

# 某矿山上向分层点柱充填采矿法采场结构参数优化分析\*

张志军<sup>1</sup>, 杨宁<sup>2,3</sup>, 任清霖<sup>2,3</sup>, 林卫星<sup>2,3</sup>

- 中冶集团铜锌有限公司, 北京 100028;
- 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南长沙 410012;
- 国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南长沙 410012)

**摘要:**随着矿山开采深度的增加,空场采矿法面临着更大的安全隐患与环境压力。充填采矿法作为一种安全和绿色的采矿技术,已广泛应用于矿山开采中。以某大型铜矿为研究对象,结合理论分析和数值模拟方法,对上向分层点柱充填采矿法的采场结构参数进行优化研究,系统分析采场长度、点柱尺寸和点柱中心间距等参数对采场稳定性和矿山生产能力的影响。结果表明,当采场长度为65 m,点柱尺寸为5 m×5 m,点柱中心间距为15 m时,矿山采场的稳定性较高且生产效率最佳。该采场结构参数优化方案不仅能有效保障矿山的安全开采,还能提高资源利用率,为类似矿山的充填开采技术应用提供了科学依据。

**关键词:**上向分层点柱充填采矿法;采场结构参数;采场长度;点柱尺寸;点柱中心间距

**中图分类号:**TD853.34 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2763(2025)10-0043-10

## Optimization Analysis of Stope Structure Parameters of Upward Layered Point Pillar Filling Mining Method in a Mine

ZHANG Zhijun<sup>1</sup>, YANG Ning<sup>2,3</sup>, REN Qinglin<sup>2,3</sup>, LIN Weixing<sup>2,3</sup>

- MCC Tongsin Resources Ltd., Beijing 100028, China;
- Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
- Research Center for National Metal Mining Engineering Technology, Changsha, Hunan 410012, China)

**Abstract:** With the increase of mining depth, open stope mining method is facing greater safety hazards and environmental pressure. Filling mining method, as a safe and green mining technology, has been widely used in mining. Taking a large copper mine as the research object, combined with theoretical analysis and numerical simulation methods, the stope structure parameters of upward layered point pillar filling mining method were optimized, and the effects of stope length, point pillar size and point pillar center spacing on stope stability and mine production capacity were systematically analyzed. The results show that when the stope length is 65 m, the point pillar size is 5 m×5 m, and the point pillar center spacing is 15 m, the stability of the mine stope is high and the production efficiency is the best. The optimization scheme of stope structure parameters can not only effectively guarantee the safe mining of the mine, but also improve the utilization rate of resources, which provides a scientific basis for the application of filling mining technology in similar mines.

**Key words:** Upward layered point pillar filling mining method, Stope structural parameter, Stope length, Point pillar size, Point pillar center spacing

## 0 引言

在全球经济与社会发展进程中,矿产资源的开发和利用是支撑工业生产、推动经济增长的重要基

石。通过优化采矿方法的采场结构参数,可以显著提高采矿效率,降低采矿过程中潜在的风险。

在采场最佳结构参数优选方面,众多学者运用理论分析<sup>[1-2]</sup>、数值模拟及典型采场工业试验<sup>[3-4]</sup>等

\* 收稿日期:2025-07-17

基金项目:中国五矿集团有限公司全国重点实验室专项资金项目(2024GZKJ04)

作者简介:张志军(1982—),男,河北滦平人,硕士,高级工程师,主要从事采矿技术与生产管理工。E-mail:zhangzhijun@mcc-mining.com

通信作者:杨宁(1992—),男,宁夏中卫人,硕士,高级工程师,主要从事采矿工程技术研究。E-mail:34040682@qq.com

方法开展大量研究。采场结构参数是评估矿山采矿方法是否合理且是否经济有效的重要因素之一,矿岩的物理力学性质、含水量及节理裂隙发育程度等因素均会对采场结构参数产生影响<sup>[5-6]</sup>。赵兴东等<sup>[7]</sup>通过采用 RMR 岩体分级和 Mathews 稳定图解法对西藏帮中锌铜矿的采场结构参数进行了优化。卢西洲等<sup>[8]</sup>通过 Mathews 稳定图解法设计了不同的试验方案,利用数值模拟获得不同进路参数对采场的影响,构建了回采进路参数优化综合评价指标体系。随着计算机技术的不断发展,各数值模拟软件在模拟分析矿体开挖后的破坏、失稳、大变形等方面的效果较好,在指导矿山安全生产方面具有较高的可信度<sup>[9-13]</sup>。

在深部充填开采条件下,采场结构参数直接关系到顶板稳定、充填体承载与生产效率之间的耦合平衡。以往研究普遍通过经验图解法或单一数值工况开展参数优化,而对“特定工程背景下的差异化约束—参数域—稳定性结果”的系统描述仍存在不足。更为关键的是,矿体上部存在需原地保护的文物,地表扰动与变形控制目标远比一般矿山严格,必须在最小化地表影响的前提下实现安全高效回采。

基于此,本文构建了“Mathews 稳定性图解法—暴露面积与水力半径约束—FLAC3D 多工况验证—工业试验”的闭环技术路线,先以稳定性系数  $N$  与水力半径界限推导出暴露面积,再对不同工况下采场的应力、位移、塑性区演化规律进行数值模拟对比分析,最后通过现场试验与监测进行验证。相较于仅凭经验或单一工况研究,该路线能够在“严格地表控制目标”与“稳定—效率统筹”的双重约束下,给出更具可实施性的参数配置方案与组织管理策略。

### 1 工程概况

某铜矿位于高原中东部,地处某山脉的北西侧,紧靠山前冲积平原,为高原丘陵地貌,地势较高,地形起伏较大。矿区南、东、北三面环山,形成了一个小型盆地。主矿体分布长度为 1 850 m,矿体最大真厚度为 210 m,矿体倾角为 35°~40°。

矿区设计自下而上开采,采用上向分层点柱充填采矿法(见图 1),盘区沿走向布置,宽为矿体水平厚度,中段高度为 75 m,分段高度为 25 m,分层高度为 4 m,盘区之间留 10 m 间柱,间柱不回采,盘区内布置点柱。

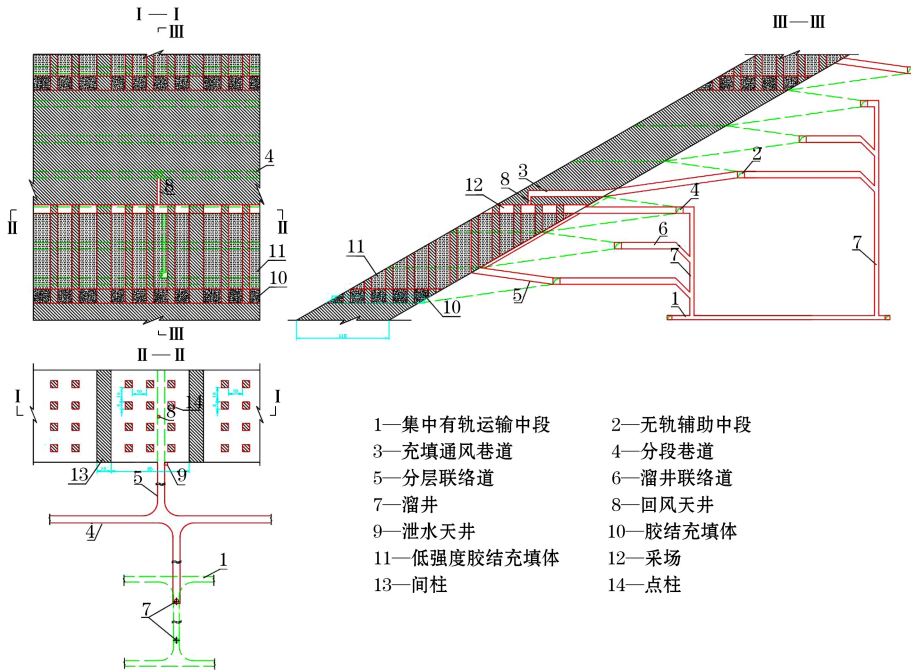


图 1 上向分层点柱充填采矿法示意

Fig.1 Schematic diagram of upward layered point pillar filling mining method

#### 1.1 矿岩物理力学性质

矿体围岩和夹石主要为洛依赫瓦尔组碳酸盐、含陆源碎屑的碳酸盐组成的变质岩,岩性为角闪岩、

黑云母白云石片岩、白云石大理岩、黑云母石英片岩、碳质石英片岩、大理岩等。矿岩体物理力学参数见表 1。

表 1 矿岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

岩性	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	抗拉强度/ MPa	单轴抗压 强度/MPa	弹性模量 <i>E</i> / GPa	泊松比 $\mu$	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
角闪岩	2 870	5.11	62.05	38.48	0.26	11.78	54.09
黑云母白云石片岩	2 970	3.91	45.88	38.58	0.22	10.24	45.11
白云石大理岩	2 840	8.86	71.58	36.28	0.25	11.56	58.85
黑云母石英片岩	2 870	12.19	96.10	42.06	0.15	17.21	54.49
碳质石英片岩	2 790	6.68	70.60	38.16	0.21	13.35	52.98
大理岩	2 760	6.08	87.45	31.12	0.18	13.03	55.23
碳酸岩石英片岩	2 810	7.15	66.36	48.92	0.16	10.87	52.33
方解石石英岩	2 890	8.94	71.14	51.35	0.22	11.38	53.36

## 1.2 矿岩稳定性评价

矿区岩体分级汇总对比见表 2。采用 RQD 法、RMR 法、Q 法及岩土规范法对白云石大理岩、黑云母石英片岩、碳质石英片岩及碳酸岩石英片岩等 4 种矿岩体的岩体质量进行评价,综合多种方法可知,白云石大理岩、黑云母石英片岩、碳质石英片岩及碳酸岩石英片岩的岩体质量等级为Ⅲ级。

表 2 矿区岩体分级汇总对比

Table 2 Summary and comparison of rock mass classification in the mining area

岩性	RQD 法	RMR 法	Q 法	岩土 规范法	综合 等级
白云石大理岩	Ⅲ	Ⅲ	好(Ⅱ <sub>2</sub> )	Ⅲ	Ⅲ
黑云母石英片岩	Ⅲ	Ⅲ	一般(Ⅲ <sub>1</sub> )	Ⅱ	Ⅲ
碳质石英片岩	Ⅲ	Ⅲ	好(Ⅱ <sub>2</sub> )	Ⅲ	Ⅲ
碳酸岩石英片岩	Ⅲ	Ⅲ	好(Ⅱ <sub>2</sub> )	Ⅲ	Ⅲ

## 2 采场暴露面积推荐参数理论计算

Mathews 稳定性图解法为地下矿山设计的经验方法,其核心以稳定性系数  $N$  和水力半径  $R$  的坐标域判别暴露面的稳定性。该方法基于大量现场数据,归纳建立边界曲线,并通过 Potvin 对数据集与稳定域进行扩展<sup>[14-15]</sup>。本文仅将其用于限定上向分层点柱式充填采场关键参数组合的初步可行域,最终以数值模拟与现场监测验证为准。

### 2.1 Mathews 稳定性图解法应用

根据开采设计,采用上向分层点柱充填采场。为保障开采作业的安全性,需对该采矿方法下采场顶板的稳定性进行研究。

矿房顶板暴露面面积与其周长的比值为形状系数(水力半径),通过该系数,可以计算出暴露面的短边长度,近似得出矿房的跨度。本次设计采用 Potvin 修订版稳定性图表,可以通过稳定性系数  $N$

确定稳定区水力半径  $R_1$  和崩落区水力半径  $R_2$ 。不同岩性顶板稳定性系数计算结果及水力半径见表 3。

表 3 不同岩性顶板稳定性系数及水力半径

Table 3 Stability coefficient and hydraulic radius of roof in different rook types

岩性	修正的岩 体综合质 量指数 $Q'$	岩石应 力系数 A	节理方 位系数 B	重力调 整系数 C	$N$	$R_1$	$R_2$
白云石大理岩	10.00	1	0.55	3.30	18.15	6.20	8.61
矿体	10.83	1	0.55	3.30	19.66	6.27	8.63

对于白云石大理岩,当采场暴露面积的水力半径为 6.20 m 时,顶板处于极限稳定状态;当采场极限暴露面积的水力半径达到 8.61 m 时,顶板达到极限冒落状态。对于矿体,当暴露面积的水力半径为 6.27 m 时,顶板处于极限稳定状态;当极限暴露面积的水力半径达到 8.63 m 时,顶板达到极限冒落状态。

为将 Mathews 稳定性图解法给出的允许水力半径  $R_1$  转化为上向分层点柱式充填采场的点柱网格参数,记矿房有效宽度为  $B$ ,点柱中心间距为  $s$ ,点柱边长为  $d$ 。对于点柱网格围成的重复单元,其等效净暴露短边可近似取  $s-d$ ,基于净暴露面积与周长的关系,可计算单元的等效水力半径  $HR_{\text{cell}}$ 。筛选准则为:

$$HR_{\text{cell}}(s, d; B) \leq R_1 \quad (1)$$

$$A_{\text{net}}(s, d; B) \leq A_{R_1}(B) \quad (2)$$

$$\frac{L}{B} \leq 4:1 \quad (3)$$

式中: $A_{R_1}(B)$ 为由  $R_1$  反推的允许暴露面积上限; $A_{\text{net}}$ 为顶板暴露面积; $L$ 为采场长度,长宽比采用 4:1 约束复核。将对应的  $R_1$  代入,得到可行的点柱中心间距  $s=13\sim 15$  m。

### 2.2 采场暴露面积估算

基于以上分析,选取代表性组合  $s=13\sim 15$  m,

$d=5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 、 $6\text{ m}\times 6\text{ m}$ ，计算点柱与点柱之间的暴露面积及等效水力半径，结果见表 4。由表 4 可知，在白云石大理岩与矿体两类顶板条件下，中心间距 13~15 m 工况对应的暴露面积均处于由  $R_1$  约束反推的允许区间。

况总单元数约为  $9.2\times 10^6$ ，围岩与矿体采用 Mohr-Coulomb 模型，底部采用固定约束，约束三向位移，四周采用水平速度约束，固定轴向位移，模型最顶部为自由面。在 Z 轴负方向施加重力加速度，大小为  $10\text{ m/s}^2$ 。采用重力+侧压系数建立初始应力场并进行平衡。模型内包含点柱、间柱、充填体等，采场长度为 55~75 m，为形成对照方案，宽度统一设为 40 m，间柱宽 10 m，点柱尺寸为  $(4\text{ m}\times 4\text{ m})\sim(6\text{ m}\times 6\text{ m})$ ，中心间距为 14~16 m，分层高度为 4.0 m。采场位于上向分层点柱充填采矿业应力最大处，即 1 945 m 中段。

表 4 上向分层点柱充填采矿业采场暴露面积  
Table 4 Stope exposed area of upward layered point pillar filling mining method

岩性	水力半径 $R_1/\text{m}$	暴露面积/ $\text{m}^2$		备注
		中心间距 13 m	中心间距 15 m	
白云石大理岩	6.20	672	1 035	近似值
矿体	6.27	672	1 146	近似值

综上所述，各类矿岩采场中，点柱与点柱之间的暴露面积为  $672\sim 1\ 146\text{ m}^2$ ，考虑到上向水平充填采矿业采场包含多排(列)点柱，结合点柱间暴露面积与采场结构之间的关系，推算出上向分层点柱充填采矿业采场的长度为 52~76 m。

### 3 数值模拟分析

#### 3.1 数值模拟方案

根据矿山的地质条件及上向分层点柱充填采矿业的特点，结合相关资料，可知上向分层点柱充填采矿业盘区沿走向布置，长为 65 m，宽为矿体水平厚度，盘区之间留 10 m 间柱，盘区内布置  $5\text{ m}\times 5\text{ m}$  的点柱，中心间隔距离为 15 m。基于 Mathews 稳定性图解法计算得出的顶板暴露面积为  $672\sim 1\ 146\text{ m}^2$ ，设计了 7 种模拟工况，见表 5。其中，通过工况一、工况二、工况三验证采场长度合理性；通过工况二、工况四、工况五验证点柱尺寸合理性；通过工况二、工况六、工况七验证点柱中心间距合理性。

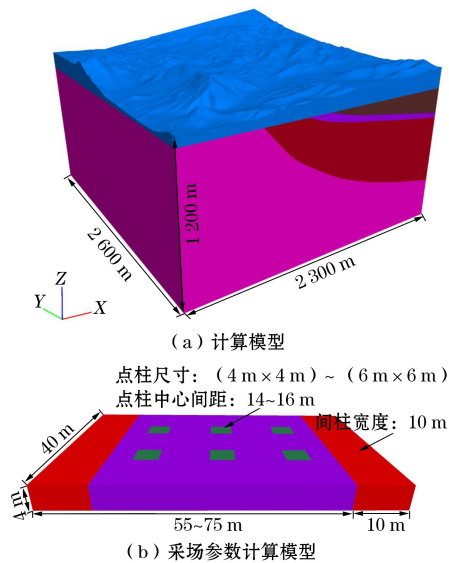


图 2 数值计算三维模型

Fig.2 Three-dimensional model of numerical calculation

本次数值模拟计算单个盘区采场结构参数，模拟所用物理力学参数见表 6。在数值模拟过程中，充填体强度满足设计规范，暴露时间控制与充填体质量均符合现场规范要求。

表 5 上向分层点柱充填采矿业采场结构参数模拟方案  
Table 5 Simulation schemes of stope structural parameters of upward layered point pillar filling mining method

工况	点柱尺寸/m	点柱中心间距/m	采场长度/m	间柱宽度/m
工况一	5×5	15	55	10
工况二	5×5	15	65	10
工况三	5×5	15	75	10
工况四	4×4	15	65	10
工况五	6×6	15	65	10
工况六	5×5	14	65	10
工况七	5×5	16	65	10

表 6 模拟所用各材料物理力学参数

Table 6 Physical and mechanical parameters of each materials used in the simulation

材料	密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	抗拉 强度/ MPa	弹性 模量/ GPa	泊松 比	黏聚 力/ MPa	内摩 擦角/ ( $^\circ$ )
白云石大理岩	2 840	0.41	6.889	1 0.25	1.78	38.3
黑云母石英片岩	2 870	0.36	5.691	2 0.22	1.23	33.1
碳质石英片岩	2 790	0.43	5.863	1 0.21	1.32	34.2
碳酸岩石英片岩	2 810	0.42	5.763	5 0.22	1.26	33.5
低强度充填体(1 MPa)	1 675	0.10	0.250	0 0.29	0.27	16.5
高强度充填体(3.0 MPa)	1 900	0.30	0.400	0 0.26	0.5	18.0

#### 3.2 采场结构参数计算模型

建立的数值模拟分析模型如图 2 所示。典型工

### 3.3 模拟结果分析

#### 3.3.1 采场长度模拟结果分析

为确定上向分层点柱充填采矿业法合理采场长度,对比工况一、工况二和工况三,分析开采扰动影响下应力、位移、塑性区的分布规律,得出不同采场长度下采场顶板的稳定状态。图3为采场长度对比方案俯视图,图4至图7为不同采场长度下采场的应力云图、塑性区分布云图及垂直位移云图。

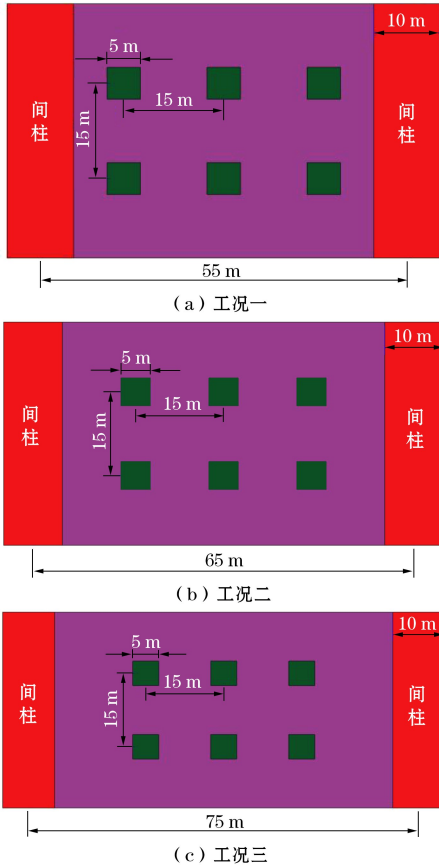
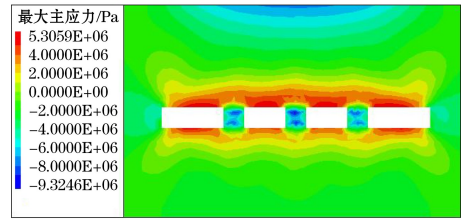
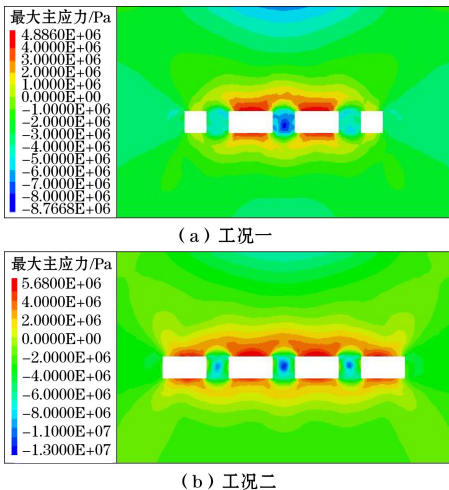
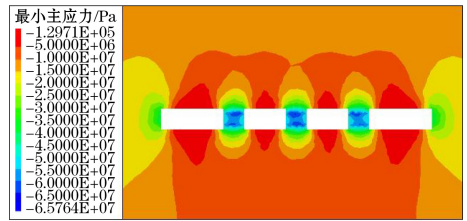
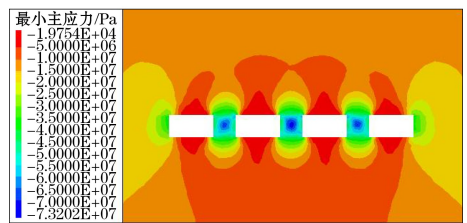
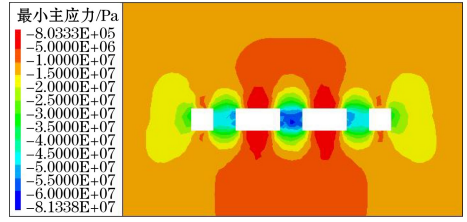


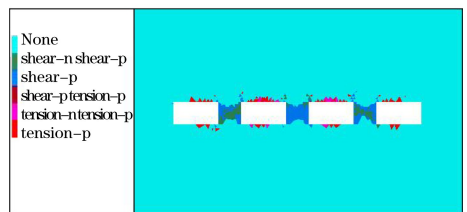
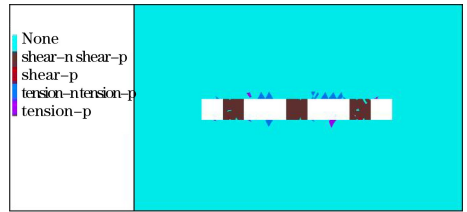
图3 不同采场长度下对比方案俯视图  
Fig.3 Vertical views of comparison schemes under different slope lengths



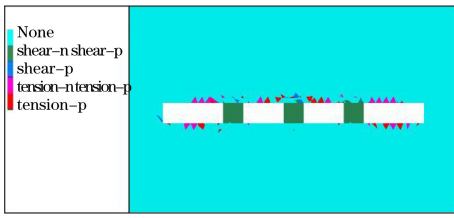
(c) 工况三  
图4 不同采场长度下采场最大主应力云图  
Fig.4 Maximum principal stress cloud diagrams of slope under different slope lengths



(a) 工况一  
(b) 工况二  
(c) 工况三  
图5 不同采场长度下采场最小主应力云图  
Fig.5 Minimum principal stress cloud diagrams of slope under different slope lengths

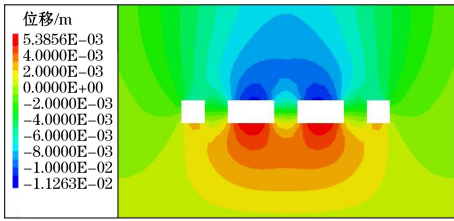


(a) 工况一  
(b) 工况二

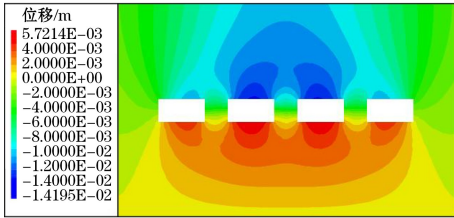


(c) 工况三

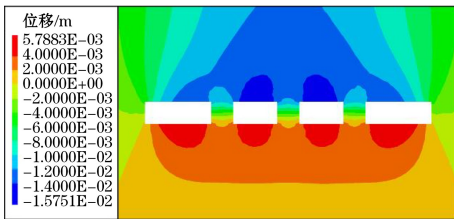
图6 不同采场长度下采场塑性区分布云图  
Fig.6 Plastic zone distribution cloud diagrams of slope under different slope lengths



(a) 工况一



(b) 工况二



(c) 工况三

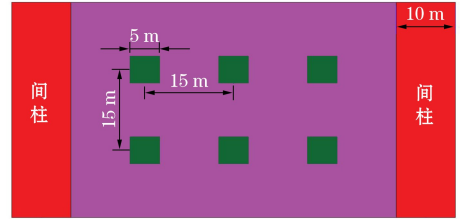
图7 不同采场长度下采场垂直位移云图

Fig.7 Vertical displacement cloud diagrams of slope under different slope lengths

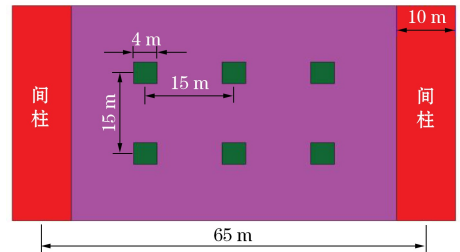
由图4和图5可知,采场回采后,拉应力主要集中在采场顶板净暴露跨中内缘,其次在端部转角区;点柱冠部呈压应力集中现象,3种工况下应力值差别较小。由图6可知,随着采场长度的增加,采场顶板塑性区范围逐渐扩大,当采场长度为75m时,采场顶板部分塑性区已连成片,点柱上方也存在大量塑性区,可能导致点柱破坏,进一步引起采场失稳。由图7可知,采场顶板下沉量随着采场长度的增加而增大,其最大下沉量为11.3~15.8mm,3种工况相差较小。综合分析可知,当采场长度为75m时,采场顶板可能存在失稳,当采场长度为55~65m时,其顶板较为稳定,又因采场长度越长,矿山生产能力越大。因此,推荐上向分层点柱充填采矿法采场长度为65m。

### 3.3.2 点柱合理尺寸模拟结果分析

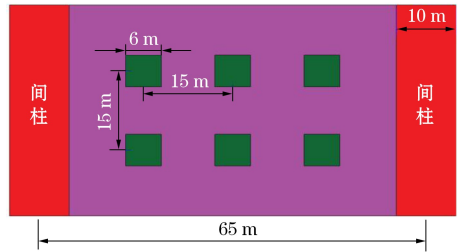
为了确定上向分层点柱充填采矿法的合理点柱尺寸,对比工况二、工况四和工况五,分析开采扰动影响下应力、位移、塑性区的分布规律,得出不同点柱尺寸下采场稳定状态。图8为点柱尺寸对比方案俯视图,图9至图12为不同点柱尺寸下采场应力、塑性区及位移云图。



(a) 工况二



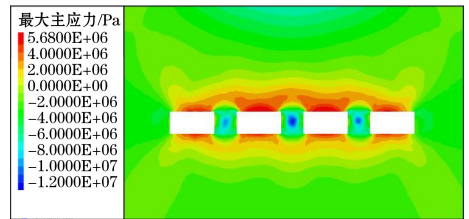
(b) 工况四



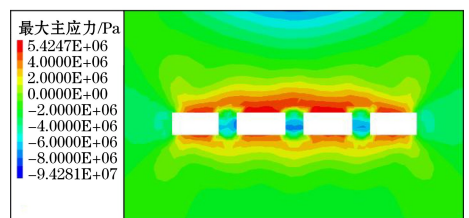
(c) 工况五

图8 不同点柱尺寸下对比方案俯视图

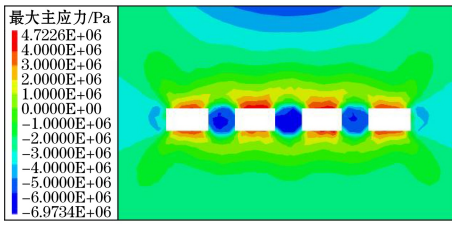
Fig.8 Vertical views of comparison schemes under different pillar sizes



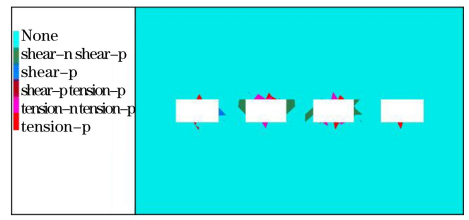
(a) 工况二



(b) 工况四



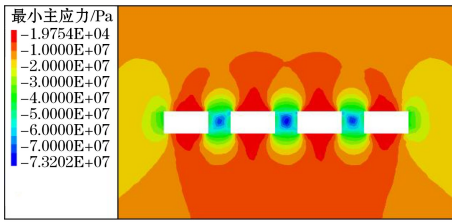
(c) 工况五



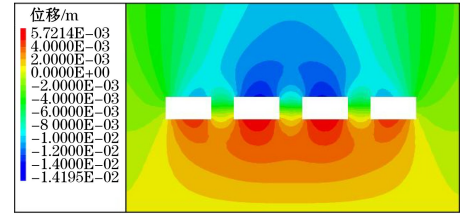
(c) 工况五

图9 不同点柱尺寸下采场最大主应力云图  
Fig.9 Maximum principal stress cloud diagrams of stope under different pillar sizes

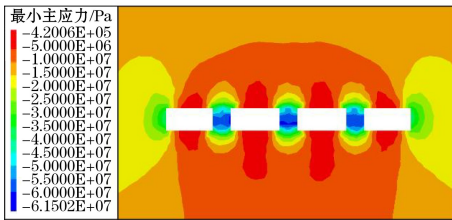
图11 不同点柱尺寸下采场塑性区分布云图  
Fig.11 Plastic zone distribution cloud diagrams of stope under different pillar sizes



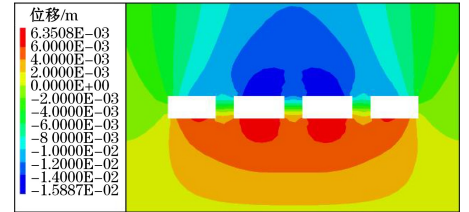
(a) 工况二



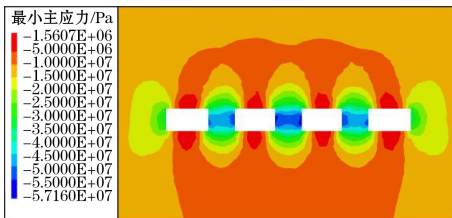
(a) 工况二



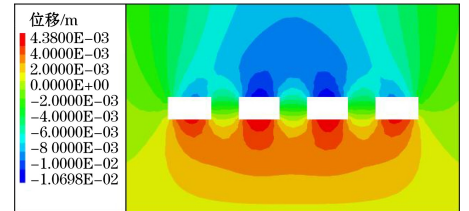
(b) 工况四



(b) 工况四



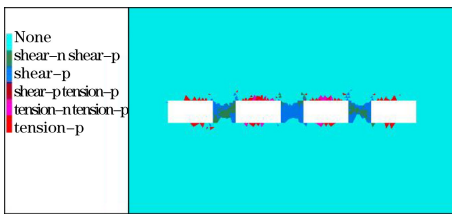
(c) 工况五



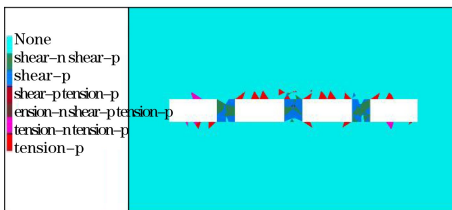
(c) 工况五

图10 不同点柱尺寸下采场最小主应力云图  
Fig.10 Minimum principal stress cloud diagrams of stope under different pillar sizes

图12 不同点柱尺寸下采场垂直位移云图  
Fig.12 Vertical displacement cloud diagrams of stope under different pillar sizes



(a) 工况二



(b) 工况四

由图9和图10可知,3种工况采场回采后,拉应力主要出现在采场暴露面积最大处,即采场顶底板,而压应力主要集中于点柱内,且3种工况应力值差别不大。由图11可知,随着采场内点柱尺寸的减小,采场顶板塑性区范围逐渐扩大,当点柱尺寸为4 m×4 m时,采场顶板部分塑性区已连成片,点柱上方也存在大量塑性区,可能导致点柱破坏,进一步引起采场失稳。由图12可知,采场顶板下沉量随着点柱尺寸的减小而增大,采场顶板最大下沉量为10.7~15.9 mm,3种工况相差也较小。综合分析可知,当点柱尺寸为4 m×4 m时,采场顶板可能存在失稳,当点柱尺寸为5 m×5 m或6 m×6 m时,采场顶板较为稳定,又因点柱尺寸越大,矿石损失率越大。因此,推荐上向分层点柱充填采矿法点柱尺寸为5 m×5 m。

### 3.3.3 点柱合理中心间距模拟结果分析

为了确定上向分层点柱充填采矿法合理点柱中心间距,对比工况二、工况六和工况七,分析开采扰动影响下应力、位移、塑性区的分布规律,得出不同点柱中心间距下采场稳定状态。图 13 为点柱中心间距对比方案俯视图,图 14 至图 17 分别为不同点柱中心间距下采场的应力、塑性区及位移云图。

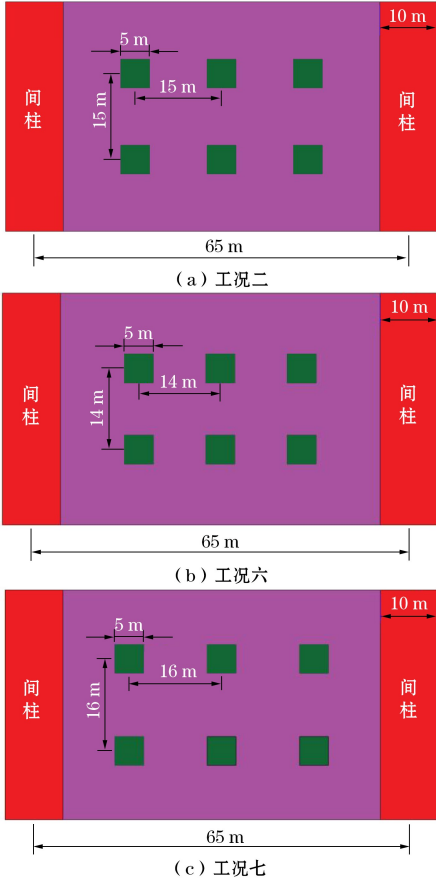
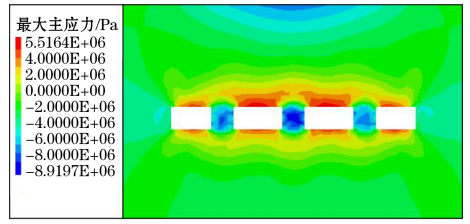
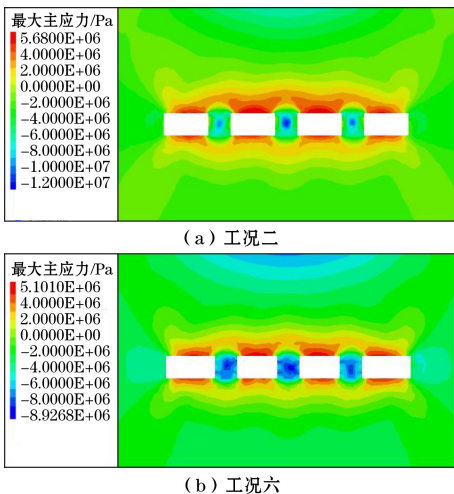


图 13 不同点柱中心间距下对比方案俯视图

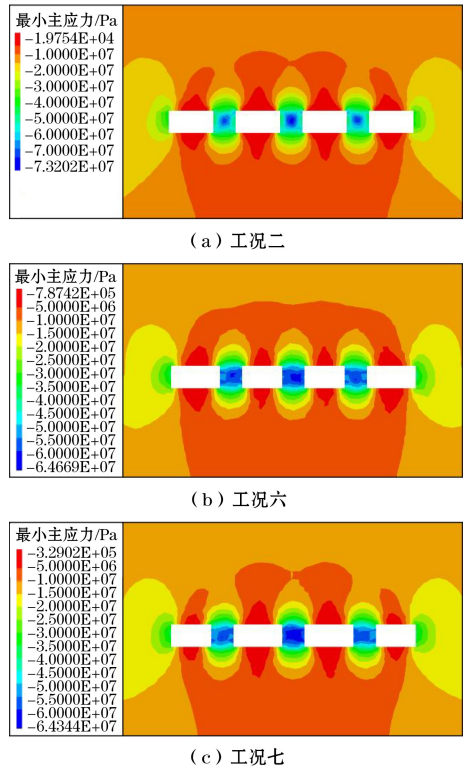
Fig.13 Vertical views of comparison schemes under different pillar center spacing



(c) 工况七

图 14 不同点柱中心间距下采场最大主应力云图

Fig.14 Maximum principal stress cloud diagrams of stope under different pillar center spacing



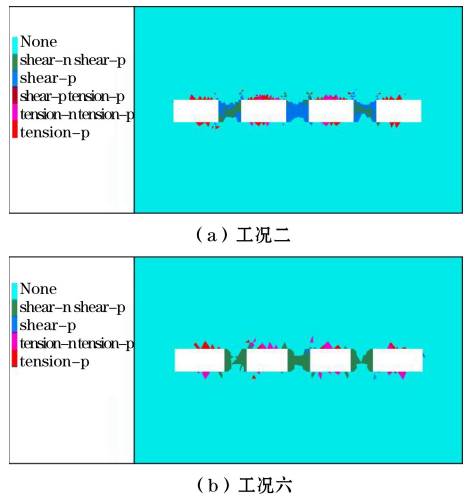
(a) 工况二

(b) 工况六

(c) 工况七

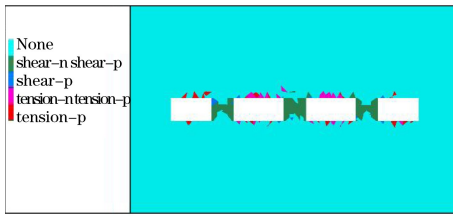
图 15 不同点柱中心间距下采场最小主应力云图

Fig.15 Minimum principal stress cloud diagrams of stope under different pillar center spacing



(a) 工况二

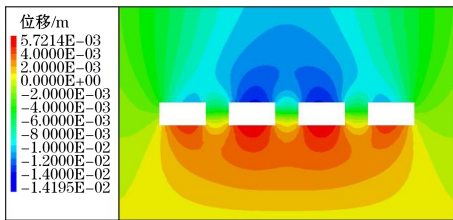
(b) 工况六



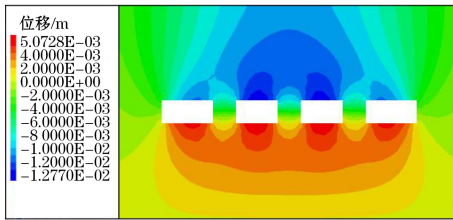
(c) 工况七

图 16 不同点柱中心间距下采场塑性区分布云图

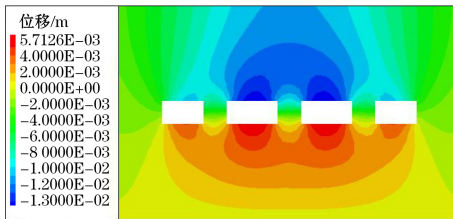
Fig.16 Plastic zone distribution cloud diagrams of stope under different pillar center spacing



(a) 工况二



(b) 工况六



(c) 工况七

图 17 不同点柱中心间距下采场垂直位移云图

Fig.17 Vertical displacement cloud diagrams of stope under different pillar center spacing

由图 14 和图 15 可知,3 种工况采场回采后,拉应力主要出现在采场暴露面积最大处,即采场顶底板,而压应力主要集中于点柱内,且 3 种工况应力值差别不大。由图 16 可知,随着采场内点柱中心间距的增加,采场暴露面积增大,采场顶板塑性区范围也逐渐扩大,当点柱中心间距为 16 m 时,采场顶板部分塑性区已连成片,点柱上方存在大量塑性区,这可能导致点柱破坏,进一步引起采场失稳。由图 17 可知,采场顶板下沉量随着点柱中心间距的增加而增大,采场顶板最大下沉量为 12.8~14.2 mm,3 种工况相差也较小。综合分析可知,当点柱中心间距为 16 m 时,采场顶板可能存在失稳风险,当点柱中心

间距为 14~15 m 时,采场顶板较为稳定,又因点柱中心间距越小,在一定采场内所留设的点柱越多,矿石损失率越大。因此,推荐上向分层点柱充填采矿业点柱中心间距为 15 m。

## 4 工业试验

### 4.1 试验方案

根据数值模拟分析结果,结合矿区的地质条件和矿岩物理力学性质,试验采场选择了以下采场结构参数:采场长度为 65 m,点柱尺寸为 5 m×5 m,点柱中心间距为 15 m。

### 4.2 现场实施与监测

现场实施过程中,通过安装应力计、位移计和激光全站仪等监测设备,对顶板的应力分布、位移和塑性区进行了实时监测。同时,通过定期检查点柱和充填体的状态,确保充填效果达到预期目标。

采场结构参数优化后,采场顶板的应力分布较为均匀,未出现大规模的拉应力集中区域。使用激光全站仪对采场顶板进行位移监测,监测结果显示,当采场长度为 65 m 时,顶板最大下沉量为 13 mm,远低于设计最大下沉值,表明采场顶板较为稳定。

因此,该设计方案确保了开采过程中采场顶板的稳定性。

## 5 结论

通过对某大型铜矿上向分层点柱充填采矿业采场结构参数的优化研究,得出以下主要结论。

(1) 采场长度优化:通过数值模拟分析,结合不同采场长度(55 m、65 m、75 m)下的应力、位移与塑性区分布情况,发现当采场长度为 65 m 时,顶板较为稳定且生产能力较强。

(2) 点柱尺寸优化:点柱尺寸的选择对采场稳定性有显著影响。当点柱尺寸为(5 m×5 m)~(6 m×6 m)时,顶板的塑性区较为稳定,而尺寸过小(如 4 m×4 m)时,顶板可能出现失稳现象。因此,推荐以点柱尺寸定为 5 m×5 m 作为最优方案。

(3) 点柱中心间距优化:点柱中心间距对采场的稳定性也起到了重要作用。通过模拟结果分析,建议点柱中心间距设置为 15 m,以确保采场的稳定性与采矿损失的平衡。

(4) 矿山工业试验结果验证了该优化方案不仅能提高矿山开采的安全性,降低顶板失稳的风险,还能提升生产效率,降低矿石损失率,为矿山的可持续开采和资源高效利用提供理论支持。

## 参考文献(References):

- [1] 高博,李广涛,施仁智,等.顶板锚固支护条件下的采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(12):20-30.  
GAO Bo, LI Guangtao, SHI Renzhi, et al. Optimization of stope structure parameters under the condition of roof anchoring support[J]. Mining Research and Development, 2024,44(12):20-30.
- [2] 刘鹏鹏,王贻明,周科礼,等.深部破碎矿体分段空场嗣后充填法采场结构参数优化[J].金属矿山,2023(8):181-188.  
LIU Pengpeng, WANG Yiming, ZHOU Keli, et al. Optimization of stope structure parameters of sublevel open stope with delayed filling method for deep broken orebody[J]. Metal Mine, 2023(8):181-188.
- [3] 兰晓平,胡静云,黄英华,等.残留间柱安全高效采矿方法研究与实践[J].有色金属(矿山部分),2024,76(4):28-35.  
LAN Xiaoping, HU Jingyun, HUANG Yinghua, et al. Research and practice on safe and efficient mining method for residual pillars[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024,76(4):28-35.
- [4] 龚永超,喻岗,朱晨迪,等.某铁矿采矿方法优选及采场回采长度优化研究[J].矿业研究与开发,2023,43(4):11-17.  
GONG Yongchao, YU Gang, ZHU Chendi, et al. Study on optimization of mining method and stope length in an iron mine[J]. Mining Research and Development, 2023,43(4):11-17.
- [5] 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.  
HAO Yimin, SONG Weidong, ZHANG Kai, et al. Optimization study on stope structure parameters of sublevel open stoping method with backfill[J]. Mining Research and Development, 2020,40(3):15-19.
- [6] 田敏,胡威.基于FLAC3D的某铁矿采场结构参数优选[J].现代矿业,2018,34(2):69-70+73.  
TIAN Min, HU Wei. Optimization of structural parameters of an iron ore stope based on FLAC3D[J]. Modern Mining, 2018,34(2):69-70+73.
- [7] 赵兴东,周鑫,田斌,等.西藏帮中锌铜矿采场结构参数优化[J].矿冶工程,2023,43(4):12-15.  
ZHAO Xingdong, ZHOU Xin, TIAN Bin, et al. Optimization of stope structure parameters for Bangzhong Zinc-copper Mine in Xizang[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):12-15.
- [8] 卢西洲,王文杰,邹龙,等.基于组合赋权的大体积充填体下回采进路参数优化[J].矿业研究与开发,2022,42(3):15-21.  
LU Xizhou, WANG Wenjie, ZOU Long, et al. Parameters optimization of stoping drift under massive backfill based on combined weighting[J]. Mining Research and Development, 2022,42(3):15-21.
- [9] 李炎峰,刘志祥,闵晨笛.金属矿深部采场结构参数的模糊层次分析综合评判优化[J].矿冶工程,2022,42(1):24-29.  
LI Yanfeng, LIU Zhixiang, MIN Chendi. Comprehensive evaluation and optimization with F-AHP for structural parameters of stope at deep of metal mines[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(1):24-29.
- [10] 徐永文,吴炳书,李官兵,等.缓倾斜极薄矿体采场结构参数优化研究[J].金属矿山,2022(11):52-57.  
XU Yongwen, WU Bingshu, LI Guanbing, et al. Study on the optimization of the stope structural parameters of gently inclined extremely thin orebody[J]. Metal Mine, 2022(11):52-57.
- [11] 李闯,唐涛.河北大白阳金矿采空区处理综合技术研究[J].世界有色金属,2020(3):51-52.  
LI Chuang, TANG Tao. Research on comprehensive technology of goaf treatment in Dabaiyang Gold Mine, Hebei Province[J]. World Nonferrous Metals, 2020(3):51-52.
- [12] 付士根,刘岩,魏杰,等.大理石矿采场结构参数的模拟优化研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(1):108-112.  
FU Shigen, LIU Yan, WEI Jie, et al. Research on simulation and optimization of structural parameters of marble mining stope[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2020,43(1):108-112.
- [13] 陈光飞,罗昌繁,钟连祥,等.基于RHINO-FLAC3D的采空区稳定性分析及治理方案选择[J].矿业研究与开发,2019,39(9):30-35.  
CHEN Guangfei, LUO Changfan, ZHONG Lianxiang, et al. Stability analysis and treatment scheme of goaf based on RHINO-FLAC3D[J]. Mining Research and Development, 2019,39(9):30-35.
- [14] 冯兴隆,王李管,毕林,等.基于Mathews稳定图的矿体可崩性研究[J].岩土工程学报,2008(4):600-604.  
FENG Xinglong, WANG Ligan, BI Lin, et al. Collapsibility of orebody based on Mathews stability graph approach[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008(4):600-604.
- [15] MAWDESLEY C, TRUEMAN R, WHITEN W J. Extending the Mathews stability graph for open-stope design[J]. Mining Technology, 2001,110(1):27-39.