

# 三鑫金铜矿保安矿柱回收合理充填体强度研究

刘小春<sup>1</sup>, 张小瑞<sup>2</sup>, 刘博<sup>2</sup>

(1. 中国黄金集团有限公司; 2. 长春黄金研究院有限公司)

**摘要:**为安全回收三鑫金铜矿的保安矿柱并保证充填采场的稳定性,对采场的合理充填体强度进行理论计算,并对不同充填体强度(灰砂比)下采场稳定性进行了数值模拟,确定了合理充填体强度。结果表明:采场充填体所需合理强度主要与采场长度和充填体高度有关,对于长度20~60 m、高度40 m的保安矿柱采场,充填体强度需达到3.5 MPa以上,其周边区域岩移量不超过2 mm,在设计规范允许的范围内,能够保障安全。

**关键词:**保安矿柱; 充填采矿法; 合理充填体强度; 数值模拟; 稳定性

中图分类号: TD853.34

文献标志码: A

文章编号: 1001-1277(2024)04-0013-05

doi:10.11792/hj20240404

## 引言

目前,充填采矿法是金属矿山地下开采常用的开采方法<sup>[1-2]</sup>,特别是对于围岩和地表需要保护、矿体形态复杂的高品位或贵金属矿床,充填采矿法的优越性更为突出。对于使用充填采矿法的采场,充填体强度会直接影响采场的稳定性,如何得到充填体的合理强度、降低采矿成本已成为研究的热点。李文波等<sup>[3]</sup>通过研发充填添加剂并进行充填配比试验和力学试验,使充填体抗压强度和流动性得到改善,并降低了充填材料成本。黄德镛等<sup>[4]</sup>通过建立FAHP-CRITIC法组合赋权的综合评价模型对不同充填材料方案进行评选,得到了充填材料的最佳配比,并推广使用。王作鹏等<sup>[5]</sup>通过数值模拟确定了最佳矿柱宽度和充填体强度,使矿柱稳定性和经济性达到最优。苗磊刚等<sup>[6]</sup>通过开展不同配比充填体力学试验,并结合Flac<sup>3D</sup>软件对充填体在采场内的力学效应进行分析,确定了充填体的最低灰砂比。杨志强等<sup>[7]</sup>结合料浆管道输送特性对充填料浆配比进行了优化,得到了合理的充填体强度和料浆流动性。邓雪杰等<sup>[8]</sup>提出了充实率控制导向的胶结充填体强度设计方法,得出了实际工程中的充填体平均强度。合理的充填体强度既能保证采场的稳定性,又能降低采矿成本,因此,对充填采场的合理充填体强度进行研究尤为重要。

三鑫金铜矿采用分段空场嗣后充填采矿法、浅孔留矿嗣后充填采矿法、上向水平高分层(高分段)充填采矿法进行回采,多个回采中段同时供矿,主要生产区域位于-570 m中段及以上浅部区域,保安矿柱

矿量共计172.39万t。为尽可能多地开发矿产资源,三鑫金铜矿采用盘区分段回采阶段充填采矿法对保安矿柱进行回收,本文对保安矿柱采场的合理充填体强度进行研究,并分析不同充填体强度(灰砂比)条件下岩体移动情况,据此得出合理的保安矿柱采场充填体强度参数范围,为矿山安全生产提供理论依据。

## 1 保安矿柱采场充填体强度分析

根据三鑫金铜矿充填体室内试验结果,结合类似矿山经验,充填体密度为2 000 kg/m<sup>3</sup>,内聚力为1.09 MPa,内摩擦角为35.86°。分别采用Thomas算法和卢平算法计算不同采场结构参数下充填体所需的合理强度。

### 1.1 Thomas 算法分析

根据Thomas经验公式(见式(1)),可计算出充填体底板的垂直应力,该公式的适用范围为充填体长度不小于充填体高度的一半。采用Thomas算法计算结果见表1。

$$\sigma_v = \frac{\gamma h}{1 + \frac{h}{w}} \quad (1)$$

式中: $\sigma_v$ 为作用在充填体底部的垂直应力(MPa); $\gamma$ 为充填料的容重(kN/m<sup>3</sup>); $h$ 为暴露的充填体高度(m); $w$ 为暴露的充填体长度(m)。

### 1.2 卢平算法分析

由于在Thomas经验公式中只考虑了充填体的几何尺寸和充填体的容重,而对于充填材料的强度特性没有加以考虑。卢平在Thomas算法的基础上,进一步改进了该算法,拓展了Thomas算法的适用范围,卢平算法计算公式见式(2)。采用卢平算法计算结果见表2。

表 1 Thomas 算法对充填体不同高度情况下的应力计算结果

Table 1 Filling body stress calculation results of Thomas algorithm under different height

暴露高度/m	充填体在不同暴露长度下的应力/MPa				
	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m
10	0.65	0.73	0.78	0.81	0.84
20	0.98	1.17	1.31	1.40	1.47
30	1.18	1.47	1.68	1.84	1.96
40	1.30	1.68	1.96	2.18	2.36

$$\sigma_v = \frac{\gamma h}{(1-k) \left( \tan \alpha + \frac{2h}{w} \times \frac{C_1}{C} \sin \alpha \right)} \quad (2)$$

式中： $k$  为侧压力系数， $k = 1 - \sin \varphi_1$ ， $\varphi_1$  为充填体与围岩间的摩擦角( $^\circ$ )； $C_1$  为充填体与围岩间的内聚力(MPa)； $C$  为充填体的内聚力(MPa)； $\varphi$  为充填体的内摩擦角， $\alpha = 45^\circ + \varphi/2$ 。

根据 2 种计算结果的结果，采场充填体所需合理强度主要与采场长度和充填体高度有关。在相同高度下，充填体所需强度随采场长度增大而增大；在相

表 3 不同方案充填体特性参数

Table 3 Characteristic parameter of filling body strength for different schemes

方案	灰砂比	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	变形模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/( $^\circ$ )	剪切模量/GPa
方案 1	1:6	2 000	7.54	0.62	1.38	0.20	1.68	33.96	0.58
方案 2	1:8	2 000	3.56	0.40	0.49	0.18	1.09	35.86	0.21
方案 3	1:10	2 000	2.32	0.23	0.32	0.17	0.71	26.60	0.14

## 2.2 模型建立

本次不同充填体强度下数值模拟计算模型的尺寸为长 650 m( $x$  轴方向)  $\times$  宽 600 m( $y$  轴方向)  $\times$  高 250 m( $z$  轴方向)，分别赋予相应的材料属性，施加相应的边界条件和初始条件，得到最终的数值计算模型见图 1。

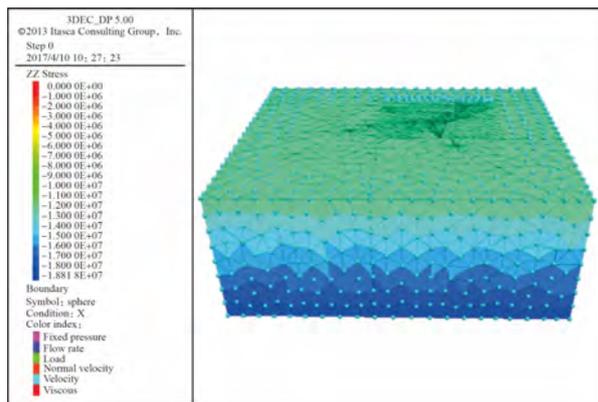


图 1 充填体强度数值模拟计算模型

Fig.1 Numerical simulation calculation model for filling body strength

表 2 卢平算法对充填体不同高度情况下的应力计算结果

Table 2 Filling body stress calculation results of Lupin algorithm under different height

暴露高度/m	充填体在不同暴露长度下的应力/MPa				
	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m
10	0.59	0.65	0.69	0.72	0.74
20	0.90	1.06	1.18	1.25	1.31
30	1.08	1.35	1.52	1.66	1.77
40	1.21	1.55	1.79	1.96	2.13

同采场长度下，充填体所需强度随充填体高度增大而增大，一般采场底部充填体所需强度最大。

## 2 采场稳定性数值模拟分析

### 2.1 模拟方案设计

根据矿山实际充填情况，基于控制变量原则，利用 3DEC 分别对 -570 m 中段整体充填灰砂比 1:6, 1:8 和 1:10 3 种方案的充填体强度进行模拟分析，模拟中所采用的各充填体特性参数见表 3。

### 2.3 计算结果及分析

1) 方案 1 计算结果分析。将模型中 -570 m 中段的矿体特性参数设置为方案 1 的充填体特性参数，然后进行运算，平衡后的模型见图 2，-470 m、-520 m 和 -570 m 水平剖面位移云图见图 3-a)、b)、c)，穿过老主井、新主井、副井的垂直剖面位移云图分别见图 3-d)、e)、f)。

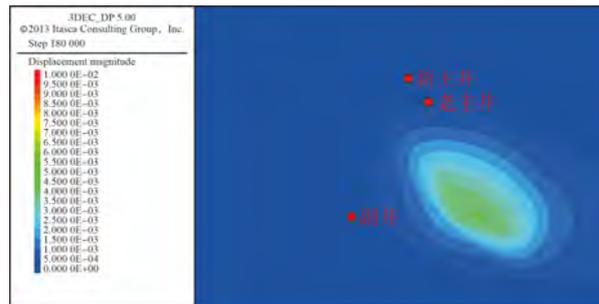


图 2 -570 m 中段整体充填平衡后模型示意图

Fig.2 Model of Level -570 m balanced by overall filling

由图 3 可知：模型上表面影响区域在 385 m  $\times$

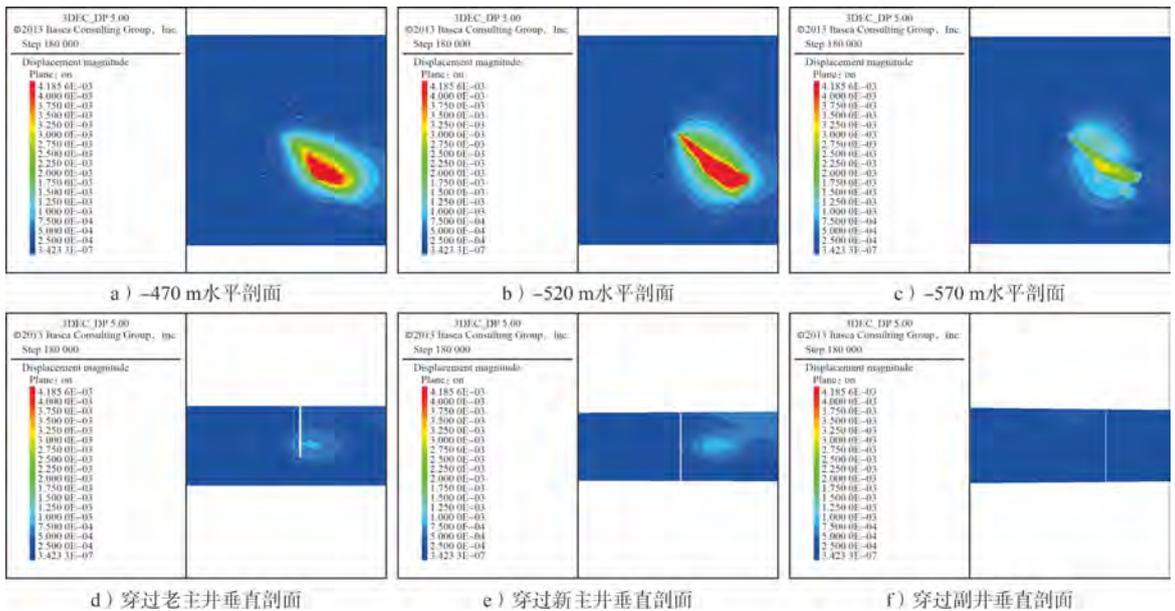


图3 方案1采场各水平剖面 and 穿过井筒的垂直剖面位移云图

Fig. 3 Displacement cloud chart of various horizontal sections of slope and vertical section through the shaft for Scheme 1

240 m(长×宽)的范围内,且在上表面影响范围最大;随着深度的增加,影响范围逐步减小,各剖面最大位移量均为充填体的沉降量约为5 mm。另外,当灰砂比为1:6(即充填体强度约为7 MPa)时,新主井和副井完全位于影响范围之外,而老主井虽然会受到一定影响,但其周边区域岩移量约为1 mm,在GB 50771—2012《有色金属采矿设计规范》允许的范围

内,因此当充填体强度超过7 MPa时,充填后能保证新主井、老主井和副井的安全稳定。

2)方案2计算结果分析。将模型中-570 m中段的矿体特性参数设置为方案2的充填体特性参数,然后进行运算,-470 m、-520 m和-570 m水平剖面位移云图见图4-a)、b)、c),穿过老主井、新主井、副井的垂直剖面位移云图分别见图4-d)、e)、f)。

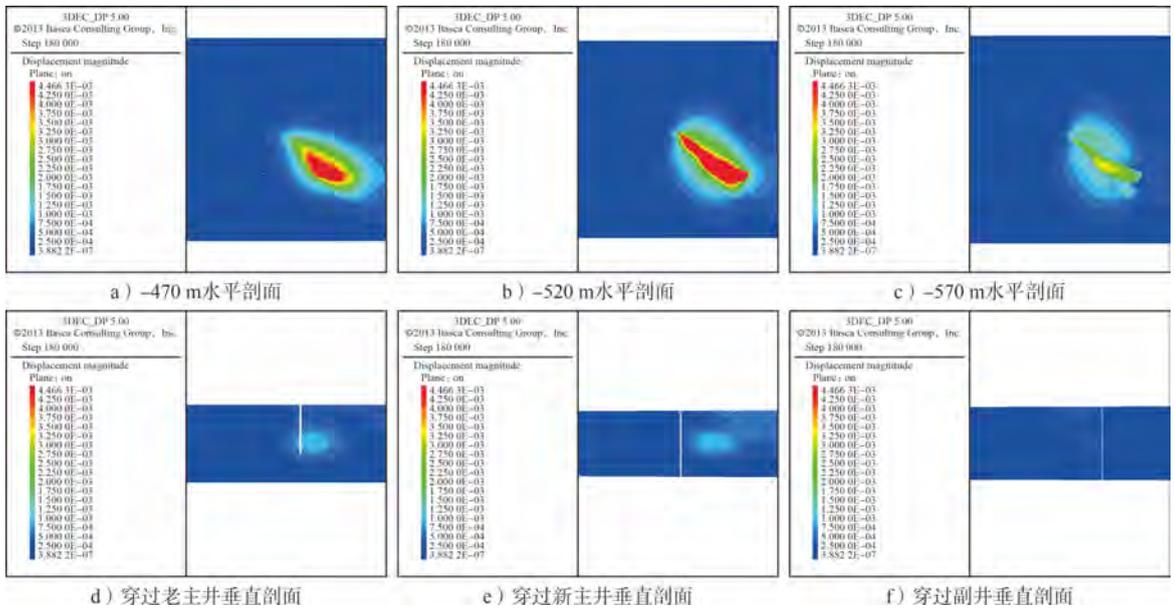


图4 方案2采场各水平剖面 and 穿过井筒的垂直剖面位移云图

Fig. 4 Displacement cloud chart of various horizontal sections of slope and vertical section through the shaft for Scheme 2

由图4可知:模型上表面影响区域在395 m×255 m(长×宽)的范围内,且在上表面影响范围最大;随着深度的增加,影响范围逐步减小,各剖面最大位移量均为充填体的沉降量约为5 mm。另外,当灰砂比为1:8(即充填体强度约为3.5 MPa)时,

副井完全位于影响范围之外,而老主井和新主井虽然在一定深度上会受到影响,但其周边区域岩移量不超过2 mm,在GB 50771—2012《有色金属采矿设计规范》允许的范围内。因此,当充填体强度超过3.5 MPa时,充填后基本能满足新主井、老主井和副

井的安全稳定需要。

3) 方案3 计算结果分析。将模型中 -570 m 中段的矿体特性参数设置为方案3 的充填体特性参数,

然后进行运算, -470 m、-520 m 和 -570 m 水平剖面位移云图见图5-a)、b)、c), 穿过老主井、新主井、副井的垂直剖面位移云图分别见图5-d)、e)、f)。

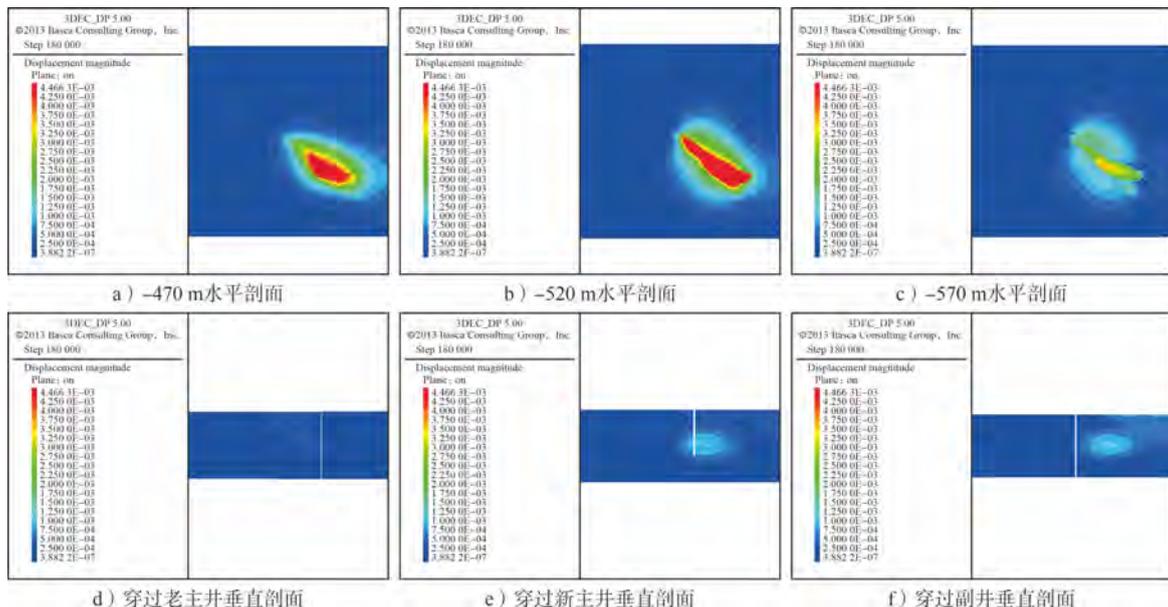


图5 方案3 采场各水平剖面和穿过井筒的垂直剖面位移云图

Fig. 5 Displacement cloud chart of various horizontal sections of slope and vertical section through the shaft for Scheme 3

由图5 可知:模型上表面影响区域在  $395\text{ m} \times 250\text{ m}$  (长  $\times$  宽) 的范围内,且在上表面影响范围最大;随着深度的增加,影响范围逐步减小,各剖面最大位移量均为充填体的沉降量约为  $5\text{ mm}$ 。另外,当灰砂比为  $1:10$  (即充填体强度约为  $2.3\text{ MPa}$ ) 时,老主井、新主井和副井均会受到一定程度的影响,但影响程度都较轻,而老主井井筒周边区域岩移量接近规范允许值 ( $2\sim 3\text{ mm}$ ),充填后基本能满足新主井、老主井和副井的安全稳定需要。

4) 各方案计算结果对比分析。综合上述不同灰砂比 (不同充填体强度) 充填体采充后的模拟结果分析可知,当灰砂比为  $1:6$  的高强度充填体 ( $7\text{ MPa}$ ) 时,充填后新主井和副井完全位于影响范围之外,而老主井虽然会受到一定影响,但其周边区域岩移量约为  $1\text{ mm}$ ,在设计规范所允许的范围内。因此,当充填体强度超过  $7\text{ MPa}$  时,充填后能保证新主井、老主井和副井的安全性。当充填体灰砂比为  $1:8$  和  $1:10$  (强度分别约为  $3.5\text{ MPa}$  和  $2.3\text{ MPa}$ ) 时,副井几乎不受回采扰动影响,而老主井和新主井虽然一定程度上会受到影响,但其周边区域岩移量不超过  $2\text{ mm}$ ,在设计规范允许的最大范围内。同时,由于模拟中没有考虑爆破等因素对区域稳定性的影响,因而,为了确保保安矿柱区域的回采足够安全可靠,充填体强度要求达到  $3.5\text{ MPa}$  以上较为适宜,充填后可满足新主井、老主井和副井的安全稳定需要。

### 3 结论

本文针对保安矿柱采场充填的特殊性,对采场的合理充填体强度进行了理论计算分析和不同充填体强度下数值模拟分析,综合分析可得出如下结论:

1) 采场充填体所需合理强度主要与采场长度和充填体高度有关。在相同高度下,充填体所需强度随采场长度增大而增大;相同采场长度下,充填体所需强度随充填体的高度增大而增大,一般采场底部充填体所需强度最大。

2) 综合理论计算和数值模拟分析,同时考虑保安矿柱范围内爆破、充填接顶率等现实因素,对于保安矿柱范围内采场长度  $20\sim 60\text{ m}$ 、高度  $40\text{ m}$  时的充填体强度要求达到  $3.5\text{ MPa}$  以上,其中越靠近井筒的采场对充填体质量和强度要求越高。

#### [参考文献]

- [1] 吴爱祥,王勇,张敏哲,等. 金属矿地下开采关键技术新进展与展望[J]. 金属矿山,2021(1):1-13.
- [2] 吴浩,赵国彦,陈英. 多目标条件下矿山充填材料配比优化实验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(11):101-108.
- [3] 李文波,郑伯坤,张世超,等. 某铅锌矿充填新材料的开发与应用研究[J]. 矿业研究与开发,2023,43(4):37-41.
- [4] 黄德镛,贾子月,吕世玮,等. 基于正交设计试验方案的云南某铜矿采场结构参数优化研究[J]. 有色金属工程,2023,13(4):111-119.
- [5] 王作鹏,金爱兵,庞如顺,等. 基于主成分分析法的嗣后充填采场矿柱及充填体强度研究[J]. 矿业研究与开发,2023,43(3):45-52.

- [6] 苗磊刚,牛园园,潘洪波.某矿尾砂胶结充填体强度演化特征及力学效应研究[J].金属矿山,2023(3):52-58.
- [7] 杨志强,王立杰,王社光,等.基于能量匹配的充填体强度设计
- 及料浆配比优化[J].金属矿山,2023(2):38-42.
- [8] 邓雪杰,刘浩,王家臣,等.煤矿采空区充实率控制导向的胶结充填体强度需求[J].煤炭学报,2022,47(12):4 250-4 264.

## Research on the reasonable filling body strength for the recovery of security ore pillars in Sanxin Gold Copper Mine

Liu Xiaochun<sup>1</sup>, Zhang Xiaorui<sup>2</sup>, Liu Bo<sup>2</sup>

(1. China National Gold Group Co., Ltd.; 2. Changchun Gold Research Institute Co., Ltd.)

**Abstract:** In order to safely recover the security ore pillars in Sanxin Gold Copper Mine and ensure the stability of filled stope, theoretical calculations were conducted on the reasonable filling body strength in the stope. Numerical simulations were performed on the stope stability under different filling body strengths (cement-sand ratio) to determine the reasonable range of filling body strength. The results indicate that the required strength of the filling body in the stope is mainly related to the length of the stope and the height of the filling body. For security ore pillar stopes with lengths ranging from 20 m to 60 m and a height of 40 m, the filling body strength needs to be above 3.5 MPa. The surrounding rock displacement should not exceed 2 mm, which falls within the allowable range specified by design standards, ensuring safety.

**Keywords:** security ore pillar; filling mining method; reasonable filling body strength; numerical simulation; stability

(上接第 8 页)

## Application of BMS microseismic monitoring system in deep rock mass stability monitoring

He Yulong, Wang Dongyi, Li Hailong

(Sanshandao Gold Mine, Shandong Gold Industry (Laizhou) Co., Ltd.)

**Abstract:** With the gradual extension of mining operations into deeper levels, minor rockburst phenomena have emerged, posing risks of instability in mining pillars and roof caving induced by rockbursts within the production area. Based on the actual geological conditions of deep ore bodies and surrounding rocks in Sanshandao Gold Mine, a new generation of microseismic monitoring system has been developed, in order to establish a mine early warning system. This system can effectively monitor faint seismic signals associated with the instability of mining pillars and roof caving in the mining area, analyze microseismic waveforms, and detect occurrences of rockburst events, providing basis for the safe mining of deep rock mass.

**Keywords:** deep mining; rock mass stability; rockburst; microseismic monitoring; waveform analysis