳定性的影响小于上向进路开采,其应力集中程度较低且增长过程平稳。综合开采效率及巷道稳定性因素,5 m 下向进路开采方案表现最优,工程适用性更佳。但需对分段平巷左侧及采场主穿巷道采取卸压或支护措施。

(5) 现场工业监测数据表明,巷道顶板位移增幅随开采进程的推进而逐步增加,应力分布呈现右帮(右下区域)受采动影响最剧烈的非对称特征,有力佐证了模拟分析及参数优化结果的可靠性,研究结果可为同类工程提供参考。

参考文献(References):

[1] Li Peng, Cai Meifeng. Challenges and new insights for exploitation of deep underground metal mineral resources [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021,31(11):3478-505.

[2] 黄麟淇,陈江湛,周健,等.未来有色金属采矿可持续发展实践与思考[J].中国有色金属学报,2021,31(11):3436-3449. Huang Linqi, Chen Jiangzhan, Zhou Jian, et al. Practice and thought on sustainable development of nonferrous metal mining[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021,31(11):3436-3449.

[3] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.

Cai Meifeng, Xue Dinglong, Ren Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering,2019,41(4):417-426.

[4] 江飞飞,周辉,刘畅,等.地下金属矿山岩爆研究进展及预测与防治[J].岩石力学与工程学报,2019,38(5):956-972.
Jiang Feifei, Zhou Hui, Liu Chang, et al. Progress, prediction and prevention of rockbursts in underground metal mines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(5):956-972.

[5] Xie Heping, Gao Mingzhong, Zhang Ru, et al. Study on the mechanical properties and mechanical response of coal mining at 1000 m or deeper[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(5): 1475-1490.

[6] 王社光,路燕泽,于兴社,等.中关铁矿采场回采进路宽度优化与应用[J].矿业研究与开发,2024,44(11):17-23.
Wang Sheguang, Lu Yanze, Yu Xingshe, et al. Optimization and application of mining approach width in Zhongguan Iron Mine[J]. Mining Research and Development,2024,44(11):17-23.

[7] Zhang Yaohua, Mitri Hani S. Elastoplastic stability analysis of mine haulage drift in the vicinity of mined stopes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2008,45(4):574-593.

[8] 刘志义,甘德清,张友志,等.基于灵敏度分析的下向进路参数优选及工程应用[J].金属矿山,2021(6):115-121.
Liu Zhiyi, Gan Deqing, Zhang Youzhi, et al. Parameter optimization and engineering application of downward drift based on sensitivity analysis[J]. Metal Mine, 2021(6): 115-121.

[9] 石宏伟,黄吉荣,沐兴旺,等.毛坪矿下向水平分层胶结充填矩形进路顶板破坏失稳研究[J].矿业研究与开发,2019,39(12):16-21.
Shi Hongwei, Huang Jirong, Mu Xingwang, et al. Study on roof failure and instability of rectangular drift with downward horizontal slicing cemented filling in Maoping mine[J]. Mining Research and Development, 2019,39(12): 16-21.

[10] 邢军,范凯,姚维,等.滑石矿下向进路充填采场结构参数优化[J].金属矿山,2019(6):62-67.
Xing Jun, Fan Kai, Yao Wei, et al. Stope structure parameter optimization for downward drift backfill stoping of talcum mine[J]. Metal Mine,2019(6):62-67.

[11] 刘冬,邵安林,金长宇,等.地下破碎矿体数值计算模型的构建及采场结构参数优化[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(2):437-444.
Liu Dong, Shao Anlin, Jin Changyu, et al. Numerical model building for broken ore body and optimization of stope structural parameters[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2019,50(2):437-444.

[12] 戴怡文,王卫华,孙道元,等.深部采场进路开采顶板稳定性分析与支护设计[J].中国安全生产科学技术,2018,14(2):33-38.
Dai Yiwen, Wang Weihua, Sun Daoyuan, et al. Roof stability analysis and support design in drift mining of deep stope[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(2):33-38.

[13] 李彦龙,余龙哲,陈仲杰,等.复杂应力环境下胶结充填采矿法进路开采顺序优化[J].矿冶工程,2024,44(4):144-149.
Li Yanlong, Yu Longzhe, Chen Zhongjie, et al. Optimization of sequence of drift stoping by cemented backfilling under complex stress conditions[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2024,44(4):144-149.

[14] 卢西洲,王文杰,贾稳宏,等.大体积充填体下胶结充填法回采进路参数优化研究[J].矿冶工程,2022,42(5):20-25.
Lu Xizhou, Wang Wenjie, Jia Wenhong, et al. Parameter optimization for stoping by cemented backfilling below massive filling body[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2022,42(5):20-25.

[15] 尚雪义,李夕兵,彭康,等.基于安全系数和可靠度的极破碎矿体进路优化[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(7):2390-2397.
Shang Xueyi, Li Xibing, Peng Kang, et al. Optimization of drift in extremely fractured ore-body based on safety coefficient and reliability analysis[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2016,47(7):2390-2397.

[16] 张宝,李永辉,盛佳.深部高应力破碎矿床下向进路充填采矿法盘区卸荷回采应用研究[J].矿业研究与开发,2023,43(11):6-11.
Zhang Bao, Li Yonghui, Sheng Jia. Application research on panel unloading mining of downward drift filling mining method in deep broken deposit under high stress[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):6-11.

[17] Hoek Evert, Brown Edwin T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,ASCE,1980,106(9):1013-1035.