三角矿带存窿矿回采顺序优化及协同处理方案研究*

王亚军[1,2],陈寅[3],许龙[4],李泽鹏[1,2],何涛[4],刘金海[3],刘东锐[1,2],马如成[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:针对某银铅锌矿三角矿带存窿矿体回采会导致大面积的地表塌陷等难题,基于现场工程地质条件,提出了两组整体回采规划方案,即预先处理空区存窿矿区域后回采矿体方案和先采矿体后处理空区存窿矿区域方案,并利用CAD-3Dmine-MIDAS联合构建了地质模型,进而采用数值模拟方法比选两组规划方案对应模型各回采阶段应力场、位移场及塑性区分布情况,结果表明,规划方案Ⅰ更有利于回采作业过程中的采场和存窿矿区域地压及稳定性控制,减少资源浪费。根据数值模拟结果和开采技术条件,提出了先筑假顶(底)、底部协同回采方案,确定了人工假顶(底)的构筑方案,结合随机森林算法构建人工假顶顶板沉降量预测模型,持续保障区域内存窿矿石回采的安全。工业试验结果表明,存窿矿的回采率达到80%以上,创造约500万元的利润。

关键词:存窿矿;回采顺序;人工假顶;随机森林算法

中图分类号:TD853 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)04-0034-09

Research on Mining Sequence Optimization and Coordinated Treatment Scheme for Hung-Up Ore in Triangular Ore Belt

WANG Yajun[1,2], *CHEN Yin*[3], *XU Long*[4], *LI Zepeng*[1,2], *HE Tao*[4], *LIU Jinhai*[3], *LIU Dongrui*[1,2], *MA Rucheng*[3]

(1.Changsha Mining Research Institute 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 challenges such as potential large-scale surface subsidence caused by mining the hung-up orebody in the triangular ore belt of a certain silver-lead-zinc mine, two overall mining sequence plans were proposed based on the site engineering geological conditions. Plan I involves treating the goaf and hung-up ore zone prior to ore extraction, while Plan II involves extracting the ore first followed by treatment of the goaf and hung-up ore zone. A geological model was constructed by combining CAD, 3DMine, and MIDAS, and numerical simulation was subsequently employed to compare the distributions of the stress field, displacement field, and plastic zone at various mining stages for these two plans. The results indicate that Plan I is more favorable for controlling ground pressure and ensuring stability in both the stope and the hung-up ore zone during mining operations, while also reducing resource wastage. Based on the numerical simulation results and mining technical conditions, a coordinated mining scheme involving the initial construction of an artificial false roof (and floor) followed by extraction from the bottom was proposed, and the construction scheme for the artificial false roof (and floor) was determined. A prediction model for the settlement of the artificial false roof was developed using the random forest algorithm to continuously ensure the safety of hung-up ore extraction in the area. The results of the industrial-scale trial show that the extraction rate of the hung-up ore exceeds 80%, generating approximately 5 million yuan in profit.

Key words: Hung-up ore, Mining sequence, Artificial false roof, Random forest algorithm

0 引言

某银铅锌矿历史采用浅孔留矿法进行回采,在现有三角矿带矿体附近,遗留了大量空区,且有相当部分的空区已与地表贯通,形成“天窗”,面积为1 393.29 m^2。经过多年塌陷,地表已趋于稳定,空

* **收稿日期**:2025-04-25
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

区内部高品位存窿矿石预估有 4 万～5 万 t。若直接放出将导致大面积的地表塌陷[1-2]。因此,为保证矿山安全生产和持续稳定发展,亟需研究三角矿带存窿矿回采顺序及处理措施。

针对存窿矿回采顺序及处理措施,国内外学者做了大量研究。孙健等[3]、任凤玉等[4]针对金属矿前期开采遗留的存窿矿,对回采顺序、回采工艺及采切工程做出了合理分析与布置。蔡汉玉等[5]、徐新木等[6]采用数值模拟对存窿矿回采顺序进行优选,且给出了分区回采、即时充填的回采方案。周玉成等[7]、彭晨鑫等[8]、胡胜等[9]借助薄板理论,得到了最佳人工假顶厚度与强度的计算公式。史秀志等[10]针对某铅锌矿采用的高强度加筋充填体假顶,分别对矿房采场和间柱采场下假顶的受力情况进行分析,并采用薄板理论分析确定充填体假顶厚度,最终得出充填体假顶的最优厚度。胡世利等[11]、赵增山等[12]基于关键层理论,提出构筑人工假顶进行存窿矿的回采,结合数值模拟,确定了人工假顶的厚度及强度。吴畅等[13]通过安全系数法计算出承载层所需 C30 混凝土或尾砂胶结体厚度,对下向构筑工艺及施工步骤进行了介绍,并在试验采场进行了现场应用。刘超等[14]为探究爆破对采场人工假顶稳定性的影响,采用 LS-DYNA 动态分析软件,计算分析了中深孔爆破对 4.75 m 厚的人工假顶的扰动破坏影响。HAN Bin 等[15]为了合理准确地确定 CPB 顶板所需的强度,提出了基于传感器的现场测量,并在金川矿进行了现场测量,然后推导出基于厚板理论的公式来验证测量结果。ZHAO Ziyue 等[16]采用三点弯曲和数字图像相关(DIC)技术等试验手段,探讨了不同层高下具有不同水泥/尾矿质量比的 3D 人工假顶试件的弯曲特性。目前,针对存窿矿回采顺序的研究多集中在对常见工程地质特征下回采顺序的研究,而对处于近破碎带区域条件下整体回采顺序的研究较少。因此,需针对复杂条件下存窿矿安全高效回采展开深入研究,以填补现有研究空白。

本文采用 MIDAS-FLAC3D 耦合建立了三角矿带模型,结合开采现状,对存窿矿回采顺序进行了系统研究。通过分析不同回采顺序条件下应力场、位移场及塑性区分布特征,明确存窿矿回采顺序。此外,依据数值计算结果与开采技术条件,提出了先筑假顶(底)、底部协同回采方案。该研究不仅为实现矿区安全开采提供重要技术支撑,也为类似矿区的存窿矿回采提供了新的技术思路。

1 工程地质概况

某银铅锌矿为地下开采,矿区内有 40 条矿体,分为 3 个采区进行开采,研究区域一采区主采矿体有Ⅱ$_2$和Ⅱ$_{2①}$号矿体,矿体走向约为 322°,倾向约为 52°,倾角约为 64°,矿体厚度为 0.58～28.55 m,平均厚度为 10.28 m,属于薄至厚大的急倾斜矿体。平均品位为 Pb 0.15%、Zn 0.50%、Ag 14 g/t,初步预估矿量有 60 万～70 万 t,赋存标高为 825～915 m。矿体围岩单一,均为寿山沟组一段(P_1s^2)变质长石砂岩,岩石呈灰色、灰黑色,矿体形态平面图如图 1 所示。

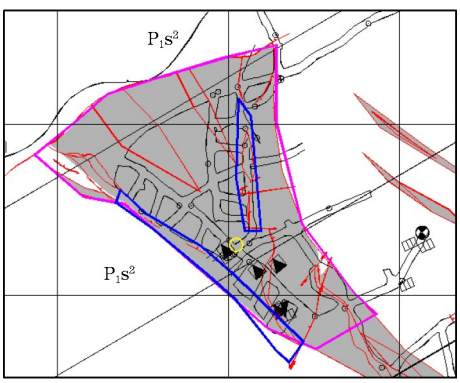


图 1 矿体形态平面图

Fig.1 Plan view of orebody morphology

根据矿体的赋存条件及矿山实际情况,仍沿用地下开采方式,采矿方法选用浅孔留矿嗣后充填采矿法、分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿法,全尾砂胶结充填处理采空区。研究区域内水文及工程地质条件相对简单,大部分地段的围岩稳定性中等至良好,多数工程无需进行支护。

2 三角矿带采场回采顺序优化

三角矿带的回采顺序关乎整个回采过程的安全,为实现资源的最大回采率,确定三角矿带的回采顺序至关重要。

2.1 开采规划方案

为了保证回采过程的安全,实现资源的最大回采率,将三角矿带整个划分为 3 个开采区域,即正常开采区域、空区存窿矿及保安矿柱区域、近上盘破碎带区域,见图 2。综合矿山赋存特征及实际情况,提出两种开采规划。

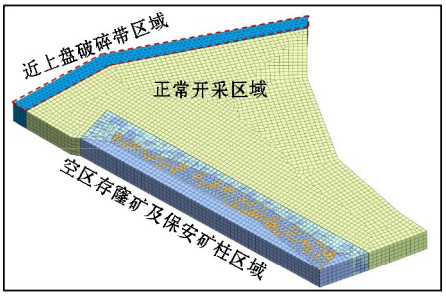


图 2 885 m 中段三角矿带整体开采区域划分

Fig.2 Division of the overall mining area of the triangular ore belt at the 885 m level

规划Ⅰ:处理空区存窿矿区域(处理方式见存窿矿体协同空区处理方案),同时布置正常回采区域采切工程,待空区存窿矿处理后,即进行回采正常未扰动区域。

规划Ⅱ:在空区存窿矿区域与正常未扰动回采区域之间预留保安矿柱,首先对正常扰动区域进行回采,后进行空区存窿矿区域的处理,最后进行保安矿柱的回采。

2.2 数值计算模型建立

本次研究设计采场位于某矿一采区 825～915 m 水平。回采后,采场周边应力状态将发生显著变化,但这种变化的影响范围实际上只限于附近的 3～5 倍局部区域,根据开挖范围的尺寸关系合理确定模型尺寸。采用 AutoCAD、3Dmine 及 MIDAS GTS NX 联合构建地质模型,建立的地质模型如图 3 所示,模型尺寸为 400 m×400 m×300 m,采空区及其周边矿体单元尺寸为 1 m,围岩单元尺寸为 8 m,共计 1 084 320 个单元块体。具体岩体力学参数见表 1。

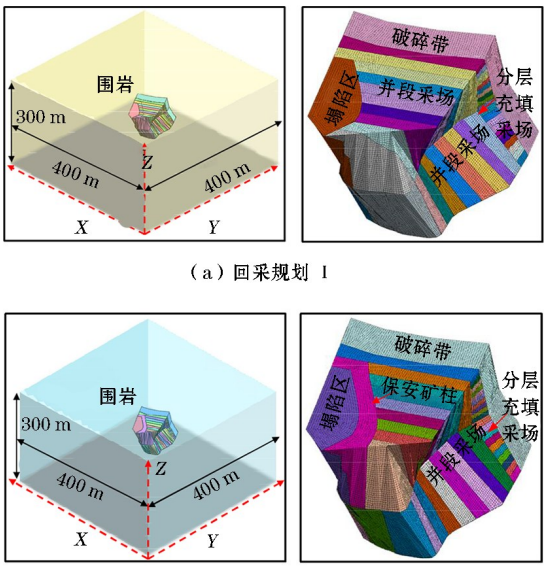


图 3 不同回采规划的数值模型

Fig.3 Numerical models for different mining sequences

表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock mass

岩性	容重/(kN/m³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
破碎带	28.50	4.50	4.10	0.20	0.15	2.81	40.35
围岩	28.50	4.50	4.10	0.19	0.15	2.62	39.03
存窿矿区域	28.50	4.50	4.10	0.18	0.15	2.45	35.21
矿体	28.10	6.09	6.67	0.21	0.27	4.20	43.74

2.3 回采步骤

因回采规划存在差异,两组回采方案的详细计算方案见表 2。

表 2 回采模拟计算方案

Table 2 Numerical simulation schemes for mining

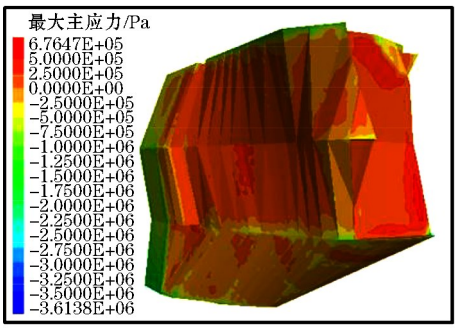
计算步骤	规划方案Ⅰ	规划方案Ⅱ
1	初始平衡计算	初始平衡计算
2	855～915 m 存窿矿区域矿体出矿与充填	825 m 中段近破碎带矿体分层采场回采与充填
3	825 m 中段近破碎带矿体分层采场回采与充填	825 m 中段阶段深孔一步骤采场回采与充填
4	825 m 中段阶段深孔一步骤采场回采与充填	825 m 中段阶段深孔二步骤采场回采与充填
5	825 m 中段阶段深孔二步骤采场回采与充填	855 m、885 m 中段近破碎带矿体分层采场回采与充填
6	855 m、885 m 中段近破碎带矿体分层采场回采与充填	855 m、885 m 中段并段深孔一步骤采场回采与充填
7	855 m、885 m 中段并段深孔一步骤采场回采与充填	855 m、885 m 中段并段深孔二步骤采场回采与充填
8	855 m、885 m 中段并段深孔二步骤采场回采与充填	855～915 m 存窿矿区域矿体出矿与充填
9	—	855～915 m 存窿矿区域保安矿柱回采与充填

3 三角矿带采场回采数值模拟结果分析

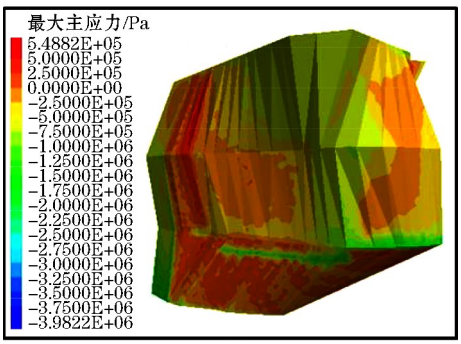
两组规划方案对应模型采场全部采充完毕后,选取 855～915 m 水平并段深孔一、二步骤采场回采结果,以三角矿带及破碎带的应力场、位移场和塑性区分布特征为定量指标,开展对比分析。

3.1 最大主应力特征

三角矿带及破碎带围岩的最大主应力分布云图见图 4、图 5。规划方案Ⅰ和规划方案Ⅱ对应模型的最大主应力分布见表 3。



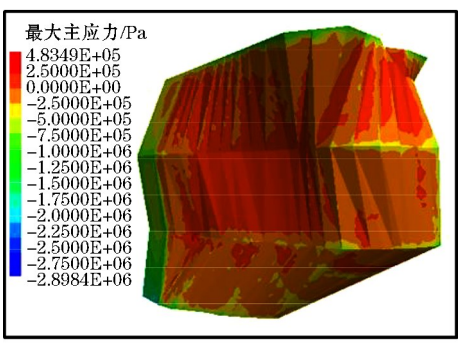
（a）规划方案Ⅰ



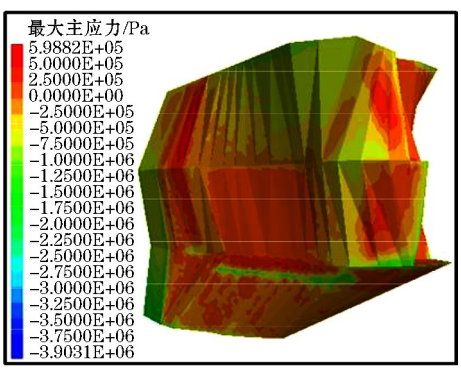
（b）规划方案Ⅱ

图 4　一步骤回采后最大主应力云图

Fig.4　Maximum principal stress contours after primary mining



（a）规划方案Ⅰ



（b）规划方案Ⅱ

图 5　二步骤回采后最大主应力云图

Fig.5　Maximum principal stress contours after secondary mining

表 3　采场回采后最大主应力分布

Table 3　Distribution of maximum principal stress after stope excavation　MPa

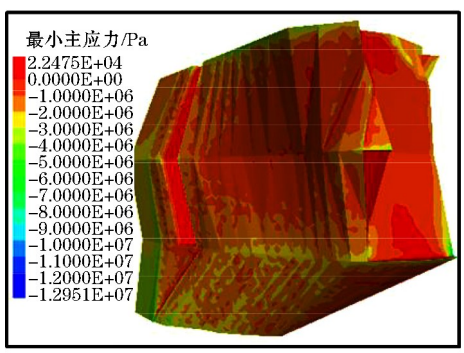
规划方案	一步骤采场回采最大主应力	二步骤采场回采最大主应力
Ⅰ	−3.61～0.68	−3.98～0.55
Ⅱ	−2.90～0.48	−3.90～0.60

依据最大主应力分布云图和应力分布范围可以看出，二步骤采场开挖后，方案Ⅱ顶底板拉应力集聚程度较方案Ⅰ更高，表明保安矿柱可能在采场回采作业和存窿矿区域双重作用下发生变形破坏，承载能力减弱，导致开挖采场顶板拉应力集聚程度大幅增长。两组模型的拉应力极大值均小于矿体的抗拉强度，表明采场顶板不会产生大范围的拉伸破坏。

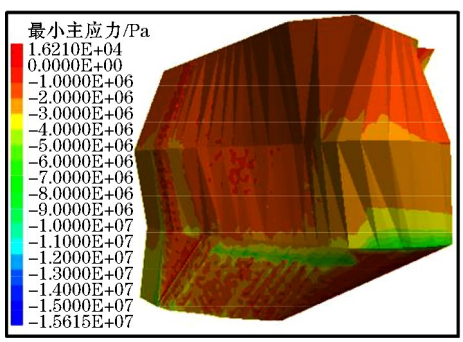
3.2　最小主应力特征

三角矿带及破碎带围岩的最小主应力分布云图如图 6、图 7 所示，规划方案Ⅰ和规划方案Ⅱ对应模型的最小主应力分布见表 4。

依据最小主应力分布云图和应力分布范围可以看出，一步骤采场开挖后，规划方案Ⅰ压应力集聚程度略高于规划方案Ⅱ。



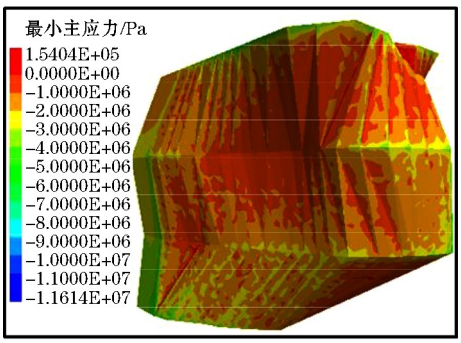
（a）规划方案Ⅰ



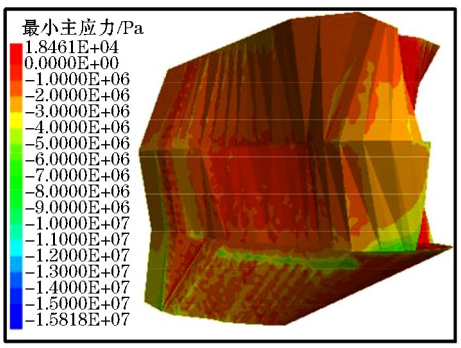
（b）规划方案Ⅱ

图 6　一步骤回采后最小主应力云图

Fig.6　Minimum principal stress contours after primary mining



(a) 规划方案Ⅰ



(b) 规划方案Ⅱ

图 7 二步骤回采后最小主应力云图

Fig.7 Minimum principal stress contours after secondary mining

表 4 采场回采后最小主应力分布

Table 4 Distribution of minimum principal stress after stope excavation kPa

规划方案	一步骤采场回采 最小主应力	二步骤采场回采 最小主应力
Ⅰ	−12 951.00～22.48	−15 615.00～16.21
Ⅱ	−11 614.00～0.15	−15 818.00～18.46

结合现场实际来看,存窿矿区域经出矿和充填后有利于高应力往这部分区域转移,从而降低了开挖采场的压应力集聚程度。二步骤采场开挖后,两组方案压应力集聚程度均出现增长,但显然方案Ⅱ增长幅度较大,同样说明此时预留保安矿柱发生破坏从而减弱了承载能力,导致回采区周边压应力大幅增长。

综上所述,最小主应力分析结果同样表明,规划方案Ⅱ更有利于 855～915 m 水平并段深孔一步骤采场回采后地压控制与管理,规划方案Ⅰ则更有利于二步骤采场回采后的地压管控。同时考虑到原岩矿体支撑能力强于充填体及保安矿柱的稳定性情况,因而从整体上来说,规划方案Ⅰ回采三角矿带并段深孔采场更为有利。

3.3 位移量特征

三角矿带及破碎带围岩的总位移量见图 8。依据总位移量分布云图和位移量分布范围可以看出,两组方案大位移量显现区均集中在与分层采场或 825 m 中段阶段深孔采场邻近的空区底板或侧帮。方案Ⅰ模型二步骤采场开挖后,位移量增大,这与一步骤充填体采场支撑能力不如原岩矿体相关。从一步骤、二步骤总位移增长幅度来看,方案Ⅱ同样受保安矿柱破坏情况影响,位移量增长幅度相对较大。

总体上来看,规划方案Ⅰ模型采场的总位移量与方案Ⅱ相差不大,且依据容许极限位移量判据可知,采场顶板的最大下沉或底鼓量在 5 cm 以内,岩体能够保持稳定,因此,仅从位移量来判断,两组方案对应模型在进行并段深孔回采过程中均能够保持稳定。

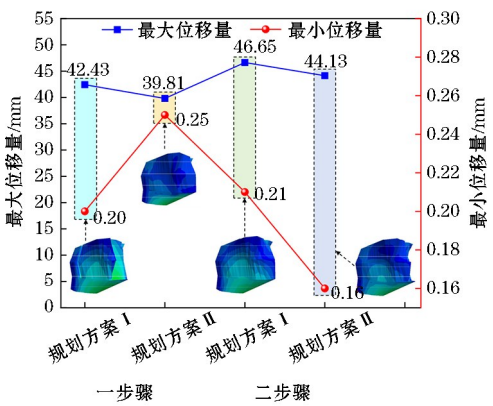


图 8 一步骤、二步骤回采后位移量

Fig.8 Displacement after primary and secondary mining

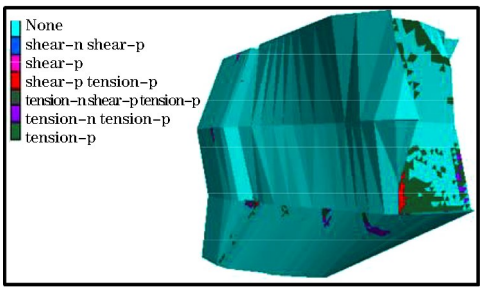
3.4 塑性区特征

三角矿带及破碎带围岩的塑性区云图见图 9、图 10。两组方案矿岩或充填体均发生了一定程度的塑性破坏。其中,方案Ⅰ塑性变形与破坏位置主要集中在存窿矿充填区域,如图 11 所示。

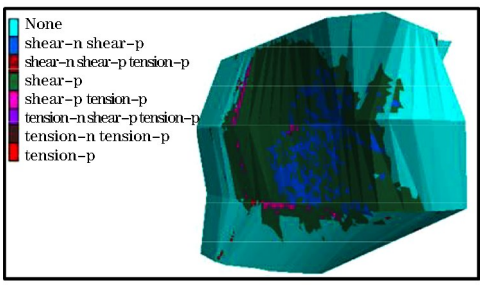
依据塑性区体积分布可以看出,825 m 中段阶段深孔采场回采对存窿矿充填区域的影响程度不大。855～915 m 水平并段深孔一步骤回采后,二步骤矿岩承受主要支承压力,存窿矿充填区域的塑性区体积相对开采前出现大幅增长,但整体规模较小。二步骤开采后,一步骤充填体为主要承载区,但因其承载能力较弱,导致应力往采场周边区域转移,致使存窿矿充填区域塑性区体积进一步增大,相对一步骤开挖增长幅度超过 100%,然而,由于存窿矿充填

区域承载能力同样不高，应力进一步往岩层深处转移，塑性区体积量同样不高。

在一步骤、二步骤采场回采后，规划方案Ⅱ模型塑性变形与破坏位置主要集中在 10 m 保安矿柱底部区域，见图 12。



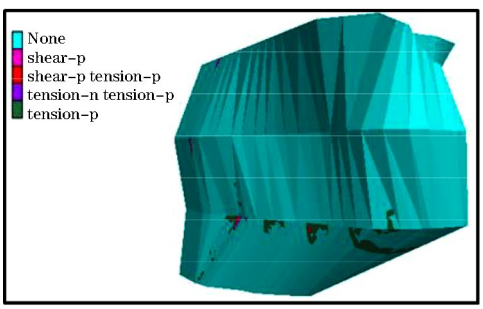
（a）规划方案Ⅰ



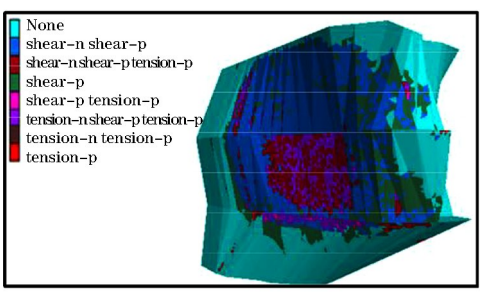
（b）规划方案Ⅱ

图 9　一步骤回采后塑性区分布

Fig.9　Distribution of plastic zone after primary mining



（a）规划方案Ⅰ



（b）规划方案Ⅱ

图 10　二步骤回采后塑性区分布

Fig.10　Distribution of plastic zone after secondary mining

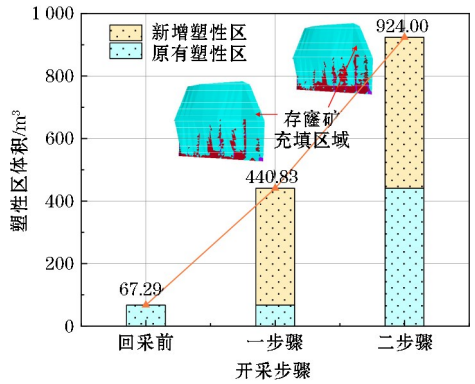


图 11　存窿矿充填区域塑性区体积

Fig.11　Plastic zone volume in the filling area of the hung-up ore

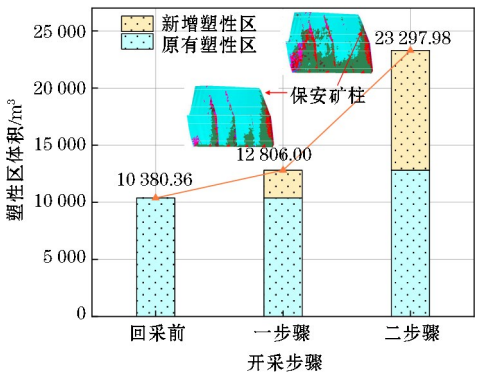


图 12　保安矿柱塑性区体积

Fig.12　Plastic zone volume of the safety pillar

经命令流计算与统计，得到了保安矿柱在并段深孔回采前、一步骤、二步骤回采后的塑性区体积。

依据塑性区体积分布可以看出，855～915 m 水平分层采场回采对存窿矿充填区域的影响程度较大，导致在 855～915 m 水平并段深孔采场回采前保安矿柱已经发生较大区域的塑性破坏。通过塑性区主要集聚位置可以看出，保安矿柱靠近分层采场部分介于存窿矿区域和分层采场之间，该区域承载能力弱，分层采场开挖后这部分保安矿柱为主要承载区，压应力集聚明显，进而导致塑性破坏严重。

855～915 m 水平并段深孔一步骤回采后，二步骤矿岩支承能力较大，承担主要支承压力，保安矿柱承受部分支撑压力，因而整个保安矿柱的塑性区增长幅度不大(2 425.64 m^3)。进入二步骤回采后，一步骤充填体为主要承载区，但因其承载能力较弱，致使应力往采场周边区域转移，保安矿柱承受大部分支承压力，最终导致保安矿柱塑性破坏程度加剧，塑性区体积增长幅度超过 80%，甚至部分区域发生塑

性贯通。此外,后期存窿矿区域出矿所产生的爆破扰动与应力重分布,将进一步加剧保安矿柱的破坏程度。保安矿柱内部塑性区扩展至贯通时,将形成连续软弱带,破坏矿柱整体性,使其从“连续支撑体”退化为“碎裂结构体”。矿柱失效后,上覆岩层失去关键支撑点,顶板荷载通过悬臂梁效应向采场边界转移。若边界围岩强度不足,可能引发顶板下沉、冒落,甚至诱发连锁性垮塌。

因此,上述分析结果表明,依据规划方案Ⅰ回采855～915 m水平并段深孔采场,整个采场以及存窿矿充填区域的塑性破坏程度较轻,而采用规划方案Ⅱ回采855～915 m水平并段深孔采场,保安矿柱塑性破坏程度剧烈,将导致保安矿柱难以回采,同时影响存窿矿区域矿体出矿,造成矿产资源浪费。故选择规划方案Ⅰ。

3.5 三角矿带存窿矿协同处理方案

三角矿带存窿矿为浅孔留矿法回采遗留的空场,未作处理,导致上部矿体塌落直至地表,内部积存高品位的矿石。若由855 m中段开始放矿,则会导致地表进一步塌陷;但若不对该部分进行处理,则会造成矿产资源的浪费及相应的经济损失。

图13为存窿矿体回采处理方案。首先,在+945 m水平构筑人工假顶(底),阻断地表与井下的联系,对855～915 m区段采用并段深孔回采,回采时利用存窿矿作为补偿空间,不做切割天井等切割工程,同正常矿体进行协同回采。

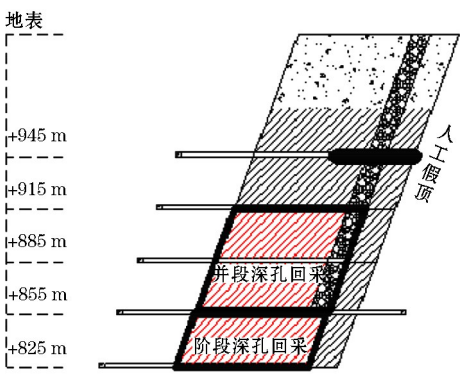


图13 存窿矿体回采处理方案

Fig.13 Mining treatment scheme for the hung-up orebody

4 人工假顶(底)构筑及顶板沉降量预测

三角矿带区域内岩体结构复杂,完整性相对较差,加之仍有空场法遗留空区未处理,地应力变化对855～915 m影响大,亟需一种科学合理、稳定可靠的方法评价并判断所构筑假顶的可靠程度,以确保假顶下施工作业的安全性。

针对设计采场的结构特征,在关键区域布设位移监测点,监测人工假顶的顶板沉降情况。结合随机森林算法对复杂问题表现出的非线性收敛度高、数据捕捉速度快、预测精度高的特点,构建人工假顶顶板沉降量预测模型,持续保障区域内存窿矿石回采的安全。

影响采场顶板沉降的因素众多,且因素间呈互相关联、互相交叉、定量判断困难等特征。综合国内外相关文献,选取易操作、客观性强、影响占比高的5个主要因素:岩体完整性(Q_1)、人工假顶抗拉强度(Q_2)、区域内水文地质评价(Q_3)、矿体埋深(Q_4)及采场顶板暴露面积(Q_5)。其中,岩体完整性以地质调查的RQD值为评价参考。水文地质评价因缺乏定量指标,采用定性分析为主,通过赋值打分方式进行相应评价,由好至极差,共4个区间,赋值分别为4,3,2,1。

矿山位移监测受限于传感器部署成本、地质活动周期性和监测技术,连续高频采样难以实现,采用小样本训练预测的方式进行存窿矿石回采采场顶板预测,共选取了38个代表性样本,已覆盖典型工况,满足国际岩石力学学会建议岩土工程小样本研究样本量最低下限为30的要求。其中,31个样本作为随机森林模型的训练,剩余7个模型进行预测,预测结果见表5。

表5 人工假顶顶板沉降样本预测结果

Table 5 Prediction results of artificial roof settlement samples

样本序号	主要影响因素					沉降量	
	Q_1/%	Q_2/MPa	Q_3	Q_4/m	Q_5/m^2	预测值/mm	真实值/mm
1	55	3.2	3	825	120	3.9	4.3
2	45	3.8	3	825	90	6.2	5.7
3	60	2.7	2	915	160	3.5	4.8
4	57	3.0	4	825	100	1.5	2.8
5	38	4.0	4	825	90	8.3	7.9
6	68	3.2	2	915	130	5.6	3.4
7	75	3.0	2	825	160	2.3	2.1

通过顶板沉降量的预测(见图14)可知,所构建的随机森林预测模型可以很好地预测人工假顶的顶板沉降情况,7个预测样本中,仅第6个样本预测结果与实际结果偏差较大,准确率为85.7%。随着布设监测点的增加,监测数据的丰富,未来所构建的随机森林预测模型可以更好地应用到矿山的生产管理

中，以更好地指导现场技术员管理人工假顶顶板，为三角矿带存窿矿的回采提供更为有效的指导工具。

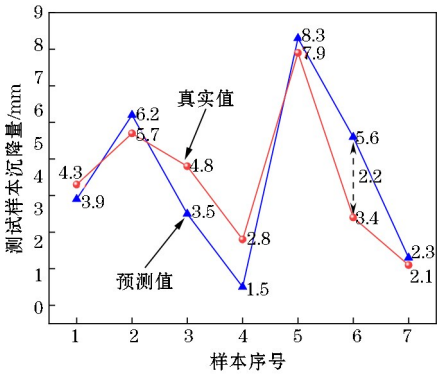


图 14　样本预测对比

Fig.14　Comparison of sample predictions

在 945 m 水平，施工联巷至空区处，沿空区长轴向掘进联巷。在联巷内距空区 5～10 m 处，采用潜孔锤钻机进行跟管钻进，钢管间距为 0.4～0.6 m，跟管选用 Φ108 mm 的钢花管，5 mm 厚，钻有 Φ15 mm 的注浆孔，孔间距为 30～40 cm，呈梅花形布置。钻杆穿过存窿岩(土)体，钻进后钢管不拔出，直接进行注浆作业。浆液采用水泥浆液，水灰比为 0.6∶1～1∶1，注浆压力为 0.6～2.0 MPa，形成人工假顶，保证上部第四系土体不会随着放矿持续垮落，待形成人工假顶后，在 885 m 水平出矿巷进行大规模出矿。出矿结束后，由 945 m 水平联巷施工下向充填钻孔，将空区进行胶结充填，以防止其对其他采矿区域的影响。

5　现场工业试验

人工假顶构筑后存窿矿回采期间，通过布置测点监测人工假顶的累计沉降量和沉降速率。图 15 为人工假顶 1 a 内的月度监测数据。

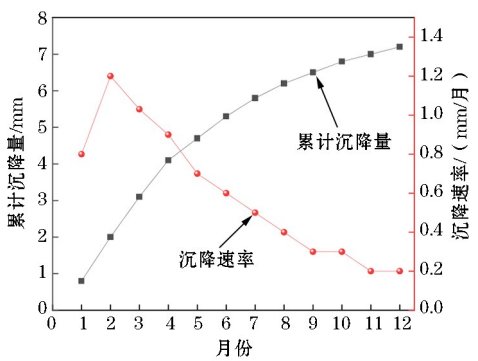


图 15　人工假顶沉降量月度监测数据

Fig.15　Monthly monitoring data of artificial roof settlement

由图 15 可知，受注浆体固结收缩和爆破动载影响，1—3 月人工假顶月均沉降速率为 1.01 mm/月，处于初期加速阶段；4—6 月人工假顶月均沉降速率为 0.73 mm/月，处于中期减速阶段；7—12 月人工假顶月均沉降速率为 0.25 mm/月，基本处于长期稳定阶段。年沉降量 7.2 mm，远小于允许值 20 mm，证明该人工假顶结构可以保持长期稳定性，确保采场安全高效回采。

人工假顶构筑方案的成本主要有：机械设备费、材料费、施工费，以及辅助费用，共计 141.42 万元，详细成本见表 6。

表 6　详细成本

Table 6　Detailed costs

名称	型号或种类	数值	单价/万元	合计/万元
机械设备费	锚固钻车/台	1	28	28
材料费	钢花管/根	75	0.2	15
施工费	钻孔/m	1 875	0.006 8	77.25
	水泥砂浆/m^3	750	0.086 0	
辅助费用	沿存窿矿巷道/m	50	0.423 4	21.17
合计				141.42

通过构筑人工假顶，降低了地表塌陷风险，顺利回采出存窿矿的同时，使存窿矿的回采率达到 80%以上，安全高效经济地回采了资源，创造约 500 万元的利润。

6　结论

(1) 基于现场工程地质条件，提出了两组整体回采规划方案，即预先处理空区存窿矿区域后回采矿体方案和先采矿体后处理空区存窿矿区域方案，采用 CAD-3Dmine-MIDAS 联合构建了地质模型。

(2) 采用数值模拟方法比选两组规划方案对应模型各回采阶段应力场、位移场及塑性区分布情况，结果表明，规划方案Ⅰ更有利于回采作业过程中的采场和存窿矿区域地压及稳定性控制，减少资源浪费。

(3) 根据数值模拟结果和开采技术条件，提出了先筑假顶(底)、底部协同回采方案，确定了人工假顶(底)的构筑方案，结合随机森林算法构建人工假顶顶板沉降量预测模型，模型准确率为 85.7%。工业试验结果表明，存窿矿的回采率达到 80%以上，创造约 500 万元利润。

参考文献(References)：

[1]　刘强，沙文忠，王平，等.自然崩落法底部结构稳定性监测研究[J].矿业研究与开发，2021，41(6)：31-35.

LIU Qiang, SHA Wenzhong, WANG Ping, et al. Stability monitoring and analysis on bottom structure for natural caving mining method [J]. Mining Research and Development,2021,41(6):31-35.

[2] 王春元.柴胡栏子金矿残矿资源开采对地表建筑物影响研究[D].长沙:中南大学,2022.
WANG Chunyuan. Study on the influence of residual ore resources mining on surface buildings in Chaihulanzi goldmine[D]. Changsha:Central South University,2022.

[3] 孙健,贺顺业,王多福.呷村银多金属矿残矿资源综合回收方案研究[J].中国矿业,2017,26(10):106-110.
SUN Jian, HE Shunye, WANG Duofu. Study on the comprehensive recovery scheme of residual ore resources in Gacun silver polymetallic mine[J]. China Mining Magazine, 2017,26(10):106-110.

[4] 任凤玉,张晶,刘洋,等.梨树沟铁矿多空区残矿安全回采技术研究[J].金属矿山,2020(3):23-27.
REN Fengyu, ZHANG Jing, LIU Yang, et al. Study on safe and efficient recovery technology of residual ore in Lishugou Iron Mine[J]. Metal Mine,2020(3):23-27.

[5] 蔡汉玉.龙桥铁矿存窿矿石回收与地压显现规律研究[D].赣州:江西理工大学,2016.
CAI Hanyu. Research on ore residue recycling and law of groundpressure for Longqiao iron mine [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2016.

[6] 徐新木,张耀平,蔡汉玉,等.无底柱分段崩落法存窿矿石回收过程稳定性分析[J].矿业研究与开发,2016,36(7):53-57.
XU Xinmu, ZHANG Yaoping, CAI Hanyu, et al. Stability analysis of ore and rock mined by non-pillars sublevel caving during recovering stocked ore [J]. Mining Research and Development,2016,36(7):53-57.

[7] 周玉成,刘立顺,万串串.下向进路充填采矿法人工假顶优化研究与应用[J].矿业研究与开发,2023,43(3):53-58.
ZHOU Yucheng, LIU Lishun, WAN Chuanchuan. Research and application of artificial false roof optimization in downward drift filling mining method [J]. Mining Research and Development,2023,43(3):53-58.

[8] 彭晨鑫,黄德镛,段泽锋,等.某铜矿人工假顶条件下采场点柱参数优化研究[J].矿业研究与开发,2025,45(1):48-54.
PENG Chenxin, HUANG Deyong, DUAN Zefeng, et al. Study on optimization of point pillar parameters under artificial roof of a copper mine [J]. Mining Research and Development,2025,45(1):48-54.

[9] 胡胜,张兵,王贻明,等.下向充填法钢筋混凝土假顶布筋参数及最优吊点位置研究[J].金属矿山,2024(6):79-84.
HU Sheng, ZHANG Bing, WANG Yiming, et al. Research on reinforcement parameters and optimal lifting position of reinforced concrete false roof in downward filling method[J]. Metal Mine,2024(6):79-84.

[10] 史秀志,荀永刚,陈新,等.顶底柱残矿回收的充填体假顶厚度确定与应用[J].采矿与安全工程学报,2016,33(6):1080-1088.
SHI Xiuzhi, GOU Yonggang, CHEN Xin, et al. Determination and application of the backfill thickness in the residual ore recovery of crown and sill pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2016,33(6):1080-1088.

[11] 胡世利,邱景平,孙晓刚,等.适用于采空区治理及残矿回收的"人工关键层"构建及应用[J].金属矿山,2025(1):48-55.
HU Shili, QIU Jingping, SUN Xiaogang, et al. Construction and application of "artificial key strata" suitable for goaf management and residual ore recovery[J]. Metal Mine,2025(1):48-55.

[12] 赵增山,张舟,金爱兵,等.张家洼铁矿崩落转充填采矿工艺及结构参数研究[J].金属矿山,2021(8):1-9.
ZHAO Zengshan, ZHANG Zhou, JIN Aibing, et al. Study on the mining technology and structure parameters of Zhangjiawa Iron Mine from caving to filling[J]. Metal Mine, 2021(8):1-9.

[13] 吴杨,刘再涛,王栋毅,等.西山分矿下向构筑工艺研究与应用[J].矿冶工程,2021,41(5):14-17.
WU Yang, LIU Zaitao, WANG Dongyi, et al. Research and application of downward construction technology in Xishan branch mine [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(5):14-17.

[14] 刘超,王亮,张帅,等.中深孔爆破对采场人工假顶的影响研究[J].矿业研究与开发,2024,44(5):19-24.
LIU Chao, WANG Liang, ZHANG Shuai, et al. Influence of medium and deep hole blasting on artificial false roof in stopes[J]. Mining Research and Development,2024,44(5): 19-24.

[15] HAN Bin, JI Kun, WANG Jiandong, et al. Determination of the required strength of artificial roof for the underhand cut-and-fill mine using field measurements and theoretical analysis[J].Sustainability,2022,15(1):189-189.

[16] ZHAO Ziyue, CAO Shuai, YILMAZ Erol. Effect of layer thickness on the flexural property and microstructure of 3D-printed rhomboid polymer-reinforced cemented tailing composites[J].International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials,2022,30(2):236-249.