

## 排山楼金矿主井保安矿柱采场结构参数初判和回采数值模拟

柳宏儒<sup>1</sup>,李传迎<sup>2</sup>,金长宇<sup>3</sup>(1. 辽宁中金黄金有限责任公司; 2. 辽宁排山楼黄金有限责任公司;  
3. 东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室)

**摘要:**近年来,受政策、矿山资源枯竭、深部资源开采难度大等因素的影响,中国黄金产量呈下降趋势,而上述因素同样也是目前大部分企业面临的难题。如何在政策允许范围内安全高效回收资源是企业亟须解决的问题。通过 Mathews 稳定性图解法并结合现场实际情况,对排山楼金矿上排矿区主井保安矿柱开采结构参数进行了初判,并利用 Flac<sup>3D</sup> 数值模拟的方法对保安矿柱内矿体安全回采可行性进行研究。数值模拟结果表明:保安矿柱范围内矿体安全回采具有可行性,回采造成的塑性区主要集中在采空区周围,回采区域与现有采空区间留设的间柱宽度以 10~15 m 为宜;回采会导致主井中下部产生一定变形,暂无应力集中现象,对主井的使用无大影响。研究结果为主井保安矿柱范围内 T4 矿体的开采提供了理论支撑,具有重要的实践意义。

**关键词:**竖井;保安矿柱;残矿回收;采场结构参数;充填采矿;数值模拟

中图分类号:TD853

文章编号:1001-1277(2025)04-0013-06

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250403

## 引言

辽宁排山楼黄金有限责任公司(下称“排山楼金矿”)隶属于中国黄金集团有限公司,是一家集采选冶于一体的大型黄金矿山企业。排山楼金矿于 1996 年 9 月开始建设,1997 年 7 月建成投产,原为露天开采,自 2005 年起全部转入地下开采。经过多年开采,矿山已进入生产末期,资源成为制约企业发展的重要因素。为尽量回收资源,矿山生产后期针对设计预留的主井保安矿柱进行回采,因此开展了主井保安矿柱安全开采研究,以期在高效利用资源的同时,延长矿山服务年限。

竖井工程在地下矿山生产中起着至关重要的作用,提升、运输、通风、排水等生产系统,以及安全避险六大系统也是通过竖井来完成。因此,竖井周边需留设一定范围的保安矿柱,以保证竖井整体稳定<sup>[1]</sup>。主井保安矿柱范围的圈定:通常根据房屋、构筑物的保护等级确定安全距离,沿其周边绘出保护区范围,再从保护区边缘向外侧以选取的岩石移动角确定移动边界线,移动边界线所圈定的立体范围即为主井保安矿柱。保安矿柱的圈定通常采用平面三视图方式,需要在平面图、剖面图上多次定点、连线,用三视图反映矿柱的三维空间形态。随着三维矿业软件的推广和应用,主井保安矿柱的圈定可以更容易实现<sup>[2]</sup>。

主井布置在矿体侧翼的地下矿山,根据岩石移动角圈定主井保安矿柱,随着开采深度的增加,生产将面临主井压矿的难题。近年来,随着充填采矿技术的应用愈加广泛,赋存在复杂地质条件下的矿体开采具备了技术条件,前期排山楼金矿已开展了活动采空区安全治理技术研究<sup>[3]</sup>及碎石胶结充填工艺研究,并取得了良好效果,为主井保安矿柱安全回收提供了相关技术保障与支撑<sup>[4]</sup>。本次研究以排山楼金矿上排矿区主井以北 XXIV 勘探线—XXXVIII 勘探线 T4 矿体回采为例,针对主井周边复杂采空区条件下矿体回采开展研究。采用多种三维矿业软件圈定主井保安矿柱,计算矿石量,绘制采空区开挖模型,应用数值模拟方法分析、评价 XXIV 勘探线—XXXVIII 勘探线 T4 矿体回采对主井稳定性的影响<sup>[5]</sup>。

## 1 工程背景

排山楼金矿上排矿区主井周边 XXIV 勘探线—XXXVIII 勘探线 T4 矿体有较高回采价值,在保证主井安全的情况下对矿体进行回采。根据最新生产探矿资料,该矿体赋存于 0~135 m,走向长度 90 m,厚度 6~30 m,平均厚度 15 m, T4 矿体走向 NE43°,倾角 25°~35°。排山楼金矿主井井口标高 393 m,井底标高 -60 m,井深 453 m,地表需要保护对象有井架和卷扬机房。矿体、采空区与主井空间位置关系如图 1 所示。

收稿日期:2024-09-30; 修回日期:2024-11-05

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金项目(N2101041)

作者简介:柳宏儒(1981—),男,高级工程师,从事金属矿山采矿技术及管理工;E-mail:416245020@qq.com

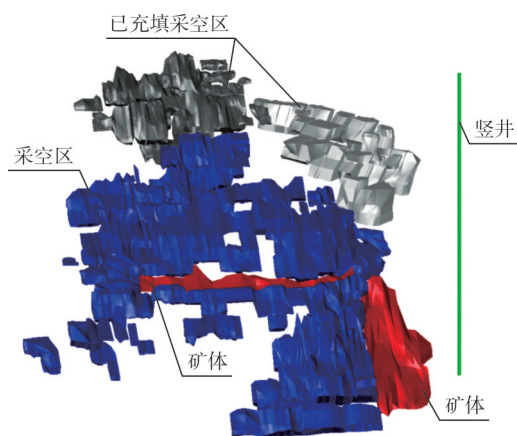


图1 矿体、采空区与主竖井空间位置关系

Fig. 1 Spatial relationship between the orebody, mined-out areas, and the main shaft

2 Mathews 稳定性图解法

Mathews 稳定性图解法是 MATHEWS 等于 1980 年首先提出的,该方法主要适用于硬岩矿山的开采设计<sup>[6]</sup>。Mathews 稳定图解是一种用图形方法表示的岩体质量、开采深度、采场尺寸和稳定性间的经验关系。该方法最初是基于 50 个工程实例的崩落水力半径和稳定系数绘制的稳定图,后期由多位专家在分析 500 个工程实例的基础上,重新绘制了修正的稳定图,使计算更加可靠。

由于采场的稳定性受岩石力学、地质条件及开采顺序等不确定性因素的影响,因此对采场稳定性评估成为一个复杂的系统工程<sup>[7-8]</sup>。本次研究结合排山楼金矿上排矿区岩体质量的具体评价,尤其是考虑到复杂地质条件下软弱岩体这一特殊条件,采用基于半经验的 Mathews 稳定性图解法进行采场初步设计,为最终设计合理的采场尺寸提供科学依据。

3 采场参数初判

在 Mathews 稳定性图解法的基础上,通过修正的岩体质量指数、岩石应力系数、节理方位修正系数、重力调整系数对采场结构参数进行了初判,所得结果如下:

1) 标高 50 ~ 75 m 参数初判。利用 Mathews 稳定性图解法对采场结构参数进行了计算,由于标高 50 ~ 75 m 岩体完整性较好,矿体倾角为 25°,在矿体厚度为采场长度(最大厚度 20 m),采场竖直高度为 20 ~ 25 m 的情况下,采场宽度不宜超过 40 m。初判结果如表 1 所示。

2) 标高 75 ~ 100 m 参数初判。由于标高 75 ~ 100 m 岩体完整性一般,矿体倾角为 40°,在矿体厚度为采场长度(最大厚度 20 m),采场竖直高度为 30 m 的情况下,采场宽度不宜超过 30 m。初判结果如表 2 所示。

表1 标高 50 ~ 75 m 采场参数初判

Table 1 Preliminary determination of stope parameters at elevation 50~75 m

| 采场竖直高度/m | 矿房斜高/m | 采场宽度/m |
|----------|--------|--------|
| 15       | 35.5   | 56.5   |
| 20       | 47.3   | 40.4   |
| 25       | 59.2   | 34.5   |
| 30       | 71.0   | 31.5   |
| 35       | 82.8   | 29.6   |

注:水力半径为 10.9 m。

表2 标高 75 ~ 100 m 采场参数初判

Table 2 Preliminary determination of stope parameters at elevation 75~100 m

| 采场竖直高度/m | 矿房斜高/m | 采场宽度/m |
|----------|--------|--------|
| 20       | 31.1   | 43.8   |
| 25       | 38.9   | 34.2   |
| 30       | 46.7   | 29.8   |
| 35       | 54.5   | 27.3   |
| 40       | 62.2   | 25.7   |

注:水力半径为 9.1 m。

4 主井保安矿柱范围确定

主井保安矿柱圈定通常利用平面图构成三维视图以展示三维效果,绘制步骤如下:首先,在平面图上确定主井井口安全区,主要包括井筒、井架和卷扬机房,并向外侧延伸 20 m。然后,以井筒中心线作垂直走向剖面,将井筒分为左右两侧,即根据上下盘不同岩石移动角绘制移动线,移动线与底层的交点为边界点,并将此点投影到俯视图。从剖面上依次绘制边界点,连接边界点获得保安矿柱边界线,边界线圈定的范围即为保安矿柱<sup>[9-10]</sup>。近年来,随着三维矿业软件和三维绘图技术的普及推广,三维模型在表达矿山地形地貌、不规则矿脉、复杂采空区形态等方面得到了广泛应用。采用三维软件可以更快速、精确地绘制保安矿柱模型,而且可以统计出矿柱体积、矿石量等<sup>[11-12]</sup>。

根据排山楼金矿的实际情况,由于主井布置在矿体侧翼,在设计开采初期,为保证主井的整体安全稳定,以主井中心为圆点,半径 30 m 范围为安全区域,侧翼保安矿柱岩石移动角为 70°,整体为圆台形。主井保安矿柱三维模型如图 2 所示。采用此种保安矿柱圈定方法技术要求低,可操作性强,矿柱边界整齐分明,为今后矿柱内矿体的开采带来了一定便利,是矿山建立初期常用的一种方法。

5 待采 T4 矿体三维圈定

需要回采的矿体位于主井保安矿柱范围内,该矿

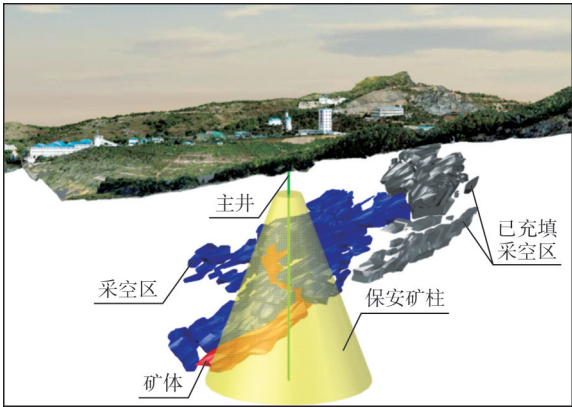


图2 主井保安矿柱三维模型示意图

Fig. 2 3D diagram of the security pillar of the main shaft

体为T4矿体,总体走向北东43°左右,倾向北西313°左右,在125 m中段以下倾角为25°~35°。矿体产于黑云斜长糜棱岩(太古代地层)中,顶盘为糜棱岩化大理岩(中元古代地层),东北部为大石沟似斑状黑云母花岗岩(中生代侏罗纪地层)。矿岩稳固性较好,局部偶有破碎,未见大的系统性破坏断层<sup>[13-14]</sup>,属缓倾斜—倾斜的中厚—厚大矿体。岩石致密坚硬,稳固性好,根据矿体赋存条件,矿山现采用的主要采矿方法为分段空场采矿法及分段空场嗣后碎石充填采矿法。

根据矿山实测地质资料,主井直径3.5 m,标高0~393 m;待采T4矿体走向长90 m,标高0~125 m,厚度6~30 m,绘制矿体平面图和剖面图,效果如图3所示。矿体的三维模型如图4所示。利用三维软件进行统计分析,该部分矿体矿石量为40.4万t,金品位1.75 g/t,金金属量706.03 kg。

6 保安矿柱回采数值模拟

6.1 模型建立

数值分析模型分地表和井下2部分建立。其中,地表部分通过地形等高线、高程点数据,建立东西长1 770 m,

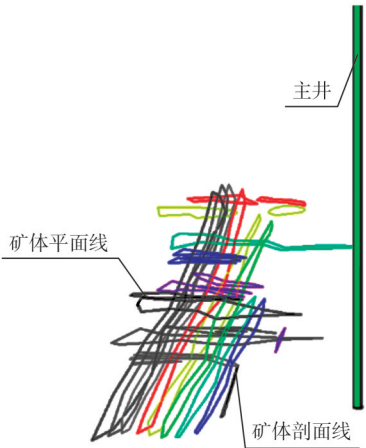


图3 矿体平面、剖面线

Fig. 3 Plan and section lines of the orebody

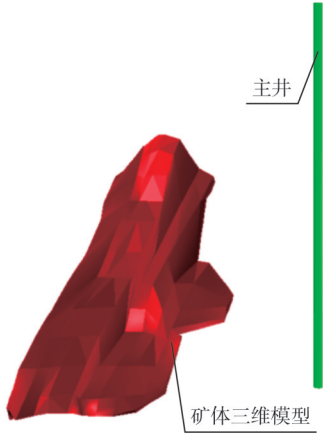


图4 矿体三维模型

Fig. 4 3D model of the orebody

南北长1 460 m,底部标高-100 m的大型模型;井下部分通过48张实测平面图和79张剖面图绘制工程、矿体及采空区模型。将地表和井下2部分模型合并,绘制Flac<sup>3D</sup>数值计算模型,模型以六面体网格为主,共计38.11万个节点,219.08万个单元。Flac<sup>3D</sup>数值计算模型<sup>[15-16]</sup>如图5所示。

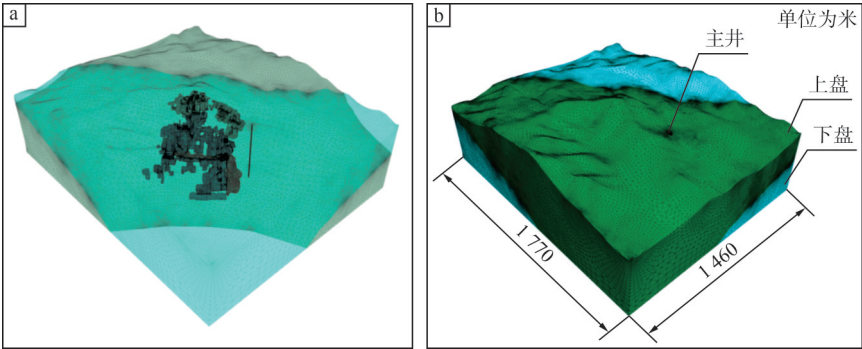


图5 Flac<sup>3D</sup>数值计算模型

Fig. 5 Flac<sup>3D</sup> numerical calculation model

6.2 矿岩物理力学参数

1)物理力学参数。根据排山楼金矿区地质条件,矿床属于大型韧性剪切带变质热液型金矿床,近矿围

岩为糜棱岩,远矿围岩为初糜棱岩和糜棱岩化岩石。以金矿带为中心,向两侧依次为糜棱岩、初糜棱岩、糜棱岩化岩石,它们平行于金矿带呈东西向展布。矿体

位于糜棱岩化最强部位。矿体、围岩及充填体共5部分,物理力学参数如表3所示。

2)地应力。本次研究矿体赋存较浅,且区域内地质条件较简单,无大型地质构造,因此数值模拟仅考虑矿岩自重产生的地应力,未考虑构造地应力。

3)破坏准则。本计算模型采用莫尔-库仑强度准

则,其表达式为:

σ<sub>1</sub> = σ<sub>3</sub>  $\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$  + 2C  $\frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$  (1)

式中:σ<sub>1</sub>、σ<sub>3</sub>分别为最大主应力和最小主应力(MPa);C为内聚力(MPa);φ为内摩擦角(°)。

屈服函数的表达式为:

表3 数值计算的岩体物理力学参数

Table 3 Rock mass physical mechanical parameters for numerical calculations

| 岩体类别        | 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 泊松比  | 内摩擦角/(°) | 内聚力/MPa | 弹性模量/GPa | 抗拉强度/MPa | 抗压强度/MPa |
|-------------|--------------------------|------|----------|---------|----------|----------|----------|
| 上盘(白云质糜棱岩)  | 2.74                     | 0.24 | 41.11    | 7.65    | 47.32    | 3.47     | 33.65    |
| 矿体(长英质糜棱岩)  | 2.75                     | 0.22 | 40.10    | 4.02    | 31.56    | 1.58     | 17.30    |
| 下盘(黑云斜长糜棱岩) | 2.76                     | 0.23 | 40.57    | 4.47    | 33.55    | 1.79     | 19.44    |
| 胶结充填体       | 1.92                     | 0.2  | 35       | 0.70    | 1.1      | 0.1      | 5        |
| 废石充填体       | 1.84                     | 0.1  | 25       | 0.3     | 0.5      | 0.02     | 0.5      |

f<sub>s</sub> = σ<sub>1</sub> - σ<sub>3</sub>  $\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$  - 2C  $\frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$  (2)

当f<sub>s</sub>>0时,材料受到的压应力超过其抗压强度,材料将发生剪切破坏。在拉应力状态下,如果拉应力超过材料的抗拉强度,材料会发生拉伸破坏。

6.3 模拟回采方案

根据矿体的赋存条件,基于 Mathews 稳定性图解法,在矿体走向上布置1~2个矿房,矿房长35 m,高25 m。各中段矿房布置情况如图6所示。矿房与矿房之间、矿房与采空区之间留有宽10 m的连续性间柱<sup>[17-19]</sup>。矿体采用后退式回采,每个中段先回采①号矿房,再回采②号矿房,矿房回采完毕需对采空区进行充填,充填完成后回采下一个矿房。各中段自下而上开采,低中段矿房回采并充填后,再回采高中段<sup>[20]</sup>。

7 数值模拟结果及分析

模拟选取主井与T4矿体最近处连线作为重点剖面,即A—A剖面,对位移场、应力场和塑性区进行分析

析;同时选取2个垂直于矿体走向的剖面,分别穿过1<sup>#</sup>间柱和2<sup>#</sup>间柱,即B—B、C—C剖面,对塑性区进行分析。剖面位置如图7所示。另外,在竖井周边以井口为起点自上而下每隔20 m设置1个参考点,共设置20个。

7.1 位移分析

回采过程中主井变形曲线如图8所示。由图8可

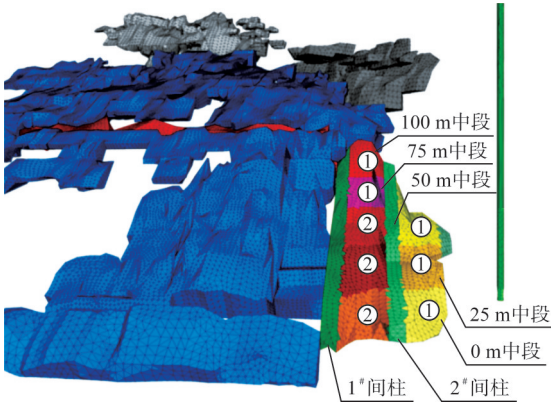


图6 各中段矿房布置示意图

Fig. 6 Layout of ore chambers at different levels

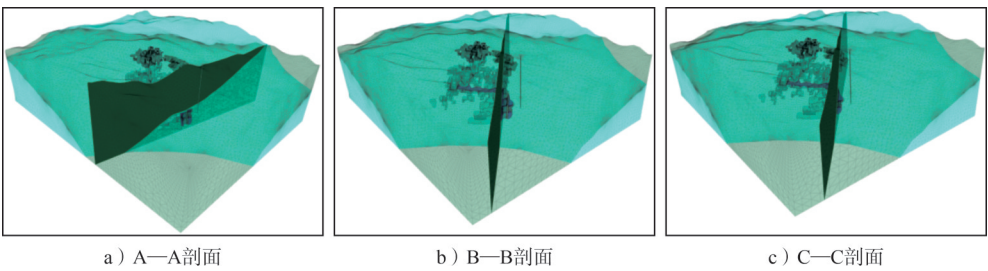


图7 剖面位置示意图

Fig. 7 Diagram of cross-section positions

知:综合考虑包括现有采空区形成过程对主井产生的影响,当T4矿体回采完毕,井筒最大变形发生在井深约300 m处,且x方向变形最大,可达2 mm,y方向变形1 mm。主井沉降方面,沉降最大处位于主井井口,

沉降值4 mm。产生上述现象的原因主要有:矿体走向方向与x、y方向夹角基本相等,在x、y方向上变形趋势基本一致;主井深300 m处为岩体上下盘交界处,下盘岩体受采动影响较小,且主井井底标高与矿

体最低回采水平均为 0 m,因此主井位于岩体下盘部 分变形较小。

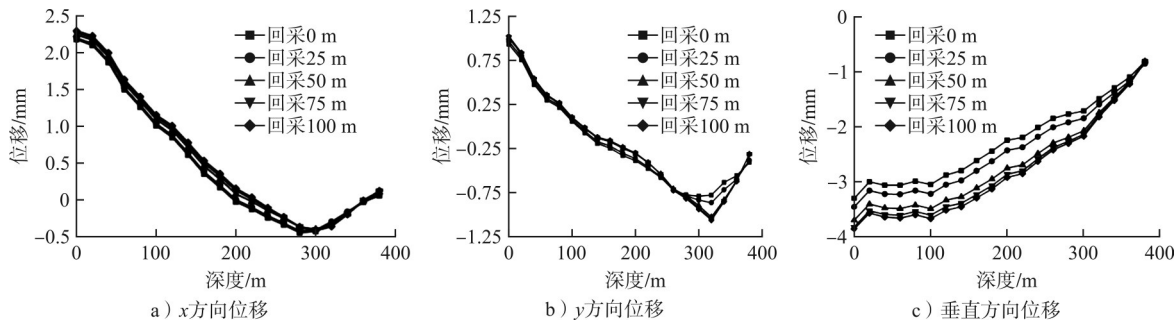


图 8 回采过程中主井变形曲线

Fig. 8 Deformation curve of the main shaft during mining

7.2 塑性区分析

剖面 A—A 的塑性区分布如图 9 所示。由图 9 可知:T4 矿体回采完毕后,采场间柱局部分布有塑性区,塑性区以剪切破坏为主。其中,1# 间柱塑性区面积明显大于 2# 间柱,主要原因为 1# 间柱一侧存在大面积未充填的采空区,间柱水平方向受到的支撑力明显小于 2# 间柱,剪切破坏明显。由图 9-b)、c)可知:B—

B 剖面塑性区面积明显大于 C—C 剖面,且 2 个剖面塑性区集中的高度不同。其中,B—B 剖面塑性区多集中于 25 m 中段采场,主要由于该中段矿体较厚,采后岩体扰动较大,间柱受到的围压较小,1# 间柱产生的剪切破坏多集中于此;同理,C—C 剖面上,50 m 中段矿体较厚,塑性破坏多集中于此。

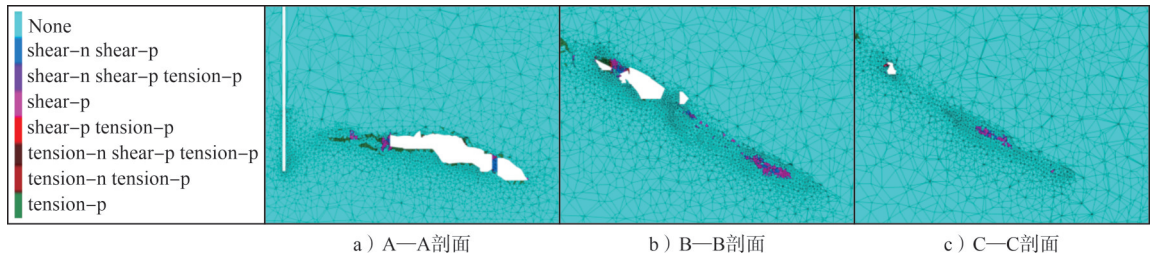


图 9 塑性区分布云图

Fig. 9 Cloud chart of plastic zone distribution

7.3 应力分析

根据应力分布云图(如图 10 所示),模型在 1#、2# 间柱及采场边界处产生了较大的应力集中,主要由于 T4 矿体开采后充填的过程中,间柱起主要的支撑作

用,因此充填体和上下盘围岩承受的应力较小。应力激增区域与间柱发生剪切破坏的塑性区基本重合,该部分区域承受的应力明显大于其他区域,回采期间是应力监控的重点。

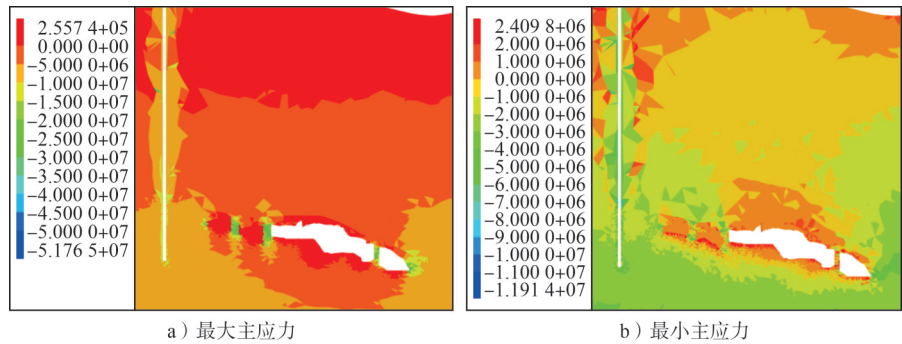


图 10 应力分布云图

Fig. 10 Cloud chart of stress distribution

8 结 论

1)利用翔实的地质信息与完备的岩体力学数据,开展了主井保安矿柱及采空区的三维建模和数值分析计算工作。根据数值分析结果,排山楼金矿上排矿

区主井保安矿柱回采具有技术可行性,所判定的采场结构参数合理。

2)回采 T4 矿体产生塑性区主要集中在采场周边及充填体内部,主井周边并无塑性区。回采对主井产生的变形量较小,最大垂直变形 4 mm,不会威胁主井

稳定,主井侧向变形最大区域位于上下盘分界线处,回采过程中应做好监测。

3)在T4矿体回采过程中,应保证1#间柱宽度不低于10 m,以10~15 m为宜,防止间柱整体发生剪切破坏。由于现有采空区对地表有一定影响,建议回填后,在地表开展重点区域变形监测,防止生产事故的发生。

4)通过数值模拟研究,在主井井筒变形可控范围内,主井保安矿柱开采具有可行性,但应按照数值模拟结果进行方案设计,及时嗣后充填,同时做好变形监测。

[参 考 文 献]

[1] 辛国帅.小官庄铁矿北区地下开采对地表沉陷及井筒变形影响数值模拟研究[D].沈阳:东北大学,2014.

[2] 张洪训,刘溪鸽,关凯,等.新城金矿竖井保安矿柱的三维圈定与模拟回采[J].金属矿山,2017(3):19-24.

[3] 翟会超.排山楼金矿活动空区安全治理技术研究[D].沈阳:东北大学,2012.

[4] 李传迎,齐文超.碎石胶结充填工艺[J].世界有色金属,2016(14):73-75.

[5] 刘溪鸽.新城金矿XI#矿体回采对主竖井稳定性影响的数值模拟[D].沈阳:东北大学,2014.

[6] 陈卫东,石勇,史秀志.凡口铅锌矿大结构参数采场围岩稳定性分析[J].黄金,2023,44(4):5-9.

[7] 任凤玉,翟会超,曹建立,等.排山楼金矿采空区充填技术研究[J].中国矿业,2012,21(1):72-74.

[8] 董秋平,徐浩,周科平,等.攀枝花铁矿尖山地采保安矿柱回采结构参数优化[J].采矿技术,2022,22(5):9-14.

[9] 姜永恒,刘博.黄金矿山缓倾斜中厚矿体双进路分段空场采矿法及其应用[J].黄金,2023,44(9):41-45.

[10] 程杰.缓倾斜中厚矿体露转地开采下地压活动特征及空区充填效果研究[D].赣州:江西理工大学,2020.

[11] 王志方.竖井稳定性与保安矿柱开采[J].有色矿冶,1993(6):5-10.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 李文秀,赵胜涛,梁旭黎,等.鲁中矿区地下开采对竖井井塔楼的影响分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):74-78.

[15] 宋许根,陈从新,夏开宗,等.竖井变形破坏机制与继续使用可行性探究[J].岩土力学,2017,38(增刊1):331-342.

[16] 姜岳,张洪训,王方方,等.黄金矿山回收保护矿柱引起的竖井变形预计[J].金属矿山,2017(10):159-162.

[17] 黄平路.构造应力型矿山地下开采引起岩层移动规律的研究[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2008.

[18] 裴峰.纱岭金矿深部地层岩体力学性能与深竖井围岩稳定性分析及控制[D].北京:北京科技大学,2020.

[19] 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.

[20] 张建伟,赵江波,姚景亮.红岭铅锌矿采场结构参数优化研究[J].黄金,2024,45(6):6-10.

Preliminary determination of stope structural parameters and numerical simulation of mining for the main shaft security pillars in the Paishanlou Gold Mine

Liu Hongru<sup>1</sup>, Li Chuanying<sup>2</sup>, Jin Changyu<sup>3</sup>

(1. Liaoning Zhongjin Gold Co., Ltd.; 2. Liaoning Paishanlou Gold Co., Ltd.;

3. Key Laboratory of Safe Mining of Deep Metal Mines (Ministry of Education), Northeastern University)

**Abstract:** In recent years, China’s gold production has declined due to policy constraints, resource depletion, and challenges in deep mining, which are common issues faced by most enterprises. Therefore, safely and efficiently recovering resources within policy limits has become a critical priority for enterprises. This study preliminarily determines the structural parameters for mining the main shaft security pillars in the Shangpai mining district of the Paishanlou Gold Mine using the Mathews stability graphical method based on field conditions. Flac<sup>3D</sup> numerical simulations were employed to evaluate the feasibility of safely recovering ore bodies within the security pillar. Results indicate that safe extraction is feasible: plastic zones induced by mining are mainly concentrated around the goaf, and 10–15 m width is recommended for pillars retained between the mining area and existing goafs. Mining causes minor deformation in the middle-lower sections of the main shaft without significant stress concentration, posing no major impact on shaft functionality. These findings provide theoretical support and practical guidance for mining the T4 orebody within the vertical shaft security pillar.

**Keywords:** vertical shaft; security pillar; residual ore recovery; stope structural parameters; filling mining; numerical simulation