某金矿井筒保安矿柱圈定范围优化研究*

王亚军[1,2],陈寅[3],李向东[1,2],孟俊波[1,2],郑旭[3],王玉丁[1,2],陈金刚[4],王建邦[3]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
3.新疆喀拉通克矿业有限责任公司, 新疆 阿勒泰地区 836100;
4.西藏华泰龙矿业开发有限公司, 西藏 拉萨 850200)

摘要:针对某金矿井筒的保安矿柱压覆矿量大的问题,通过数值模拟计算方法,分析不同保安矿柱圈定角度对井筒及围岩稳定性的影响,并重新圈定了保安矿柱范围。数值模拟计算结果表明,该矿13号矿脉开采对井筒稳定性的影响随保安矿柱圈定角度的增大而增大,当保安矿柱圈定角度超过75°后,地压活动显著加剧,尤其在深部采场回采后,存在井筒失稳的风险。因此,建议将保安矿柱圈定角度控制在75°及以下,以确保井筒的安全性。将保安矿柱的圈定角度由65°增大至75°,保安矿柱压覆的矿石体积由1 192 955.0 m^3 减少到545 256.7 m^3,可释放约54.3%的矿石资源,提高了矿产资源的利用率,有利于矿山的可持续发展。

关键词:保安矿柱;圈定角度;稳定性分析;压覆矿量
中图分类号:TD321;TD853.391 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0082-11

Study on Optimization of Delineation Range of Safety Pillar for Shafts in a Gold Mine

WANG Yajun[1,2], *CHEN Yin*[3], *LI Xiangdong*[1,2], *MENG Junbo*[1,2], *ZHENG Xu*[3], *WANG Yuding*[1,2], *CHEN Jingang*[4], *WANG Jianbang*[3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co. Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining , Changsha, Hunan 410012, China;
3.Xinjiang Kalatongke Mining Co., Ltd., Altay Prefecture, Xinjiang 836100, China;
4. Xizang Huatailong Mining Development Co., Ltd., Lhasa, Xizang 850200, China)

Abstract: To address the problem of a large amount of overlaid ore by the shaft safety pillar in a gold mine, numerical simulation calculations method were carried out to analyze the influence of different delineation angles of the safety pillar on the stability of the shaft and surrounding rock, and the safety pillar range was re-delineated. The numerical simulation results show that the influence of mining of No.13 ore vein of the mine on shaft stability increases with the increase of the delineation angle of the safety pillar. When the delineation angle of the safety pillar exceeds 75°, ground pressure behavior is significantly intensified, and there exists a risk of shaft instability, especially after the stoping of deep stopes. Therefore, it is recommended that the delineation angle of the safety pillar be controlled at 75° and below to ensure the safety of the shaft. When the delineation angle of the safety pillar is increased from 65° to 75°, the volume of overlaid ore in the safety pillar is reduced from 1 192 955.0 m^3 to 545 256.7 m^3. About 54.3% of ore resources can be released, which improves the utilization rate of mineral resources and is conducive to the sustainable development of the mine.

Key words: Safety pillar, Delineation angle, Stability analysis, Amount of overlaid ore

0 引言

井筒是地下矿山生产活动中极为重要的永久性工程,其稳定性对于矿山的安全生产具有至关重要的意义[1-3]。为确保井筒的稳定性,通常需在井筒周边设置保安矿柱[4]。传统的保安矿柱圈定方法通常是从地表至井筒底部围绕井筒划定一个圆台形的矿岩体[5-6]。然而,这种方法主要基于经验,具有一定的局限性[7]。特别是在采深不断增加的情况下,圈定的保安矿柱范围通常过大,与实际安全需求存在

* **收稿日期**:2025-01-17
基金项目:西藏自治区科技计划项目(XZ202502ZY0018-02);新疆"天山英才"第二批优秀工程师(陈寅)培养计划
作者简介:王亚军(1991—),男,湖南岳阳人,硕士,高级工程师,主要从事金属矿山采矿工艺研究工作。E-mail:648324460@qq.com
通信作者:孟俊波(2000—),男,河南平顶山人,硕士,助理工程师,主要从事金属矿山采矿工艺研究工作。E-mail:149175952@qq.com

较大的偏差[8-10]。由于不同矿山的矿体赋存状况和地质条件复杂程度不同,传统方法圈定的井筒保安矿柱难以精确地满足安全保障的需求[11-12]。因此,采用有限元数值模拟技术来圈定保安矿柱已成为一种更为可靠的手段。

目前,多位学者已将有限元数值模拟技术应用于保安矿柱优化研究[13-15]。张超等[16]通过 3D Mine-Rhinoceros-FLAC3D 耦合,构建了矿区的精细化三维模型,进行保安矿柱的优化模拟及稳定性分析。研究表明,矿体开采结束后,保安矿柱的移动角达到 79°时,能满足井筒的稳定性要求,预计可回收保安矿柱内近 70%的矿石资源。郭琪等[17]利用 FLAC3D 模拟了不同保安矿柱厚度下井筒围岩的应力应变及地表位移变形,结果显示,对于急倾斜中厚矿体的充填法开采,井下关键工程必须布置在矿体外 30 m 甚至更远。池秀文等[18]对充填开采安全深度与保安矿柱的圈定进行了研究,运用 FLAC3D 分析了三鑫矿桃花嘴矿区开采过程中采场顶板下沉量、塑性区分布及井筒的位移与应力变化,确定了安全开采深度为-442 m;在安全开采深度的基础上,对保安矿柱重新圈定,与传统方法相比,释放了大量压覆资源,提高了矿产资源的利用率。

某金矿采用传统的保安矿柱圈定方法进行生产规划,保安矿柱占有的矿石量大,制约了矿山的产能保持和持续发展。为此,采用 FLAC3D 数值模拟软件对井筒及其围岩在不同岩石移动角度下的稳定性进行了深入研究。通过数值模拟分析,重新圈定了保安矿柱的范围,并计算了重新圈定保安矿柱范围后所释放的矿石量。这不仅有助于提高矿产资源的利用率,促进矿山的可持续发展,同时也为矿山生产规划提供了更加科学合理的指导。

1 工程背景

某金矿位于高原与平原之间的中高山区,现阶段规划的主要采场位于靠近主竖井的 13 号矿体和 32 号矿体。这两个矿体赋存区域与竖井的距离较近,其中主竖井位于 13 号矿体的上盘。为了确保生产安全,竖井周边划定了保安矿柱范围,这一措施导致保安矿柱占有 13 号矿体的矿石储量较大,从而制约了矿山的生产规划和可持续发展。矿山初步设计中按 65°的岩石移动角圈定井筒保安矿柱,被保安矿柱压覆的 13 号矿体范围如图 1 所示。矿山主要采用空场采矿法进行开采,目前+818 m 中段以上的大部分采空区已用废石回填治理,下部仍存在部分贯通的采空区。

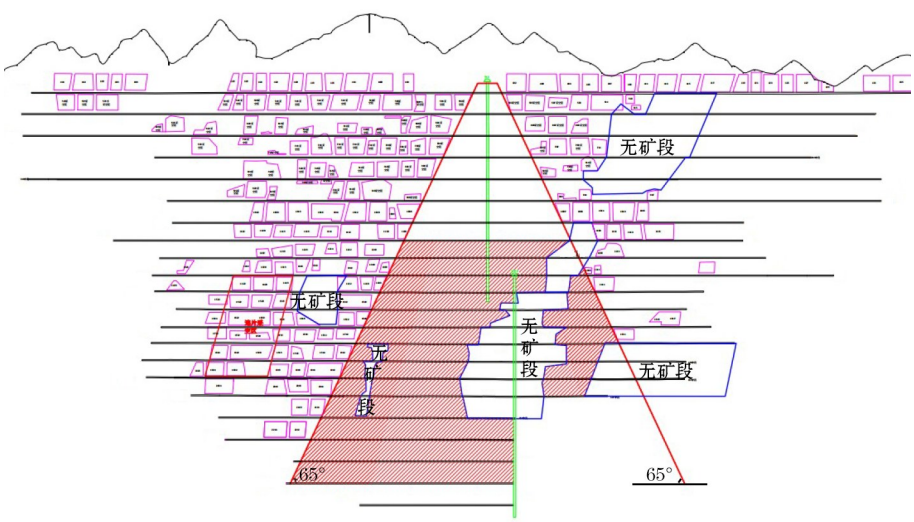


图 1 保安矿柱压覆矿石量纵投影

Fig.1 Longitudinal projection of the ore overlaid by the safety pillar

2 数值模型及边界条件

2.1 数值模型

采用 3DMINE、AUTOCAD 与 Midas GTX 共同建立三维数值模型,最后导入 FLAC3D 进行数值模拟计算。模型长 3 800 m,宽 2 000 m,高 1 606 m。模型中主要包括地表轮廓、地质体、井筒等。

2.2 边界条件及监测点

(1) 位移边界条件。模型底部采用固定约束,X 和 Y 方向边界施加铰支约束。

(2) 应力边界条件。在竖向方向对模型施加自重应力,根据围岩泊松比计算出侧向应力系数,并根

据侧应力系数给模型施加侧向水平应力。

(3) 监测点布置。为了观测井筒的稳定性状态,需对主竖井和盲竖井的变形情况进行监测,主竖井处于+658～+1 118 m 标高段,且布置在 13 号矿体上盘。矿体的开采会引起上覆岩层移动,进而可能影响到主竖井的安全。盲竖井布置在 13 号矿体下盘,受开采扰动的程度比主竖井的小,但为了安全考虑以及作为主竖井的对比参考依据,在盲竖井每个中段水平均布置 1 个位移监测点。两条井筒共布置 24 个监测点。

2.3 岩体力学参数

通过对室内岩石力学试验所获得的参数值进行适当的折减后,确定数值计算模型的物理力学参数赋值。岩体和充填体的物理力学参数值见表 1。

表 1 岩体和充填体的物理力学参数

Table 1 Physical mechanical parameters of rock mass and backfill

材料名称	密度/(kg/m³)	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
片麻岩(上盘)	2 780	0.282	40.39	7.03	0.27	8.52	44.25
伟晶岩(下盘)	2 620	0.292	41.79	5.56	0.25	8.82	44.25
含金矿体	2 720	0.237	31.87	8.90	0.24	6.67	44.57
松散充填体	1 900	0.020	0.32	0.20	0.21	0.15	3.00

3 数值模拟方案与结果分析

3.1 数值模拟方案

某金矿的初步设计按照 65°的岩石移动角圈定井筒保安矿柱,并对保安矿柱范围外的矿体进行回采。经过多年开采,生产范围已延伸到+218 m 中段。综合当前井筒的稳定性状况来看,可对现有的保安矿柱圈定范围做进一步优化,为了便于分析比较,同时观察矿山历史开采过程对井筒的扰动影响,将初步设计中按 65°的岩石移动角圈定的保安矿柱纳入保安矿柱优化设计比选方案中,具体的优化方案见表 2。数值模拟计算时,首先对模型进行初步平衡计算,然后依据不同保安矿柱圈定方案,对矿柱范围以外的矿体从+1 118 m 中段开始由上至下逐中段开采至+218 m 水平。

表 2 保安矿柱圈定方案

Table 2 Safety pillar delineation scheme

圈定方案	圈定角度/(°)
方案Ⅰ(现圈定范围)	65
方案Ⅱ	70
方案Ⅲ	75
方案Ⅳ	80

为了观测井筒的稳定性状态,需对主竖井和盲竖井的变形情况进行监测,已知主竖井赋存于+658～+1 118 m 中段,且主竖井布置在 13 号矿脉上盘,矿体的开采会引起上覆岩层的移动,进而可能影响到主竖井的安全,而盲竖井布置在矿体下盘,受开采扰动的程度在一般情况下不及主竖井,但为了安全考虑以及作为主竖井的对比参考依据,同样布置监测点。因此,在主或盲竖井每个中段均布置 1 个位移监测点,共布置 24 个监测点,这些位移监测点的具体信息见表 3 和表 4。

表 3 主竖井位移监测点布置

Table 3 Layout of displacement monitoring points for the main shaft

监测点编号	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标/m
ZSJ01	37 382 492.892	4 506 172.654	658
ZSJ02	37 382 492.892	4 506 172.654	698
ZSJ03	37 382 492.892	4 506 172.654	738
ZSJ04	37 382 492.892	4 506 172.654	778
ZSJ05	37 382 492.892	4 506 172.654	818
ZSJ06	37 382 492.892	4 506 172.654	868
ZSJ07	37 382 492.892	4 506 172.654	918
ZSJ08	37 382 492.892	4 506 172.654	968
ZSJ09	37 382 492.892	4 506 172.654	1 018
ZSJ10	37 382 492.892	4 506 172.654	1 068
ZSJ11	37 382 492.892	4 506 172.654	1 118

表 4 盲竖井位移监测点布置

Table 4 Layout of displacement monitoring points for the blind shaft

监测点编号	X 坐标	Y 坐标	Z 坐标/m
MSJ01	37 382 555.493	4 506 380.100	188
MSJ02	37 382 555.493	4 506 380.100	218
MSJ03	37 382 555.493	4 506 380.100	268
MSJ04	37 382 555.493	4 506 380.100	318
MSJ05	37 382 555.493	4 506 380.100	368
MSJ06	37 382 555.493	4 506 380.100	418
MSJ07	37 382 555.493	4 506 380.100	458
MSJ08	37 382 555.493	4 506 380.100	498
MSJ09	37 382 555.493	4 506 380.100	538
MSJ10	37 382 555.493	4 506 380.100	578
MSJ11	37 382 555.493	4 506 380.100	618
MSJ12	37 382 555.493	4 506 380.100	658
MSJ13	37 382 555.493	4 506 380.100	698

3.2　数值模拟结果分析

3.2.1　最大不平衡力分析

各中段保安矿柱范围外采场“采－充”数值仿真计算完成后，为探寻各方案对应模型回采过程中的地压活动情况，通过数据处理获取了13号矿体采场仿真回采过程中最大不平衡力的波动曲线，如图2所示。

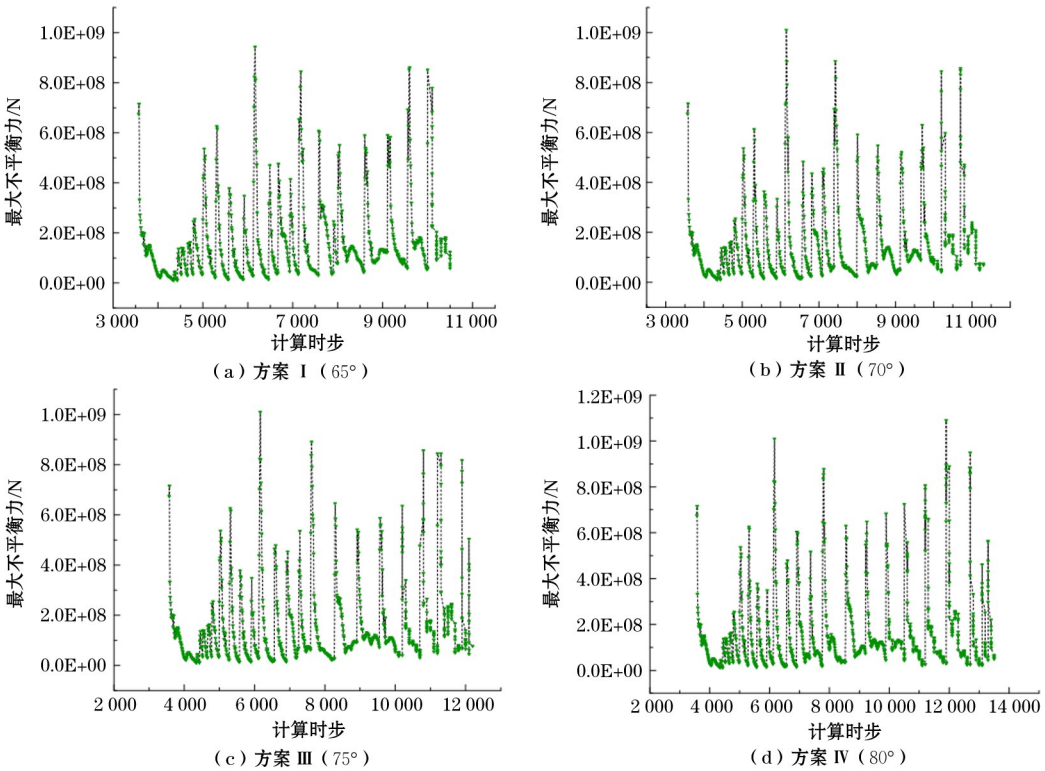


图2　模型最大不平衡力

Fig.2　Maximum unbalance force of the model

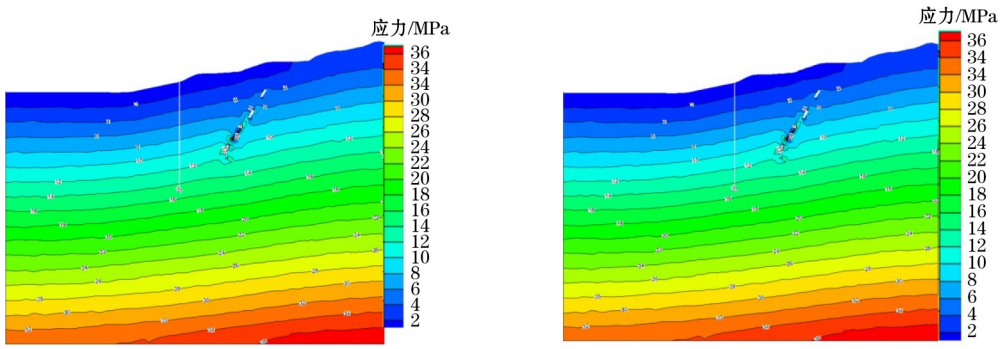
(1) 13号矿脉的地压活动剧烈程度与井筒保安矿柱的圈定角度之间存在着正相关的关系。具体而言，当保安矿柱的圈定角度增大时，13号矿脉所能释放出的可采矿量相应增多，生产采场的数量亦随之增加，这一变化进而导致整个模型中所出现的最大不平衡力峰值显著升高。

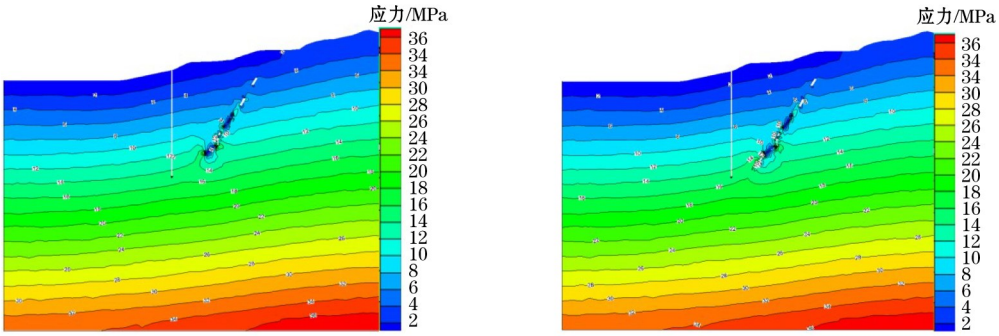
(2) 在矿柱圈定角度为65°、70°以及75°的模型中，地压活动整体上呈现出随圈定角度增大而平稳增长的态势，且不平衡力的峰值增长维持在1×10^9 N的水平范围内。然而，当保安矿柱的圈定角度由75°增加至80°时，在深部中段采场回采之后地压活动出现了明显的加剧现象。

(3) 从地压活动角度判断，13号矿脉井筒保安矿柱圈定角度应控制在75°及以下。

3.2.2　应力场分析

为研究矿山目前开采现状条件下主竖井、盲竖井及周围围岩的应力分布状态，按照回采保安矿柱圈定方案及相应计算步骤将＋218～＋1 118 m中段内采场进行回采模拟，通过模拟得到了采场全部回采完成后的主竖井及盲竖井的应力变化情况，如图3和图4所示。

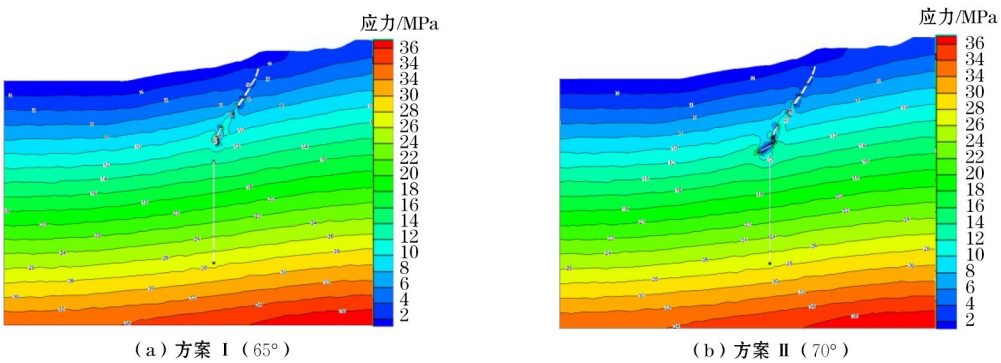




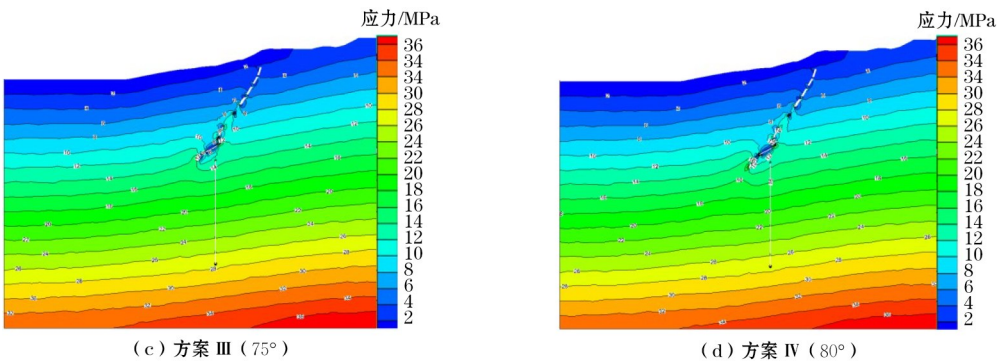
(c)方案Ⅲ(75°) (d)方案Ⅳ(80°)

图3 主竖井第一主应力分布云图

Fig.3 Cloud maps of the first main stress distribution of the main shaft



(a)方案Ⅰ(65°) (b)方案Ⅱ(70°)



(c)方案Ⅲ(75°) (d)方案Ⅳ(80°)

图4 盲竖井第一主应力分布云图

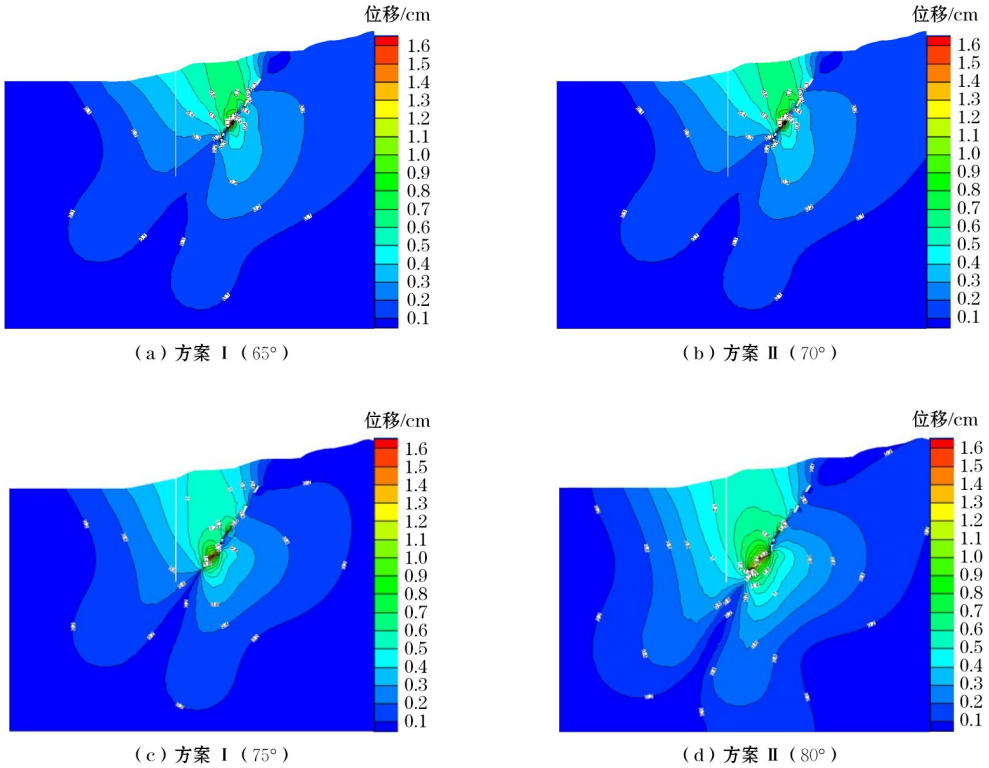
Fig.4 Cloud maps of first principal stress distribution of the blind shaft

(1)模拟计算结果表明,保安矿柱范围之外的采场回采后,主竖井周边区域的第一主应力随着保安矿柱圈定角度的增大呈现出逐渐增大的趋势,方案Ⅰ至方案Ⅳ的第一主应力大小分别为21.50 MPa、21.56 MPa、21.64 MPa以及21.84 MPa。盲竖井周边区域的第一主应力也随着矿柱圈定角度的增大而增大,方案Ⅰ至方案Ⅳ的第一主应力大小分别为36.21 MPa、36.23 MPa、36.24 MPa以及36.26 MPa。这些主应力数值均未超过岩体的抗压强度,也未观测到明显的应力集中现象。

(2)拉应力主要集中分布在采场周边的区域,而盲竖井周边则未检测到拉应力场的存在,盲竖井目前并未出现较大范围的剪切或拉伸破坏。整体而言,矿区的地质结构保持稳定。

3.2.3 位移场分析

13号脉采场仿真回采过程中主竖井的位移场分布如图5所示,主竖井监测点位移情况如图6所示。盲竖井的位移场分布如图7所示,盲竖井监测点位移情况如图8所示。

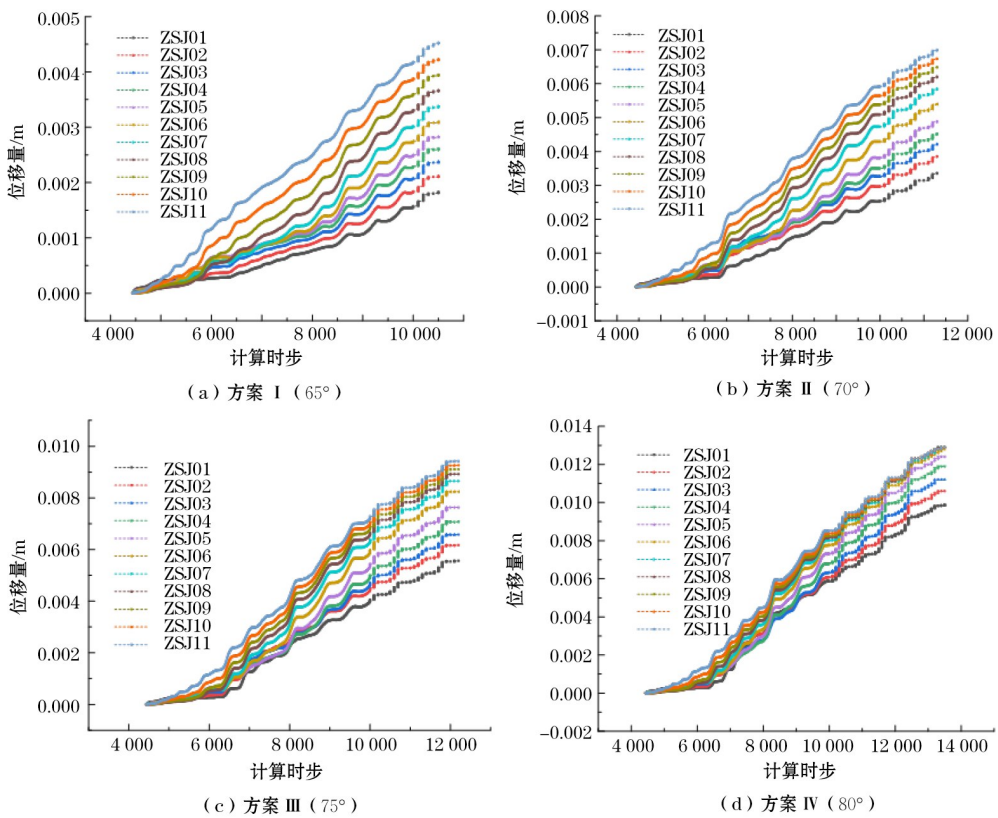


(a) 方案 Ⅰ (65°)　(b) 方案 Ⅱ (70°)

(c) 方案 Ⅰ (75°)　(d) 方案 Ⅱ (80°)

图 5　主竖井的位移场分布云图

Fig.5　Cloud maps of displacement field distribution of the main shaft

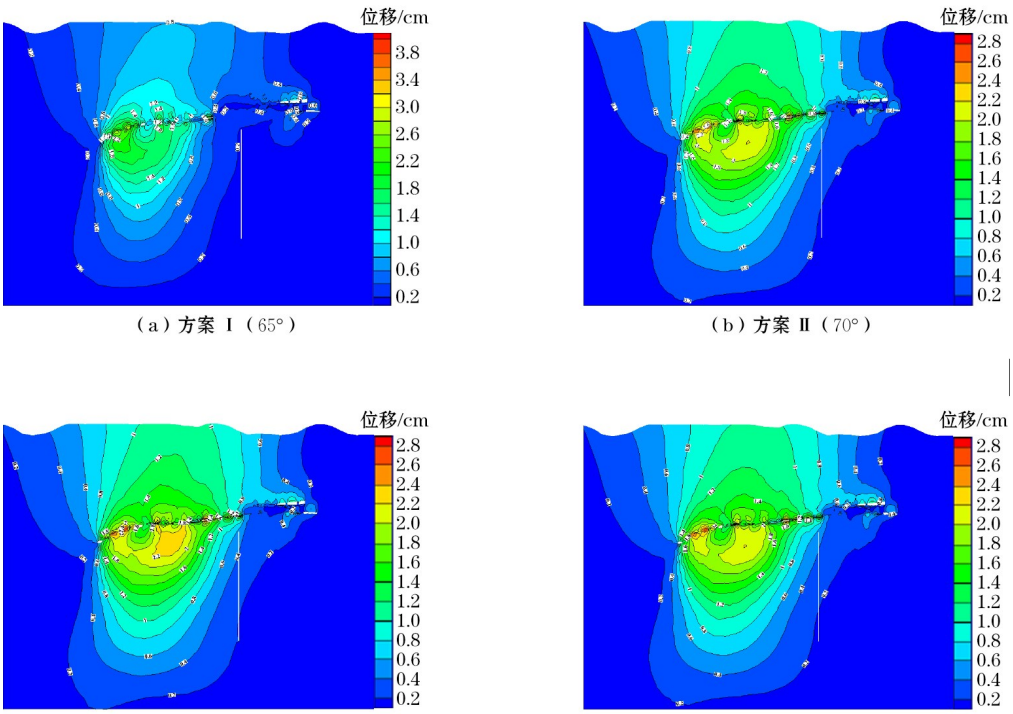


(a) 方案 Ⅰ (65°)　(b) 方案 Ⅱ (70°)

(c) 方案 Ⅲ (75°)　(d) 方案 Ⅳ (80°)

图 6　主竖井监测点的位移情况

Fig.6　Displacement of monitoring points for the main shaft

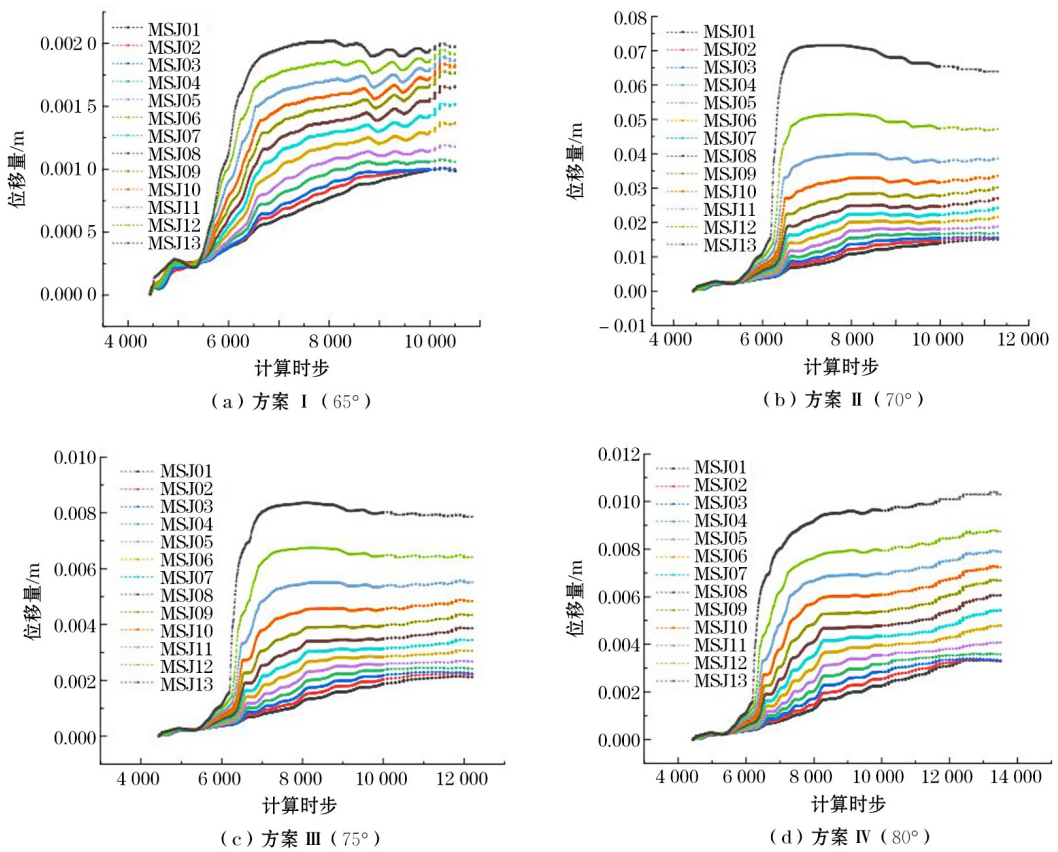


(a) 方案 Ⅰ (65°) (b) 方案 Ⅱ (70°)

(c) 方案 Ⅰ (75°) (d) 方案 Ⅱ (80°)

图 7 盲竖井的位移场分布云图

Fig.7 Cloud maps of displacement field distribution of blind shaft



(a) 方案 Ⅰ (65°) (b) 方案 Ⅱ (70°)

(c) 方案 Ⅲ (75°) (d) 方案 Ⅳ (80°)

图 8 盲竖井监测点位移情况

Fig.8 Displacement of monitoring points for the blind shaft

(1) 主竖井和盲竖井的位移场分布云图显示,4个方案各中段保安矿柱范围以外的采场回采后,因受开采扰动影响,主竖井和盲竖井周边区域矿岩发生了不同程度的变形移动。位移监测结果表明,随着保安矿柱圈定角度和监测点布设深度增大,井壁的变形程度逐步增加,同时,井壁变形增长速率也随着圈定角度增大而逐步加快。

(2) 方案Ⅰ至方案Ⅳ的模型中主竖井位移量分布等值线区间分别为 0.4～0.5 cm、0.6～0.8 cm、0.8～1.0 cm、1.2～1.4 cm,通过计算得出主竖井的水平变形量分布区间分别为 0.8～1.0 mm/m、1.2～1.6 mm/m、1.6～2.0 mm/m、2.4～2.8 mm/m。方案Ⅰ至方案Ⅳ模型中盲竖井位移量分布等值线区间分别为 0.1～0.2 cm、0.6～0.8 cm、0.6～0.8 cm、1.0～1.2 cm,通过计算得出盲竖井的水平变形量分布区间分别为 0.2～0.4 mm/m、1.2～1.6 mm/m、1.2～1.6 mm/m、2.0～2.4 mm/m。依据"三下"采矿设计相关规定可知,井筒的最大允许水平变形量为 2.0 mm/m。依据主竖井和盲竖井监测点所监测的井壁变形数据来看,保安矿柱圈定角度为 65°、70°以及 75°的 3 个模型中位移量未超过 10 mm,即水平变形量未超过 2 mm/m,而 80°的模型中主竖井井壁位移量高达 13 mm,盲竖井井壁位移量接近 11 mm,即水平变形量超过 2 mm/m,超过规范允许值。因此,主竖井和盲竖井保安矿柱圈定角度不宜超过 75°,以免井壁因变形快速增长和变形量过大而引发井筒破坏和失稳。

3.2.4 塑性区分析

13 号脉采场仿真回采过程中主、盲竖井的塑性区分布如图 9 和图 10 所示。

(1) 4 个方案各中段保安矿柱范围之外的采场回采结束后,主竖井和盲竖井周边并未出现塑性区,表明主竖井与盲竖井的整体结构均具有较强的稳定性,不会发生大范围的塑性变形与破坏。

(2) 采场周边区域存在较大范围的塑性破坏区。为了确保主竖井井筒的保安矿柱矿量得以有效释放,并尽可能降低开采过程中的扰动影响,建议采用低扰动采矿方法进行回采作业。特别是靠近井筒区域的采场,必须采取充填法开采,以避免因采场大范围失稳而导致的井筒发生变形,甚至产生破坏和失稳的风险。

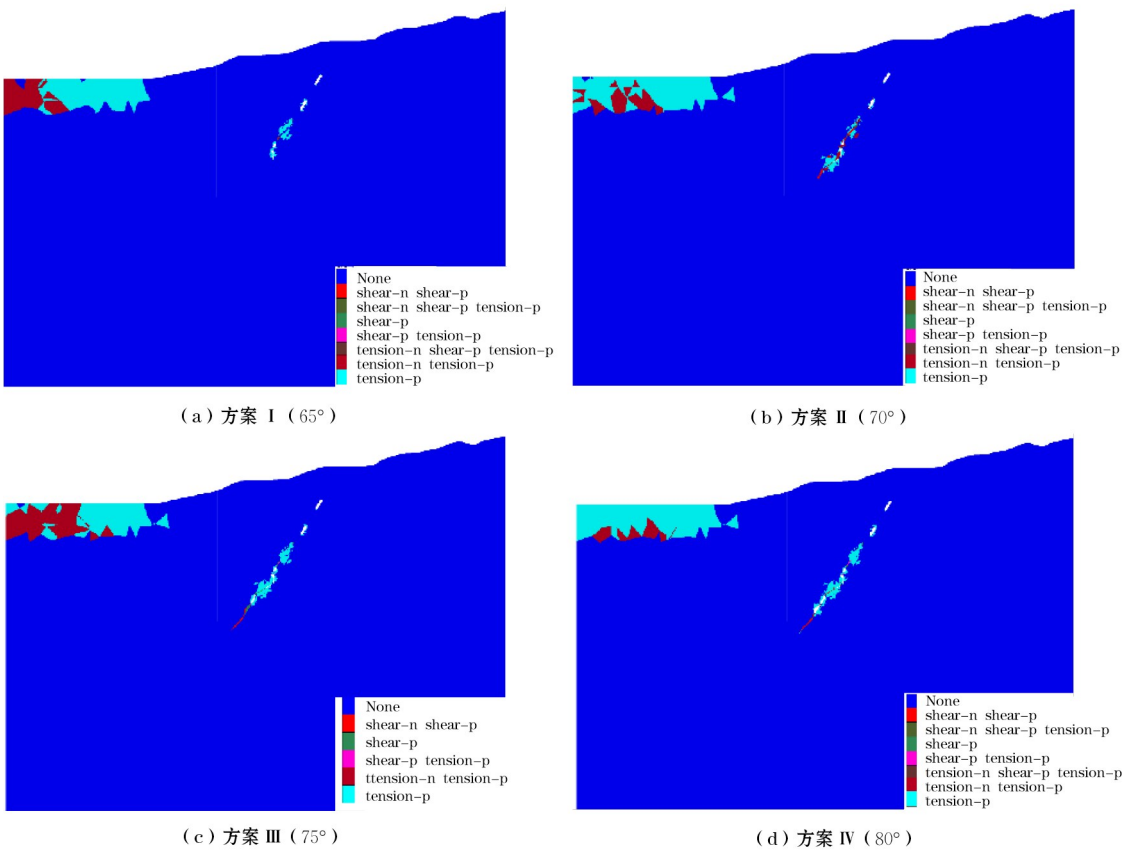


图 9 主竖井塑性区分布云图

Fig.9 Cloud maps of plastic zone distribution of the main shaft

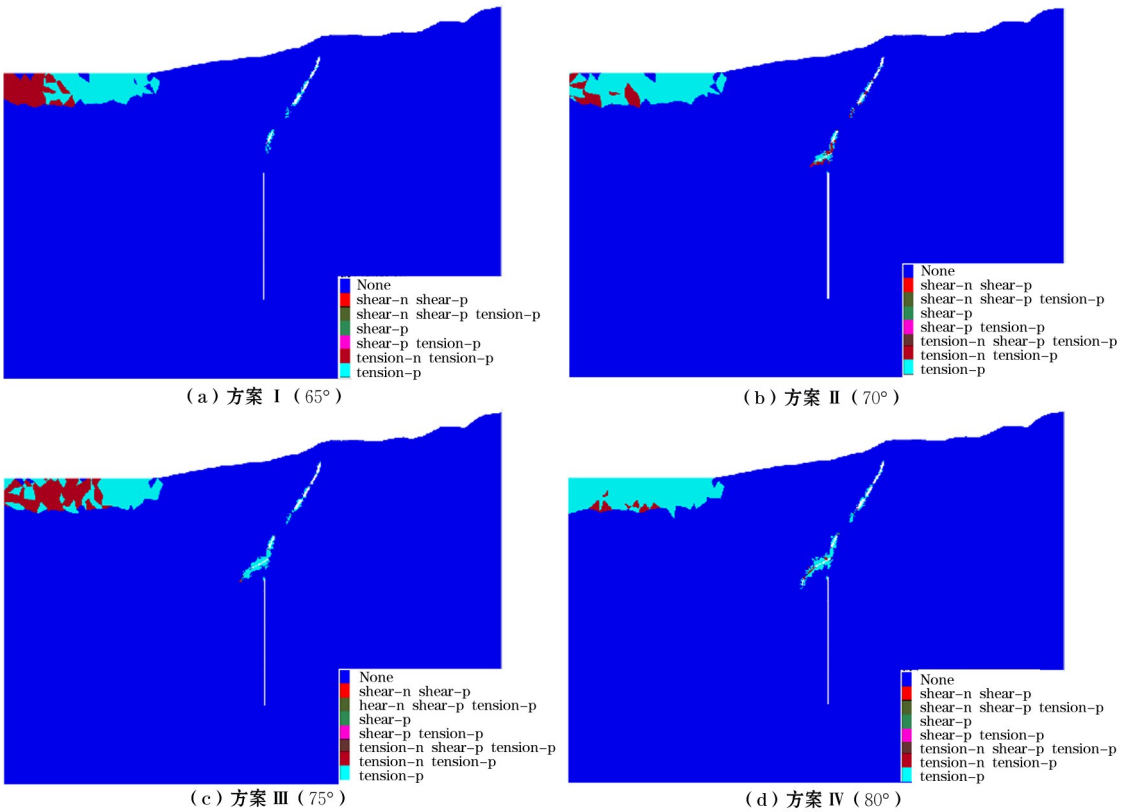


图 10 盲竖井塑性区分布云图

Fig.10 Cloud maps of plastic zone distribution of the blind shaft

4 保安矿柱圈定范围优化后释放的矿量

综合 4 个保安矿柱圈定方案的模拟计算结果,保安矿柱圈定角度最大可优化到 75°。保安矿柱圈定范围优化前后的压覆矿量见表 5。

表 5 保安矿柱圈定范围优化前后的压覆矿量

Table 5 The amount of overlaid ore before and after optimizing the delineation range

圈定角度 65°(原圈定角度)			圈定角度 75°(优化圈定角度)		
中段水平/m	压覆总体积/m^3	压覆矿石量/t	中段水平/m	压覆总体积/m^3	压覆矿石量/t
+218	150 066.7	408 181.3	+218	50 916.7	138 493.3
+268	150 075.0	408 204.0	+268	57 325.0	155 924.0
+318	140 966.7	383 429.3	+318	66 075.0	179 724.0
+368	100 500.0	273 360.0	+368	61 900.0	168 368.0
+418	82 740.0	225 052.8	+418	53 820.0	146 390.4
+458	91 120.0	247 846.4	+458	58 240.0	158 412.8
+498	96 240.0	261 772.8	+498	53 480.0	145 465.6
+538	91 340.0	248 444.8	+538	46 220.0	125 718.4
+578	85 320.0	232 070.4	+578	42 060.0	114 403.2
+618	73 780.0	200 681.6	+618	32 060.0	87 203.2
+658	59 000.0	160 480.0	+658	12 200.0	33 184.0
+698	48 680.0	132 409.6	+698	10 960.0	29 811.2
+738	20 786.7	56 539.7	+738	0.0	0.0
+778	2 340.0	6 364.8	+778	0.0	0.0
+818	0.0	0.0	+818	0.0	0.0
合计	1 192 955.0	3 244 837.6		545 256.7	1 483 098.1

由表 5 可知,按 65°的岩石移角圈定井筒保安矿柱时,压覆矿石体积为 1 192 955.0 m^3,压覆的矿石量为 3 244 837.6 t。对保安矿柱圈定范围按 75°的岩石移角优化后,圈定范围内压覆矿石总体积为 545 256.7 m^3,压覆的矿石量为 1 483 098.1 t,优化后释放了矿石体积647 698.3 m^3,释放的矿石量为 1 761 739.5 t。释放的矿石量占原压覆矿石量的 54.3%。

5 结论

(1) 数值模拟计算结果表明,某金矿的井筒保安矿柱圈定角度由 65°增至 80°时,最大不平衡力峰值由 3.2×10^8 N 跃升至 5.6×10^8 N,增幅达 75%。保安矿柱圈定角度由 65°增大至 75°时,释放的可采矿石量增加 54.3%,同时生产采场数量由 8 个增至 12 个。75°为圈定角度临界值,超过此值时深部中段采场地压活跃度激增。

(2) 保安矿柱圈定角度由 65°增大到 80°时,主竖井最大第一主应力由 21.50 MPa 线性增至 21.84 MPa,盲竖井最大第一主应力由 36.21 MPa 增至

36.26 MPa,但均低于岩体抗压强度(42.5 MPa)。主竖井水平变形量随矿柱圈定角度增大呈指数增长,75°模型达 1.6～2.0 mm/m(接近规范限值 2.0 mm/m),80°模型则增大至 2.4～2.8 mm/m。在 80°模型中,盲竖井变形量达 2.0～2.4 mm/m,超过安全阈值。因此,井筒保安矿柱的圈定角度不宜超过 75°。

(3) 塑性破坏区集中在采场周边,井筒周边未发现塑性区,证明现有支护体系可维护井筒的安全。采用充填采矿法开采近井区域的矿体可降低开采活动对井筒的扰动影响,建议采用胶结充填采矿工艺回采井筒保安矿柱附近的矿体。

(4) 矿柱圈定角度由 65°优化至 75°后,压覆矿石量由 324.5 万 t 降至 148.3 万 t,释放资源量达 176.2 万 t,矿石资源释放率达 54.3%。

参考文献(References):

[1] 郭虎强,周勇,牛聪聪,等.某磷矿断层保安矿柱参数优化研究[J].采矿技术,2024,24(6):152-158.
GUO Huqiang, ZHOU Yong, NIU Congcong, et al. Research on parameter optimization of fault safety pillar in a phosphate mine[J]. Mining Technology, 2024, 24(6): 152-158.

[2] 江文武,廖俊钰,钟海,等.多因素影响复杂空区群下残留矿柱回收模拟研究[J].金属矿山,2024(6):71-78.
JIANG Wenwu, LIAO Junyu, ZHONG Hai, et al. Simulation study on the recovery of residual ore pillars under a complex mining cavity cluster influenced by multiple factors[J]. Metal Mine,2024(6):71-78.

[3] 廖俊钰.某矿山保安矿柱回收方案与地压活动规律研究[D].赣州:江西理工大学,2024.
LIAO Junyu. Study on the recovery program of security pillar and the pattern of ground pressure activity in a mine[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2024.

[4] 刘智权,李鹏程,孙丽军,等.基于岩体质量的井筒保安矿柱优化与应用[J].现代矿业,2024,40(4):84-87.
LIU Zhiquan, LI Pengcheng, SUN Lijun, et al. Optimization and application of shaft safety pillar based on rock mass quality[J]. Modern Mining,2024,40(4):84-87.

[5] 刘小春,张小瑞,刘博.三鑫金铜矿保安矿柱回收合理充填体强度研究[J].黄金,2024,45(4):13-17.
LIU Xiaochun, ZHANG Xiaorui, LIU Bo. Research on the reasonable filling body strength for the recovery of security ore pillars in Sanxin Gold Copper Mine[J]. Gold,2024,45(4):13-17.

[6] 王庆祥,何环莎,刘冬生,等.分段式风井井筒保安矿柱优化研究[J].采矿技术,2023,23(6):152-156.
WANG Qinxiang, HE Huansha, LIU Dongsheng, et al. Research on optimization of safety pillar for a segmented air shaft[J]. Mining Technology,2023,23(6):152-156.

[7] 刘海林,李鹏程,王雨波.硬岩矿床组合型井筒保安矿柱圈定与压覆资源回采技术[J].金属矿山,2023(7):168-175.
LIU Hailin, LI Pengcheng, WANG Yubo. Delineation of safety pillars and overlying resource recovery technique in combined type shafts of hard rock deposits[J]. Metal Mine, 2023(7):168-175.

[8] 徐浩.尖山地下矿保安矿柱协同开采技术研究[D].长沙:中南大学,2023.
XU Hao. Collaborative mining technology research on security pillars in Jianshan underground mine[D]. Changsha:Central South University,2023.

[9] 杨清平,陈志强,王红心.基于 FLAC3D 的谦比希铜矿盘区保安矿柱稳定性分析[J].中国矿山工程,2022,51(1):12-16.
YANG Qingping, CHEN Zhiqiang, WANG Hongxin. Stability analysis of safety pillar in Chambishi copper mine panel based on FLAC^{3D}[J]. China Mine Engineering,2022,51(1):12-16.

[10] 雷高,帅金山,胡勇,等.三鑫金铜矿临时保安矿柱回采方法选择与应用[J].黄金,2022,43(2):44-50.
LEI Gao, SHUAI Jinshan, HU Yong, et al. Selection and application of the methods for temporary security pillars extraction in Sanxin Gold Copper Mine[J]. Gold,2022,43(2):44-50.

[11] 吴振雨,王靖,刘培正,等.山东某铁矿保安矿柱开采对地表构筑物的影响分析[J].现代矿业,2022,38(2):207-211.
WU Zhenyu, WANG Jing, LIU Peizheng, et al. Analysis on the influence of security pillar mining on surface structures of an iron mine in Shandong Province[J]. Modern Mining,2022,38(2):207-211.

[12] 张飞,王昊,郝勇浙.鑫达金矿竖井保安矿柱圈定及稳定性分析[J].采矿技术,2021,21(5):52-56+60.
ZHANG Fei, WANG Hao, HAO Yongzhe. Delineation and stability analysis of safety pillar for the vertial shaft in Xinda Gold Mine[J]. Mining Technology,2021,21(5):52-56+60.

[13] 盛佳,万文,江飞飞,等.基于 AHP-3DEC 的井筒保安矿柱稳定性综合评价[J].矿业研究与开发,2021,41(5):28-33.
SHENG Jia, WAN Wen, JIANG Feifei, et al. Comprehensive evaluation on stability of shaft safety pillar based on AHP-3DEC[J]. Mining Research and Development,2021,41(5):28-33.

[14] 黄小红,贺巍,曹伟.锡矿山南矿保安矿柱锌厂区域近地表安全回采研究与应用[J].中国矿山工程,2021,50(1):9-11.
HUANG Xiaohong, HE Wei, CAO Wei. Research and application of near surface safe mining in zinc plant area of security pillar in Xikuangshan south mine[J]. China Mine Engineering,2021,50(1):9-11.

[15] 王刘宝.大冶铁矿龙洞保安矿柱充填开采方案及隔离间柱合理尺寸研究[D].武汉:武汉科技大学,2020.
WANG Liubao. Study on filling mining scheme and reasonable size of isolation pillar in Longdong security mine of Daye Iron Mine[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology,2020.

[16] 张超,宋卫东,付建新,等.充填法开采井筒保安矿柱圈定及回采优化模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(1):136-145.
ZHANG Chao, SONG Weidong, FU Jianxin, et al. Shaft safety pillar delineation and optimization simulation of filling mining method [J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2022,39(1):136-145.

[17] 郭琪,马驰,陈阳."三下"开采井筒保安矿柱优化及地表变形模拟分析[J].矿业研究与开发,2020,40(6):113-117.
GUO Qi, MA Chi, CHEN Yang. Optimization on shaft safety pillar and numerical simulation on surface deformation in "three under" mining [J]. Mining Research and Development,2020,40(6):113-117.

[18] 池秀文,吕占胜,张文举,等.充填开采安全深度与保安矿柱圈定研究[J].中国矿业,2018,27(12):134-139+156.
CHI Xiuwen, LYU Zhansheng, ZHANG Wenju, et al. Research on safety depth of filling mining and delineation of safety pillar[J]. China Mining Magazine,2018,27(12):134-139+156.