

# 瓮福磷矿大塘矿阶段空场嗣后充填 采场结构参数设计

Design of Structural Parameters for the Subsequent Infill Quarry at the  
Urnford Phosphate Mine Stage Void Field

向品倪(七冶建设集团贵州化工建设有限责任公司, 贵州 贵阳 550014)

**摘要:**大直径深孔阶段空场嗣后充填法是开采倾斜极厚矿体安全有效方法,合理的采场结构参数是维持采场稳定的前提。以瓮福磷矿白岩矿区大塘矿为工程背景,采用 Mathews 稳定图法确定了一步骤采场结构参数,基于“隔一采一”的回采方案,利用数值软件 FLAC<sup>3D</sup> 研究了采场稳定性。结果表明,一步骤和二步骤采场结构参数均为 45 m × 15 m × 30 m 条件下,充填体及周围矿房均未达到其临界破坏强度,采场结构参数合理。研究结果为倾斜极厚矿体的安全回采提供了理论支撑。

**关键词:**阶段空场嗣后充填法; 倾斜极厚矿体; Mathews 稳定图法; 采场结构参数

**中图分类号:** TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)03-0019-07

**Abstract:** The large-diameter deep hole stage void field followed by filling is a safe and effective method for mining inclined very thick ore bodies, and a reasonable mining field structure parameter is a prerequisite for maintaining the stability of the mining field. The structural parameters of the one-step mining field were determined by the Mathews stability diagram method, and the stability of the mining field was investigated by the numerical software FLAC<sup>3D</sup> based on the “one step at a time” recovery scheme. The results show that the structural parameters of the one-step and two-step quarries are both 45 m × 15 m × 30 m. The filling body and the surrounding mine house do not reach their critical damage strength, and the quarry structural parameters are reasonable. The results of the study provide theoretical support for the safe recovery of inclined very thick ore bodies.

**Key words:** staged void field subsequent filling; inclined very thick ore body; Mathews stability diagram method; quarry structure parameters

## 1 前言

采场结构参数的选择与矿井的生产密切相关。合理的采场结构参数不仅可以保证矿井的安全开采,而且可以提高矿井的生产效率<sup>[1]</sup>。目前,国内学者对采场结构参数的设计做了大量的研究。马俊生等<sup>[2]</sup>采用 Mathews 稳定性图表法及数值模拟方法,得到了采场跨度的合理值。高进<sup>[3]</sup>采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件模拟了矿房顶底部充填高度、矿房顶底部和中间层水灰比强度对开采效果的影响,确定了嗣后充填材料的最佳配比。魏福海等<sup>[4]</sup>研究采场宽度、高度、长度与充填体强度等因素对高阶段空场嗣后充填的稳定性的影响,并提出了合理匹配值。马金亚等<sup>[5]</sup>采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件模

拟对采场结构参数进行了试验模拟,确定了最佳的采场结构参数。

以瓮福磷矿白岩矿区大塘矿为工程背景,采用理论计算得出了采场极限跨度,采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件对采场稳定性进行了研究,验证了“隔一采一”回采方式的可行性,所得采场结构参数可为类型工程提供一定的借鉴。

## 2 矿山概况

### 2.1 开采技术条件

瓮福磷矿白岩矿区大塘矿位于贵州省黔南布依族苗族自治州瓮安县境内,大塘矿是一个矿体边界平整、结构简单、构造破坏小、矿化均匀、厚度变化小的大型磷块岩矿床。矿层产于陡山沱组中,由于 G 夹层( $Z_1d^3$ )分隔,矿体分 a、b 两层。

#### a)b 矿层

赋存于  $Z_1d^4$  地层中,矿层呈层状产出,其产状与岩层产状基本一致,顶底界面平直、清楚、易辨。

[作者简介] 向品倪(1991—),男,汉族,本科,工程师,从事采矿工程研究。

[引用格式] 向品倪. 瓮福磷矿大塘矿阶段空场嗣后充填采场结构参数设计[J]. 中国矿山工程,2023,52(3):19-25.

地表 TC3 以北矿层相变尖灭,深部除 ZK102 矿层厚度小于可采厚度外,其余地段均达到可采厚度。区内矿层走向长 3 112 m,向南延伸与穿岩洞矿段 b 矿层相连,延深大于 600 m。单工程矿层厚 7.29 ~ 31.63 m,平均 17.35 m,倾角一般 50° ~ 80°。

b) a 矿层

赋存于陡山沱组下部 Z<sub>1</sub>d<sup>2</sup> 地层中,呈层状产出,矿层产状与围岩产状一致,顶底界面清楚、平直、易辩。矿层北起 3 线附近,区内矿层走向长 2 690 m,向南延伸至 15 线与穿岩洞矿段相接;倾斜延伸大于 600 m,矿层厚 1.22 ~ 23.09 m,平均

11.48 m,倾角一般 50° ~ 80°。

矿体直接顶板为浅灰色薄层状细粒含磷白云岩,矿层直接底板为浅灰、灰色中厚层状细粒白云岩,间夹不稳定的灰绿色水云母黏土岩或泥质白云岩 1 ~ 3 层。

2.2 采矿方法

大塘矿 1 200 m 中段矿体拟采用低阶段垂直走向大直径深孔空场嗣后充填采矿法,具体如图 1 所示。相比机械化盘区充填采矿,空场嗣后充填采矿法具有生产能力大、劳动生产率高以及安全性好的优点。但需要设计合理的采场结构参数,确保采矿安全高效生产。

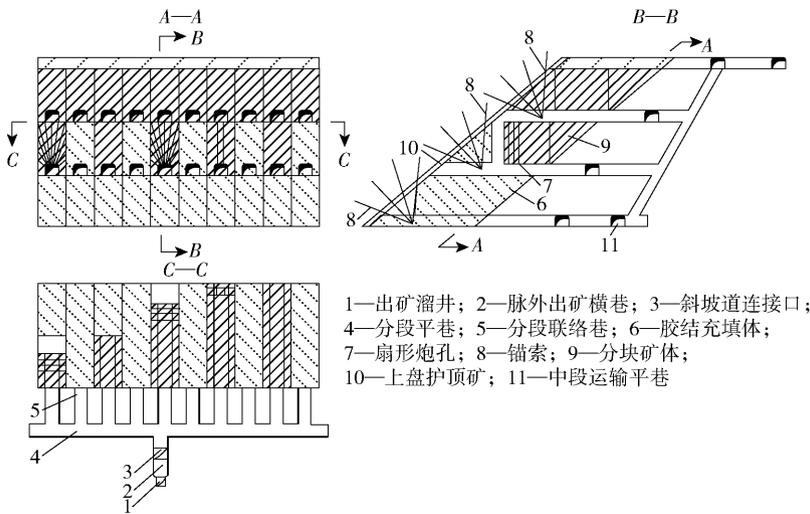


图 1 空场嗣后充填采矿法示意图

3 Mathews 稳定图法

3.1 采场极限跨度

地下开挖体无支护条件下最大跨度为

$$SPAN = 2ESR \cdot Q^{0.4}, \tag{1}$$

式中, Q 为分级指标, 矿岩取值 17; ESR 为开挖体支护比。

采场的宽度的大小影响长度的取值, 采用采场的合理宽度无支护条件下最大跨度理论求解, 然后根据采场的宽度计算采场长度。大塘矿 1 200 m 中段矿体拟采用低阶段垂直走向大直径深孔空场嗣后充填采矿法, 采用全尾砂胶结充填采空区, 采场可以看作是矿山的临时性巷道, 临时通道的 ESR 取值为 3.0 ~ 5.0, 计算可得无支护条件下最大跨度值为 18.6 ~ 31.0 m。考虑到安全系数, 一步骤矿房采场宽度为 14 ~ 16 m。

3.2 Mathews 图解法

1) 稳定性指数 N

Mathews 图解法是 MATHEWS 等基于矿山实践提出的岩石分类方法。Mathews 稳定性系数计算公式为<sup>[6]</sup>

$$N = Q' \cdot A \cdot B \cdot C, \tag{2}$$

式中, Q' 为修正后的 NGI 岩体开挖质量分级方法的分级指标值; A 为应力系数, 取值为 0.2; B 为岩体节理调整系数, 矿体取值为 0.85; C 为重力调整系数, 取值为 8。

分类指标值 Q 计算公式为<sup>[7]</sup>

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}, \tag{3}$$

式中, RQD 为岩石质量指数, 矿岩取值 17.0, 白云岩取值 20.1; J<sub>n</sub> 为岩体的节理数, 取值为 5; J<sub>r</sub> 为岩体的节理粗糙度系数, 取值为 3; J<sub>a</sub> 为岩体的节理蚀变系数, 取值为 0.7; J<sub>w</sub> 为岩体的节理水折减系数, 取

值1;SRF为应力折减系数,取值1。

计算可得矿岩、白云岩的 $Q'$ 值分别为32.4和35.5。

由式(2),式(3)计算采场顶板、侧帮、上盘的稳定性系数 $N$ 分别为10.8、33.5、5.6。

2) 水力半径计算

HADJIGEORGIU改进的Mathews稳定性图如图2所示,采用该图确定水力半径的大小,再由式(4)确定采场长度 $L$ 。

$$\begin{cases} L_{\text{顶板}} = \frac{2HR_{\text{顶板}} \cdot W}{W - 2HR_{\text{顶板}}} \\ L_{\text{两帮}} = \frac{2HR_{\text{两帮}} \cdot H}{H - 2HR_{\text{两帮}}} \\ L = \min\{L_{\text{顶板}}, L_{\text{两帮}}\} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $L_{\text{顶板}}$ 为由顶板确定的采场长度,m; $HR_{\text{顶板}}$ 为顶板水力半径,m; $W$ 为采场的宽度,m; $H$ 为采场的高

度,m; $HR_{\text{两帮}}$ 为由两帮确定的采场长度,m; $HR_{\text{两帮}}$ 为两帮的水力半径,m, $L$ 为采场长度,m。根据式(4)计算的水力半径见表1。

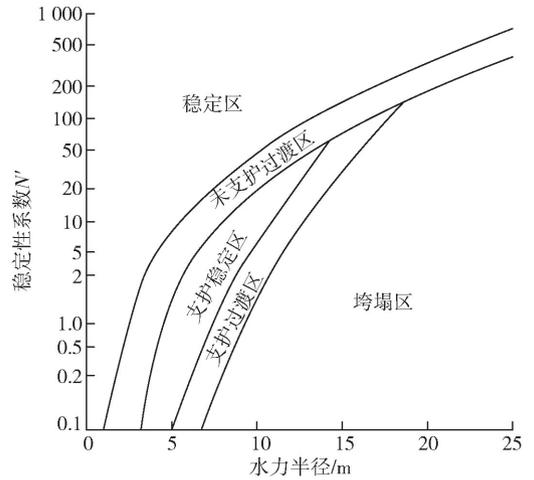


图2 Mathews稳定性系数与水力半径关系图

表1 水力半径计算结果

| 区域 | 岩性  | 水力半径/m |          |           |           |       |
|----|-----|--------|----------|-----------|-----------|-------|
|    |     | 稳定区    | 过渡区      | 支护稳定区     | 支护过渡区     | 垮塌区   |
| 顶板 | 矿体  | <6.3   | 6.3~8.8  | 8.8~11.2  | 11.2~13.1 | >13.1 |
| 上盘 | 白云岩 | <9.7   | 9.7~12.6 | 12.6~13.7 | 13.7~15.5 | >15.5 |
| 侧帮 | 矿体  | <4.8   | 4.8~7.0  | 7.0~10.1  | 10.1~11.9 | >11.9 |

根据采场极限跨度分析,一步骤矿房采场宽度暂定为14~16m。当采场跨度为15m、17m、19m、20m时,采场顶板长度和水力半径之间的关系如图3所示。

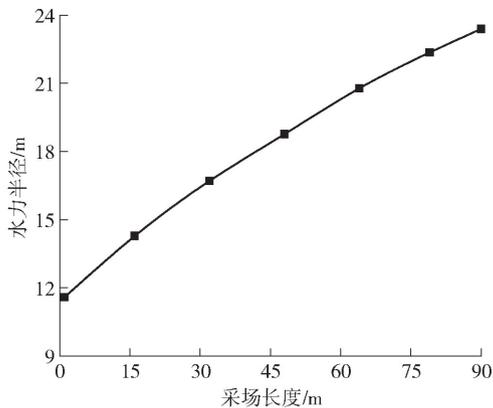


图3 采场顶板长度与水力半径关系曲线图

侧帮长度和水力半径之间的关系曲线如图4所示。从表1可知,支护过渡区的水力半径小于15.5m。采场高度取值100m时,此时采场的最大长度约为45m。

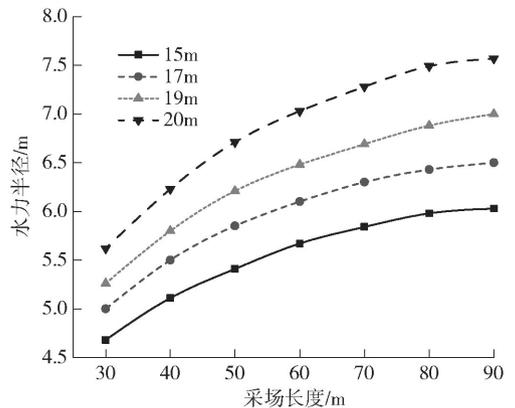


图4 采场侧帮长度与水力半径关系曲线图

结合图2、表1、图3可知,当采场长度小于90m,采场跨度为15~20m时,水力半径均小于9m,全部位于无支护过渡区;当采场跨度为15m,采场长度小于90m时,全部位于稳定区。不同采场

综合以上计算结果分析,采场跨度取值15m,高度取值30m,采场长度为45m,故一步骤采场结构参数取值为长45m×宽15m×高30m。

## 4 采场稳定性数值模拟

### 4.1 建立模型

建立如图5所示的三维数值模型,尺寸:长×宽=1 160 m×300 m,1 200 m中段以上采用真实地形图生成,高低不一,1 200 m中段以下高度140 m。模型中 $x$ 轴为沿矿体走向方向, $y$ 轴为垂直矿体走向方向, $z$ 轴为竖直方向,竖直方向自上而下分别为顶板、b矿层、矿体夹层、a矿层、底板,其中矿层、夹层厚度根据64#矿房剖面图取值。大塘矿主要岩体

力学参数见表2。

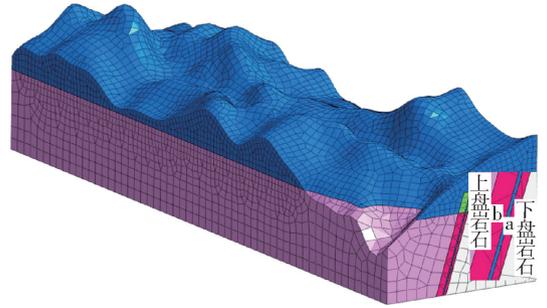


图5 三维数值模型图

表2 大塘矿主要岩体力学参数

| 名称     | 密度/<br>$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 弹性模量/<br>MPa | 泊松比   | 黏聚力/<br>MPa | 摩擦<br>角/ $(^\circ)$ | 抗拉<br>强度/MPa | 抗压<br>强度/MPa |
|--------|--------------------------------------|--------------|-------|-------------|---------------------|--------------|--------------|
| 顶板白云岩  | 2 680                                | 14 200       | 0.251 | 0.85        | 22.4                | 0.10         | 42.4         |
| 底板白云岩  | 2 630                                | 11 700       | 0.255 | 0.92        | 38.4                | 0.12         | 38.2         |
| 矿石     | 2 890                                | 14 300       | 0.253 | 0.22        | 45.2                | 0.09         | 30.4         |
| 砂岩     | 2 660                                | 8 300        | 0.261 | 0.20        | 44.1                | 0.02         | 29.7         |
| 胶结充填体  | 1 890                                | 550          | 0.260 | 0.90        | 33.0                | 0.50         | 5.2          |
| 非胶结充填体 | 1 450                                | 20           | 0.280 | 0.04        | 20.0                | 0.04         | 4.1          |

表3 1 200 m顶柱回采顺序表

| 矿房名称    | 64# | 64# | 62# | 62# | 60# | 60# | 63# | 63# | 61# | 61# |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 回采/充填顺序 | 1   | 2   | 2   | 3   | 3   | 4   | 4   | 5   | 5   | 6   |
| 开采状态    | 开采  | 充填  |

计算过程采用“隔一采一”的开采方案,采场矿房和矿柱尺寸相同,先进行矿房的开采后进行矿柱的开采,矿房开采完成后对其空区进行充填,等充填体稳固以后进行矿柱回采工作。矿块宽度为15 m,本次模拟64#矿房、62#矿房、60#矿房作为一步序矿房,63#矿房、61#矿房作为二步骤矿房,一步序矿房和二步骤矿房宽度相等,及尺寸为:长45 m×宽15 m×高30 m,相邻矿房凿岩布孔和充填作业同时进行,回采顺序见表3。

### 4.2 初始条件及边界条件

#### 1) 初始地应力场

竖直应力取自重力

$$V = hg \quad (5)$$

式中: $V$ 为竖直应力,N; $h$ 为顶板到地面的高度,m; $g$ 为重力加速度,取值 $9.8 \text{ m/s}^2$ 。

水平应力随深度按一定应力梯度变化,

$$H = kV \quad (6)$$

式中, $k$ 为侧压力系数, $k = \mu / (1 - \mu)$ ; $\mu$ 为泊松比。

#### 2) 模型边界条件

模型的上表面边界设置为法向应力约束,模型的底部和四周设置为固定位移约束。

### 4.3 数值模拟结果

#### 1) 矿房位移沉降分析

不同位置矿房依次开挖后,矿房位移分布如图6所示。

图6可以看出,64#矿房开采结束后周围未采矿房顶板顶部位置均呈现一定的受压变形,最大受压变形量为0.059 mm,但矿房底板底部出现受拉变形,最大受拉变形量为0.055 mm;64#矿房开采结束后采用高强度胶结充填,62#矿房开采后充填体受压变形最大,最大位移变形达0.797 mm;60#矿房回采后,周围最大位移变形仍出现在64#、62#矿房充填体中,最大位移变形量为1.01 mm,周围63#矿房及61#矿房最大受压变形为0.26 mm;二步骤63#矿房开采

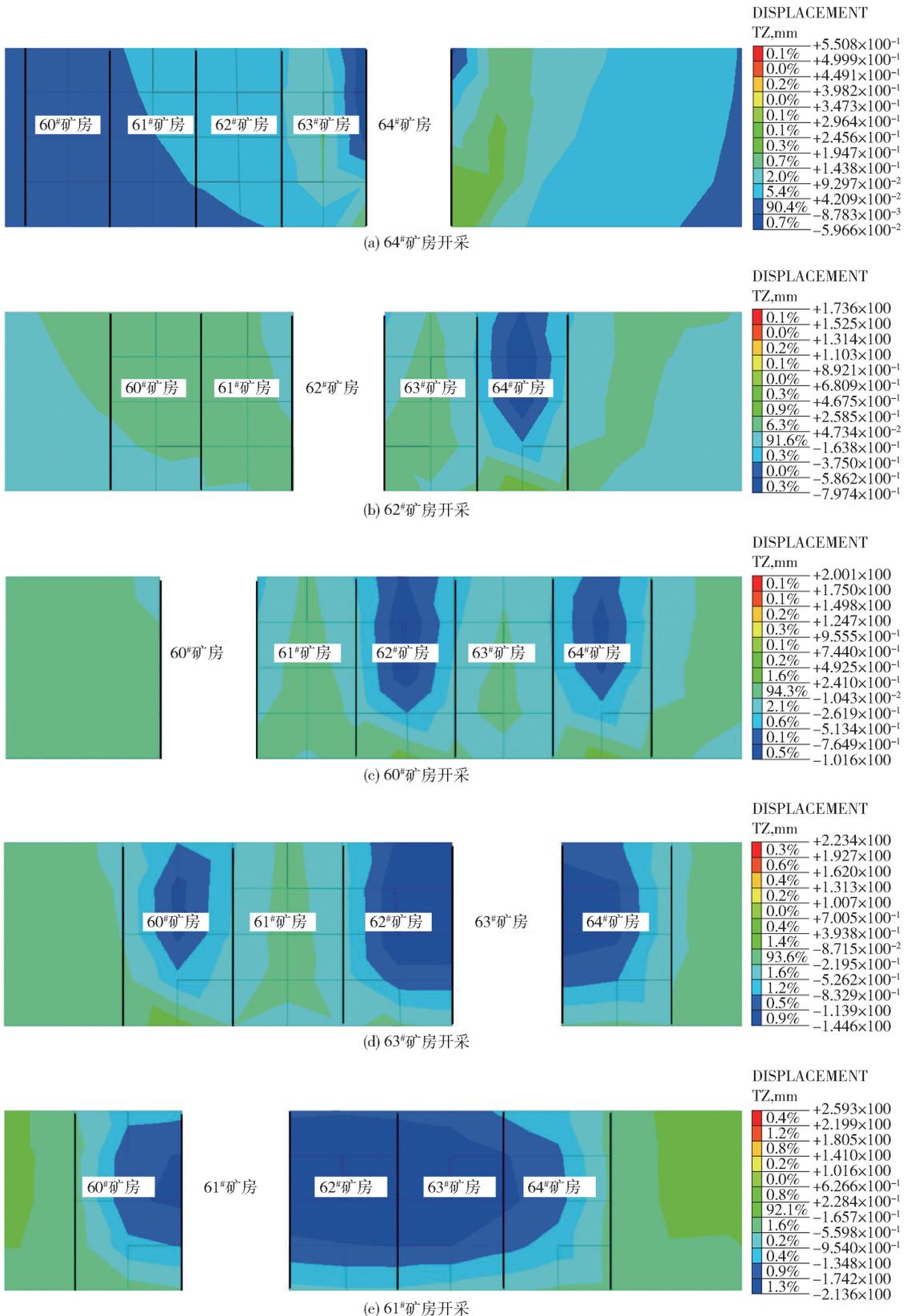


图6 矿房位移分布云图

结束后,64#矿房充填体、62#矿房充填体受压变形最为明显,最大值为1.44 mm,且最大变形区域明显增

加;二步骤61#矿房开采结束后,64#、63#、62#、60#充填体受压变形急剧增加,最大位移变形量为

2. 14 mm, 变形区域也呈翻倍增加。

### 2) 矿房最大主应力分析

不同位置矿房依次开挖后, 矿房最大主应力分

布如图7所示。

由最大主应力图7可看出, 每次回采都能引起最大主应力重新分布, 64#矿房回采后, 最大主应力

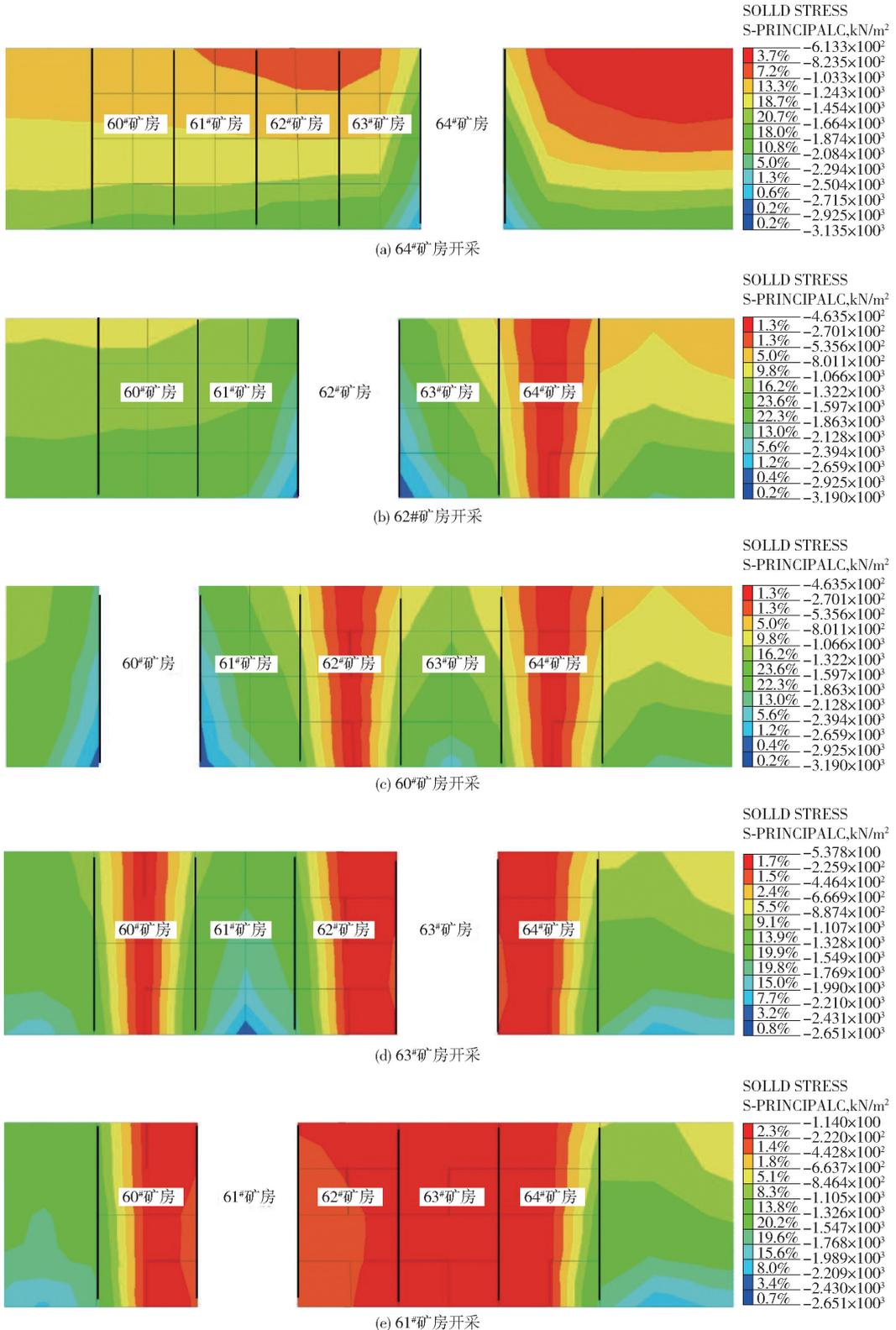


图7 矿房最大主应力云图

为压应力,最大压应力值为 3.1 MPa,分布区域为相邻矿房底部;62#矿房回采结束后,最大主应力为压应力,最大压应力值为 3.3 MPa,分布区域为相邻矿房底部,同时 64#矿房充填体也受最大主应力,但压应力值相对较小,值为 1.1 MPa;60#矿房回采结束后,最大主应力仍为压应力,最大压应力值为 3.2 MPa,且最大压应力分布区域增加,同时已完成充填的 64#、62#矿房也受最大主应力作用,最大压应力值为 1.1 MPa;随 61#矿房回采结束,已充填采场最大主应力仍为压应力,相应值也增大,最大值为 1.6 MPa,同时周围相邻未采采场所受最大主应力值也在增大,最大值为 2.7 MPa。

### 3) 采场顶板稳定性分析

各方案下采场跨度和采场顶板最大垂直位移关系如图 8 所示。

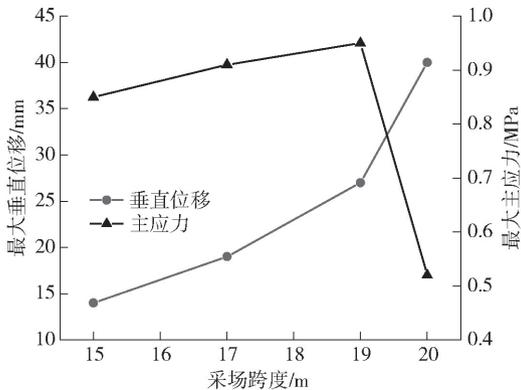


图 8 不同采场跨度下顶板最大主应力和垂直位移曲线图

由图 8 可知,采场开挖之后,采场顶板最大垂直位移与采场跨度呈非线性增加。当采场跨度为 15 m、17 m、19 m、20 m 时顶板沉降量分别为 14 mm、19 mm、27 mm、40 mm。采场跨度 15 m 增加到 17 m 时,顶板沉降量增幅约 36%;采场跨度 17 m 增加到 19 m 时,顶板沉降量增幅约 42%;采场跨度 19 m 增加到 20 m 时,顶板沉降量增幅约 48%。采场跨度超过 15 m 后,顶板最大垂直位移值增幅不断增大,顶板稳定性不断下降。同时可以看出当采场跨度在 15~19 m 时,采场最大主应力随采场跨度的增加而平缓增加,采场跨度增大至 20 m 后,最大主应力发生急剧下降,围岩应力变化较为剧烈,采场处于失稳

状态。综合可知,采场跨度 15 m,即采场结构参数为 45 m × 15 m × 30 m(长 × 宽 × 高)时,采场稳定性较好。

## 5 结论

(1) 大直径深孔空场嗣后充填采矿法可高效安全开采急倾斜极厚磷矿。采用采场极限跨度理论,确定了矿房采场安全宽度为 14~16 m;通过 Mathews 稳定性系数与水力半径关系,确定了一步骤采场最佳结构参数为 45 m × 15 m × 30 m(长 × 宽 × 高)。

(2) 当一步和二步骤采场结构参数均为 45 m × 15 m × 30 m 时,通过数值模拟分析了各步骤回采结束后,相邻未采矿房受压应力作用明显,最大压应力值为 2.7 MPa,已充填采场受拉应力作用明显,最大拉应力值为 0.047 MPa,即充填体及周围矿房不论受拉还是受压作用,均未达到其临界破坏强度;验证了“隔一采一”回采方式的可行性。

### [参考文献]

- [1] 郝益民,宋卫东,张凯,等. 阶段空场嗣后充填采场结构参数优化研究[J]. 矿业研究与开发,2020,40(3): 15-19.
- [2] 马俊生,任高峰,张聪瑞,等. 基于稳定性图表法和数值模拟的采场跨度优化研究[J]. 中国矿山工程,2017,46(6):7-14.
- [3] 高进. 基于均匀实验的萨热克铜矿嗣后充填参数数值模拟研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(1):16-21.
- [4] 魏福海,王忠强. 高阶阶段采场充填体强度影响因素敏感性分析[J]. 有色金属(矿山部分),2021,73(2): 60-63,78.
- [5] 马金亚,廖九波,王筱添. 黄沙坪矿区阶段空场嗣后充填法采场结构参数研究[J]. 采矿技术,2022,22(4): 1-3.
- [6] VALLEJOS J A, DELONCA A, FUENZALIDA J, et al. Statistical analysis of the stability number adjustment factors and implications for underground mine design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2016,87:104-112.
- [7] BARTON N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2002, 39(2):185-216.