

相邻矿体临界开采范围的确定方法研究^①

郭晓强^{1,2,3}, 王刚¹, 黄敏^{1,2}, 陈庆坤¹, 华实⁴, 温嘉明^{1,2}

(1.紫金矿业集团股份有限公司,福建 上杭 364200; 2.紫金(长沙)工程技术有限公司,湖南 长沙 410208; 3.中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙 410083; 4.湖南省交通科学研究院有限公司,湖南 长沙 410015)

摘要: 为了界定某铜金矿上、下部矿带8年共采期间的相互扰动范围,从开采过程中诱发的岩层移动变形特征出发,对自然崩落法开采的岩层变形规律进行了总结,进一步结合现场实际开采技术条件,采用工程类比法、理论计算法、数值模拟法对下部矿带岩移规律进行了研究,最终界定了确保上部矿带安全开采的临界采动影响范围,为下部矿带开采规划与布局提供依据。结果表明,上部矿带安全开采所需的下部矿带保安矿柱沿走向约550 m、最小岩层移动角 $70^{\circ} \sim 73.3^{\circ}$ 。

关键词: 采矿工程; 自然崩落法; 保安矿柱; 岩层移动角

中图分类号: TD853

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.04.006

文章编号: 0253-6099(2023)04-0026-06

Determination of Critical Mining Scope of Adjacent Orebody

GUO Xiaoqiang^{1,2,3}, WANG Gang¹, HUANG Min^{1,2}, CHEN Qingkun¹, HUA Shi⁴, WEN Jiaming^{1,2}

(1.Zijin Mining Group Co Ltd, Shanghang 364200, Fujian, China; 2.Zijin (Changsha) Engineering Technology Co Ltd, Changsha 410208, Hunan, China; 3.School of Resources and Security Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 4.Hunan Transportation Research Institute Co Ltd, Changsha 410015, Hunan, China)

Abstract: In order to define a mutual disturbance range between the upper and lower ore belts of a copper-gold mine during 8-year co-mining period, a deformation law of stratum by natural caving mining method is summarized based on the characteristics of stratum movement and deformation induced by mining. Combined with the actual mining technologies on site, a law of rock movement is explored for the lower ore belt by adopting engineering analogy method, theoretical calculation method and numerical simulation method, and the critical mining-induced disturbance range is defined to ensure safe mining of the upper ore belt, which provides a basis for the planning and layout for the mining of the lower ore belt. It is found that for safe mining of the upper ore belt, the lower ore belt should have security pillars of about 550 m along the strike, with the minimum angle of stratum movement within the range from 70° to 73.3° .

Key words: mining engineering; natural caving mining method; security pillar; angle of stratum movement

对于相邻矿体开采,需要根据相互采动影响范围留设隔离矿柱以避免地压灾害或伴生的地下水等问题^[1],因此,采动影响范围的确定尤为重要^[2]。业内技术人员在采动影响范围的确定方面进行了大量研究,基于不同开采技术条件,采用不同方法从不同角度对相邻矿体开采的采动影响范围、隔离矿柱留设等提出了相应的确定原则与计算方法,取得了一定的研究成果,部分成果在现场应用中得到了有效验证^[3-7]。但

针对上下矿带位置相对且上下矿带采用不同采矿方法的相邻矿体在共采期间隔离矿柱留设方面的研究相对较少。本文以国外某特大型铜金矿上下部矿带开采现场为例,从采动诱发的岩层移动变形特征出发,采用工程类比法、理论计算法、数值模拟法对下部矿带岩层移动角进行了研究与确定,最终界定了确保上部矿带安全开采的临界采动影响范围,为下部矿带开采规划与布局提供依据。

① 收稿日期: 2023-02-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(5217042679)

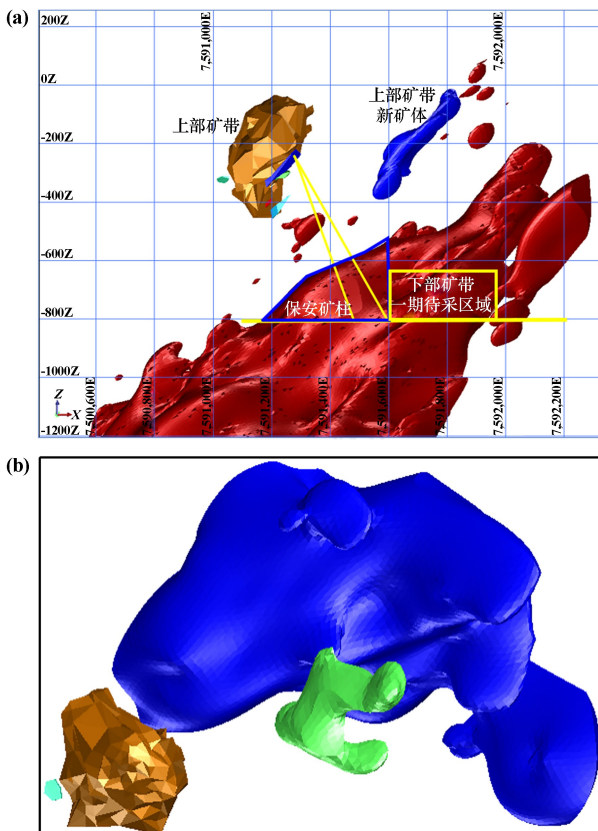
作者简介: 郭晓强(1986—),男,湖北黄冈人,博士研究生,高级工程师,主要从事矿山压力、岩石力学方面的研究。

1 现场概况

国外某铜金矿主采一特大型铜金矿床,矿床分为上部矿带和下部矿带。上部矿带为高硫型浅成低温热液矿床,赋存标高 $-460\sim-20\text{ m}$,埋深 $430\sim 865\text{ m}$,矿体规模较小,探明资源量 30.42 Mt ,铜平均品位 3.85% ,金平均品位 2.46 g/t ;下部矿带为斑岩型矿床,赋存标高 $-1\ 900\sim-500\text{ m}$,埋深 $800\sim 2\ 200\text{ m}$,矿体规模巨大,资源量 $1\ 748.80\text{ Mt}$,铜平均品位 0.86% ,金平均品位 0.19 g/t 。

上部矿带采用竖井、斜坡道联合开拓,充填法开采,计划产能 3.3 Mt/a ,服务年限13年;下部矿带采用竖井、盲斜坡道联合开拓,拟采用国际上较为先进的产能大、成本低的自然崩落法开采,一期工程(-800 m 以上)生产能力 15 Mt/a 、服务年限21年,二期工程($-1\ 300\text{ m}$ 以上)生产能力 45 Mt/a 、服务年限28年。

根据开采规划,在上部矿带投产第6年,下部矿带一期工程开始投产;上、下部矿带存在8年同时生产期,相对位置关系如图1所示。



(a) 主视图; (b) 俯视图
图1 上、下部矿带相对位置

由于下部矿带拟采用自然崩落法开采,矿体逐渐被采出后,覆盖层层移动会对共采的上部矿带造成

影响。为了保障上部矿带的生产安全,主要的采选工程设施均应布置在下部矿带一期工程的自然崩落法采动影响范围之外,因此,需要对下部矿带8年共采期间的临界范围进行界定,留设相应的保安矿柱。

2 采动引起的岩层移动规律

金属矿山地下开采后,引起的移动与变形按其发展的时间和空间规律可分为连续变形和非连续变形^[8]。

2.1 连续变形

连续变形主要发生在水平与缓倾斜矿体开采中,其上覆空间逐渐变形会形成明显的“三带”,可以通过已有的三带理论对岩移范围进行理论计算与圈定。比较典型的计算方法为概率积分法。

2.2 非连续变形

非连续变形主要发生在急倾斜矿体的空场法、崩落法开采中,其上覆岩层的变形特征相对复杂,主要可以通过渐进崩落理论、塌陷坑临界散体柱支撑理论对岩移角进行计算与圈定。比较典型的计算方法为散体柱支撑理论。

3 初步计算与分析

为了界定下部矿带一期工程在8年共采期间对上部矿带的采动影响范围并评价影响程度,结合两区域之间的相互关系(上部矿带处于下部矿带的上盘、西南侧),采用岩移角理论方法,实质上是需要对上盘岩移角进行初步计算。

3.1 工程类比法

工程类比法是目前金属矿山岩层移动参数预测的常用、首选方法^[3,8]。国外采用自然崩落法开采的矿山较多,对崩落角、移动角统计情况见表1。国内崩落法矿山以无底柱分段崩落法为主,统计情况见表2。

下部矿带一期工程 -800 m 以上矿体基本赋存条件为:上盘 f 值(根据单轴抗压强度折算公式计算获得)为 $6\sim 8$,倾角 $45^\circ\sim 65^\circ$,采深约 $1\ 100\text{ m}$ 。经初步类比,条件与武山铜矿较为类似,岩层移动角为 70° 。

3.2 理论计算法

针对下部矿带一期工程前8年开采活动引起的采动影响问题,根据前述采动诱发的岩层移动形式与特征、崩落法岩层移动理论方面的分析研究,借鉴应用较为充分的三带理论(概率积分法)与基于深井崩落法开采的散体柱支撑理论分别对覆岩岩层移动角进行初步理论计算^[9-10]。

3.2.1 概率积分法

概率积分法基本参数主要包括下沉系数 q 、主要影响角正切值 $\tan\beta_0$ 、采动影响半径 r 、移动边界 X 等。

表1 国外自然崩落法矿山移动角统计情况

矿山名称	具体位置	采深/m	崩落角/(°)	移动角/(°)	可靠性
智利 Andina	I 盘区	135	85~89	80~84	可信度一般/基于崩落初期的数据
美国 Athens	1~4 盘区	670	84~94	80~90	可信度好/崩落范围受垂直的岩墙控制
美国 Bagdad	西矿体	265	84~90	72~86	可信度一般
美国 Climax	P 矿体	145	86~95	61~95	可信度好/地表为斜坡面
美国 Jenifer	Jenifer 矿体	160	81~95	81~95	可信度好/崩落范围之外几乎无地表移动
美国 Miami	11 采场	195	83~92	76~87	可信度好/崩落范围受割帮天井控制
澳洲 Northparkes	E26 矿体	450	84~88	84~88	可信度一般/崩落范围近乎垂直
美国 San Manuel	南矿体	605	63~80	63~80	可信度好/与上部拉底层形成的崩落范围一致
	北矿体	390	78~86	66~74	可信度好

表2 国内崩落法矿山移动角统计情况

矿山名称	上盘 <i>f</i> 值	矿体倾角/(°)	开采深度/m	移动角/(°)
普朗铜矿	10~14	80~90	750	60
铜矿峪铜矿	7~14	40~60	700	80
锡铁山铅锌矿	4~6	65~75	580	70
折腰山铜矿	4~6	50~70	450	65
小铁山铅锌矿	4~6	60~80	450~650	70
漓渚铁矿	4~18	50~70	0~220	75
金山店铁矿	4~6	57~89	550	65
余华寺铁矿	10	57~60	500	65
丰山铜矿	4~6	50~70	400	70
易门铜矿	6~8	70	600	75
程潮铁矿	10~13	46~47	255~485	65
武山铜矿	6~8	60	300~600	70

表3 综合评价系数*P*与岩性影响因子*D*的对应关系

综合评价系数 <i>P</i>	岩性影响因子 <i>D</i>
0.00	0.76
0.03	0.82
0.07	0.88
0.11	0.95
0.15	1.01
0.19	1.08
0.23	1.14
0.30	1.21

根据几何关系,采动影响半径*r*可以通过以下公式计算:

$$r = \frac{H}{\tan \beta_0} \quad (4)$$

计算得: $r \approx 294 \text{ m}$ 。

概率积分法对移动边界*X*的推导公式为:

$$f(x) = \frac{W}{\sqrt{\pi}} \int_{-\sqrt{\pi} \frac{x}{L}}^{\infty} e^{-x^2} dx \quad (5)$$

根据欧洲岩移标准《Eurocode 7: Geotechnical design-Part 1: General rules》,一般以沉降 50 mm 作为岩移圈界限,将已计算得出的参数代入式(5),可计算出移动边界 $X = 2.3r \approx 676 \text{ m}$ 。

下部矿带一期工程前 8 年开采区域矿体走向长度 $L_x = 420 \sim 714 \text{ m}$,平均 567 m。则影响区域边界距离 *L* 为:

$$L = X - \frac{L_x}{2} = 392.5 \text{ (m)} \quad (6)$$

岩层移动角 β 为:

$$\beta = \arctan\left(\frac{H}{L}\right) = 70.8^\circ \quad (7)$$

3.2.2 散体柱支撑理论

散体柱支撑理论即塌陷坑边壁岩体的强度与坑内临界散体柱的支撑力共同维持塌陷坑边壁岩体的稳定;当边壁岩体强度与临界散体柱的位置高度不被破坏时,地表陷落范围不再与采深呈正相关关系。临界

下沉系数 *q* 是地表最大下沉值 W_{\max} 与矿体法线采厚 *m* 在竖直方向的长度之比:

$$q = \frac{W_{\max}}{m \cos \alpha} \quad (1)$$

充分采动情况下,下沉系数 *q* 与综合评价系数 *P* 有如下关系:

$$q = 0.5(0.9 + P) \quad (2)$$

该铜金矿下部矿带采用自然崩落法开采,且矿体极为厚大,为充分考虑其采动沉降,可确定下沉系数 $q = 0.6$;根据式(2),可以计算出 $P = 0.30$ 。

造成的地表沉降变形主要集中在实际开采边界上方 $2r$ 宽度范围内。地表沉降变形边界点与实际开采边界连线的水平倾角为主要影响角 β_0 。

$\tan \beta_0$ 值与岩性影响因子 *D*、开采深度 *H* 和矿体倾角 α 的相关关系为:

$$\tan \beta_0 = (1 - 0.0038\alpha)(D + 0.0032H) \quad (3)$$

其中岩性影响因子 *D* 与综合评价系数 *P* 满足一定的对应关系,见表 3。

$P = 0.30$ 对应的岩性影响因子 $D = 1.21$,矿体平均倾角为 55° 、开采深度 $H = 1100 \text{ m}$,代入式(3),可得主要影响角正切值 $\tan \beta_0 = 3.74$ 。

散体柱支撑理论岩层移动角计算模型如图2所示。

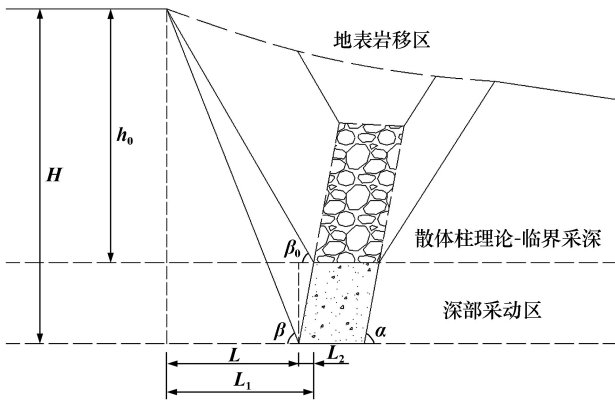


图2 散体柱支撑理论计算模型

当开采深度达到 H 时,岩层移动角 β 计算公式为:

$$\begin{cases} L = L_1 - L_2 = h_0 \cot \beta_0 - (H - h_0) \cot \alpha \\ = h_0 (\cot \beta_0 + \cot \alpha) - H \cot \alpha \\ \beta = \arctan \left(\frac{H}{L} \right) \\ = \arctan \left(\frac{H}{h_0 (\cot \beta_0 + \cot \alpha) - H \cot \alpha} \right) \end{cases} \quad (8)$$

为充分考虑其采动影响范围,假设:①待采区域上方已自然崩落并充分稳定;②待采区域上界线位置为临界采深。实际临界采深界线在该位置上方,对应岩移角会大于该假设条件下的角度。

相关参数为:采深 $H=1100\text{ m}$,待采区域高度 $H-h_0 \approx 190\text{ m}$,矿体平均倾角 $\alpha=55^\circ$,根据基本假设以及莫尔-库伦模型,临界采深处围岩影响角为: $\beta_0=45^\circ+\varphi/2$ 。

上盘安山岩内摩擦角 $\varphi=33.2^\circ$,则临界采深处围岩影响角 $\beta_0=61.6^\circ$ 。

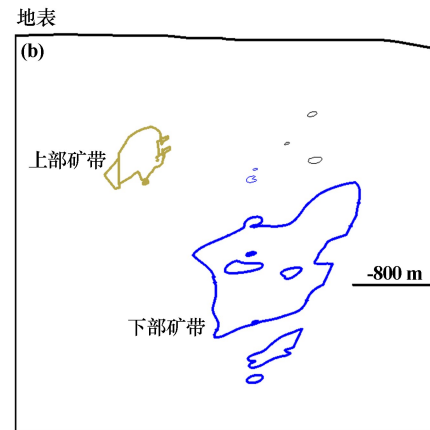
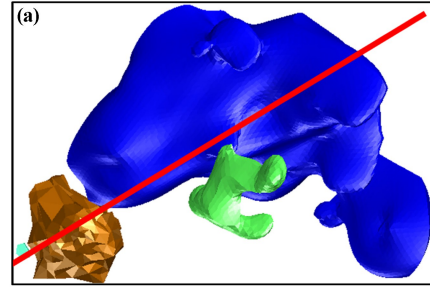
将工况参数代入式(8),计算得到岩层移动角 β 为:

$$\begin{aligned} \beta &= \arctan \left(\frac{H}{h_0 (\cot \beta_0 + \cot \alpha) - H \cot \alpha} \right) \\ &= \arctan(3.07) \\ &\approx 72.0^\circ \end{aligned} \quad (9)$$

4 数值模拟计算与分析

4.1 模型建立

采用 Rocscience Phase2 二维有限元岩土工程分析软件建模及计算。建模时需对实际模型进行适当简化以满足模拟软件对网格形状的要求,同时为充分分析开采过程中应力分布演化及塑性区发展过程,排除边界影响,建立模型的典型剖面如图3所示。



(a) 典型剖面位置; (b) 典型剖面图

图3 典型剖面

以图3(a)中剖面线为中心往两侧平剖一系列剖面线,为充分考虑采动影响,将上下部矿带的外轮廓作为研究目标,最终确定的模型范围约为 $2000\text{ m} \times 1900\text{ m}$,如图4所示。

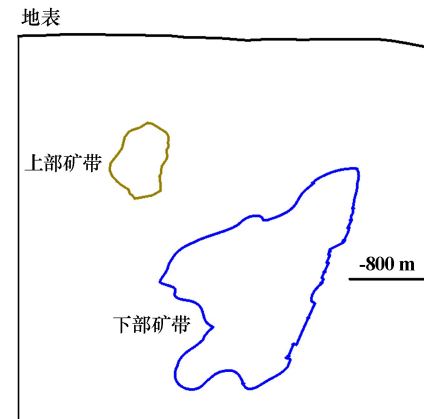


图4 模型范围

采用 AutoCAD、SURPAC 处理后导入 Phase2,并经坐标转换,建立数值模型,采用分级三角形网格划分单元,节点数 63 229、单元数 125 457,数值模型如图5所示。

4.2 模拟计算基础

该模拟计算的矿体、围岩材料采用莫尔-库伦本构模型参数,矿体开挖采用 Null 单元模型。主要岩体力学参数见表4。

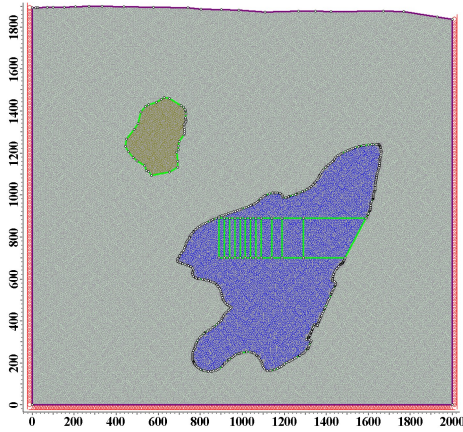


图5 数值模型

表4 矿带、围岩体物理力学参数

岩体名称	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	内聚力/ MPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
上部矿带	3.4	6.11	0.26	10.39	0.37	2.10	31.9
下部矿带	3.0	12.70	0.74	23.80	0.31	2.62	34.5
围岩	2.6	9.26	0.43	16.02	0.30	2.59	33.4

在前述模拟计算基础上,开展下部矿带一期工程-800 m 以上前8年共采期间临界开采范围的数值模拟分析,主要存在以下待分析因素:①待采区域的位置;②待采区域开采导致的岩层移动范围。

以上两因素都未知,且相互影响,因此拟采用迭代的思路通过多种方案去寻找临界影响位置,即寻找最大待采区域,通过受影响区域的特征量分析确定岩移影响边界(处于上部矿带临界影响位置)。

考虑最不利因素,设计分12次开挖,无限逼近临界范围。方案示意如图6所示。

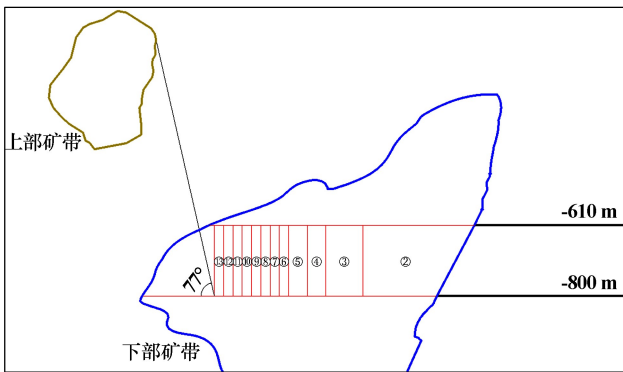


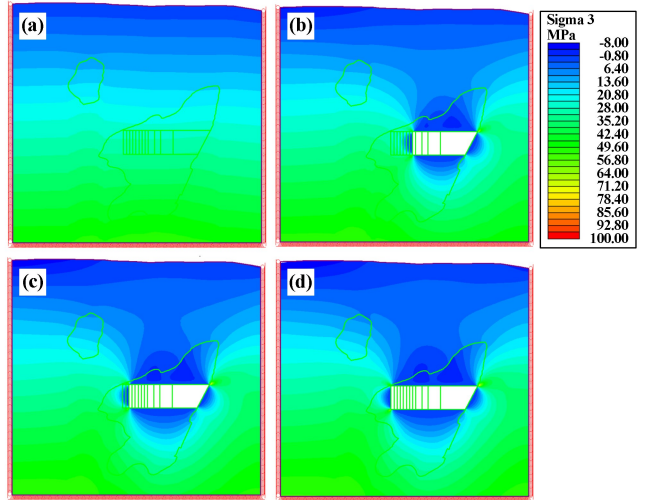
图6 开挖方案示意图

4.3 模拟计算结果

截取典型步骤,特征点设置于上部矿带靠近采动方向一侧,分别从应力场、位移场、塑性区特征分析确定临界开采范围。

4.3.1 应力场

典型应力场云图如图7所示。从应力场角度分析,下部矿带一期工程的采动对上部矿带未造成明显扰动。

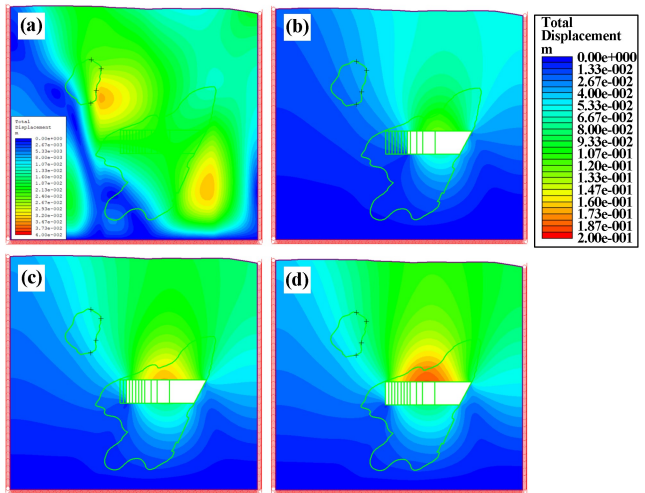


(a) 步骤1,静压平衡;(b) 步骤6,开挖425 m;
(c) 步骤11,开挖550 m;(d) 步骤13,开挖600 m

图7 典型步骤最大主应力云图

4.3.2 位移场

典型步骤位移云图如图8所示,并提取上部矿带靠近采动方向的特征点位移数据,绘制曲线如图9所示。由图9可见,下部矿带的采动对上部矿带的位移扰动较为明显,其中走向开挖550 m时特征点2的位移达到50.4 mm。根据欧洲岩移标准判断,达到可能失稳的临界,其开挖前后位移云图如图10所示。



(a) 步骤1,静压平衡;(b) 步骤6,开挖425 m;
(c) 步骤11,开挖550 m;(d) 步骤13,开挖600 m

图8 典型步骤位移云图

4.3.3 塑性区

典型塑性区分布如图11所示。从图11可以看出,

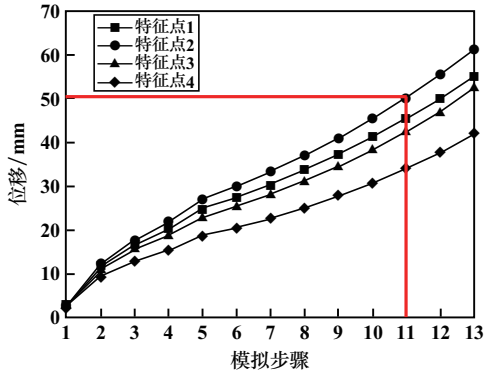


图9 上部矿带特征点位置位移曲线

4.4 综合分析

综合以上模拟的应力场、位移场、塑性区分布特征,分析结果汇总见表5。

表5 分析结果汇总

特征量	分析结果
应力	未造成明显扰动
位移	走向达到 550 m 时,对上部矿带造成明显扰动
塑性区	走向达到 550 m 时,对上部矿带造成明显扰动

从表5可以看出,位移、塑性区分析结果较为一致,在下部矿带一期工程开采过程中,走向达到550 m时对上部分矿带造成扰动。以该走向进尺为临界影响范围时,岩层移动角为73.3°。

5 结论

1) 分别采用工程类比法、理论计算法以及数值模拟法对下部矿带一期工程-800 m 以上前8年开采引起的岩层移动角进行了计算和分析,最小岩层移动角为70°~73.3°。

2) 采用临界开采范围数值模拟方法,迭代寻找最大待采区域,通过受影响区域的特征量分析确定临界影响边界,在下部矿带一期工程开采过程中,走向达到550 m时,对上部矿带造成扰动。

参考文献:

[1] 王运敏. 现代采矿手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2012.

[2] 付俊,周罕,唐绍辉,等. 急倾斜金矿体防水隔离矿柱预测研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(3):29-31.

[3] 袁义. 地下金属矿山岩层移动角与移动范围的确定方法研究[D]. 长沙:中南大学资源与安全工程学院, 2008.

[4] 曹建立,谭宝会,张东杰. 孟家堡子铁矿岩移控制方法研究[J]. 金属矿山, 2019(11):1-7.

[5] 张智博,高世坤,吴亚斌. 金属矿山地下开采对地表建筑物稳定性影响分析[J]. 中国矿业, 2019,28(8):84-90.

[6] 童大志,汪杰. 基于数值模拟的红岭铅锌矿岩层移动带圈定[J]. 有色金属(矿山部分), 2019,71(5):10-13.

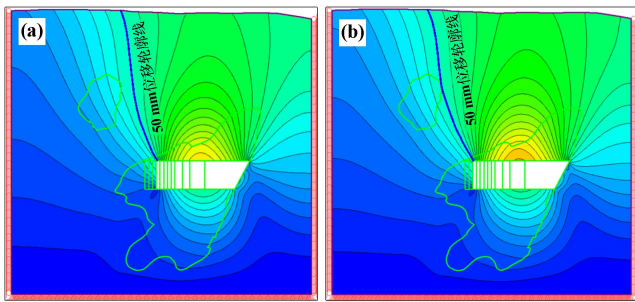
[7] 丁飞,付俊,周罕,等. 河流下开采岩层移动及地表变形预测研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(5):14-16.

[8] 李路,徐鹏,贺超,等. 刚果(金)某铜钴矿深部复杂矿体采场结构参数研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):32-36.

[9] 魏涛,王磊,李楠,等. 基于量子遗传算法的概率积分参数反演[J]. 金属矿山, 2018(8):118-122.

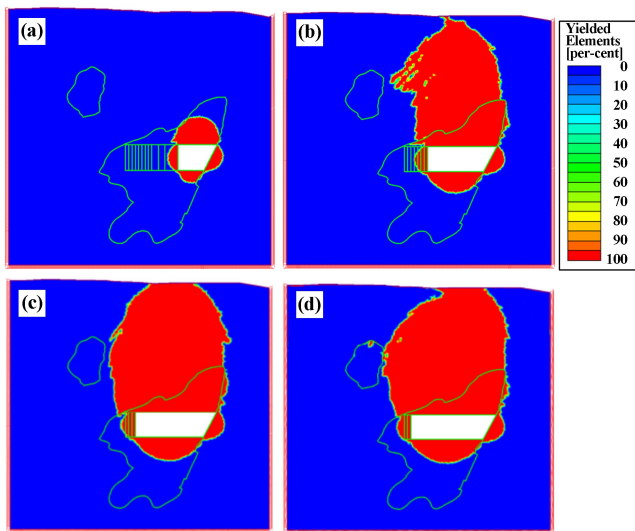
[10] 张东杰,任凤玉,王健多. 崩落法开采岩体冒落及岩移机理[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021,3(3):43-53.

引用本文: 郭晓强,王刚,黄敏,等. 相邻矿体临界开采范围的确定方法研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):26-31.



(a) 开挖前; (b) 开挖后

图10 临界开挖前后位移云图



(a) 步骤2,开挖200 m; (b) 步骤6,开挖425 m; (c) 步骤10,开挖525 m; (d) 步骤11,开挖550 m

图11 典型塑性区分布

随着下部矿带开挖逼近上部矿带,塑性区逐渐扩展,其中由步骤10走向开挖525 m至步骤11走向开挖550 m时,塑性区开始贯通至上部矿带范围,即当前采动范围开始对上部矿带构成扰动。从塑性区角度分析,下部矿带一期工程开采过程中,走向达到550 m时,会对上部矿带造成扰动。