

基于数值模拟及经济对比的采场 结构参数优化研究

Study on Optimization of Stope Structure Parameters Based on Numerical Simulation
and Economic Comparison

许观青(紫金矿业建设有限公司, 福建 南平 364200)

摘要:针对某矿山2-1[#]和2-2[#]矿体实际条件,基于矿山目前正在采用的充填采矿法,对三种采场结构参数方案进行研究。采用迈达斯建模结合FLAC数值模拟进行研究,分析各个方案的竖向位移、主应力分布特征,并开展技术经济对比。结果表明:大矿房小矿柱的方案三(矿房50 m、间柱10 m、低强度充填)在控制围岩变形、降低充填成本(533.2万元/标准矿块)及提升回采效率方面较其他方案有较明显的优势,其最大位移值、最大主应力值、最小主应力值均满足安全回采的稳定性要求,研究结果为矿山安全生产提供技术参数参考。

关键词:数值模拟; 应力分布; 经济对比; 成本控制

中图分类号: TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)05-0037-06

Abstract: Aiming at the actual conditions of No. 2-1[#] and No. 2-2[#] ore bodies in a certain mine, based on the backfill mining method currently used in the mine, three stope structure parameter schemes were studied. The research was carried out by combining Midas modeling with FLAC numerical simulation to analyze the vertical displacement and principal stress distribution characteristics of each scheme, and a technical and economic comparison was conducted. The results show that Scheme 3 with large stope and small pillar (stope 50 m, barrier pillar 10 m, low-strength backfill) has obvious advantages over other schemes in controlling surrounding rock deformation, reducing backfill costs (5.332 million yuan per standard ore block), and improving mining efficiency. Its maximum displacement value, maximum principal stress value, and minimum principal stress value all meet the stability requirements for safe mining. The research results provide technical parameter references for the safe production of the mine.

Key words: numerical simulation; stress distribution; economic comparison; cost control

1 前言

深部及复杂条件下金属矿床的安全高效开采是矿业领域持续面临的重大挑战。阶段空场嗣后充填采矿法在厚大矿体开采中优势明显,在国内外金属矿山中得到了广泛应用^[1]。采场结构参数作为该采矿方法的核心技术要素,直接关系到采场稳定性、生产安全、矿石回收率及开采经济效益^[2]。近年来,随着数值模拟技术的飞速发展和在矿山工程中的深入应用,结合技术经济分析的采场结构参数优化研究取得了显著进展^[3-6]。甘德清等利用数值模拟结合响应面法构建了采场顶板沉降量预测模型,探明了影响采场顶板沉降的自身因素敏感性及其交互作用关系^[7]。徐路路等综合安全、经济和技术等

因素分析了不同采场结构参数下与之匹配的充填体强度范围^[8]。高博等通过研究无支护条件下的围岩各项参数变化,确定了最优的采场结构参数^[9]。董志富等通过拓展 Mathews 稳定图法确定合适的水力半径,选择适合矿山的采场结构参数。此外,其他学者针对支护条件下,低强度充填体条件下的采场稳定性也做了一些工作^[10]。

综合运用数值模拟计算和技术经济分析方法,以某矿2-1[#]、2-2[#]矿体为研究对象,重点研究:①围岩与充填体竖向移场、应力场(最大主应力和最小主应力)分布演化规律和稳定性特征及开挖和充填后的稳定性特征;②量化比较分析各方案的充填材料成本等经济指标和矿石损失值;③确定适用于矿

[作者简介] 许观青(1986—),男,汉族,福建省政和县人,采矿工程师,主要从事金属矿山采矿技术、采掘生产及安全生产管理等方面的研究工作。

[引用格式] 许观青. 基于数值模拟及经济对比的采场结构参数优化研究[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(5): 37-42.

体的最优采场结构参数方案,综合采场稳定性、安全风险、充填成本、矿损率、回采效率等核心指标,以实现矿山安全高效的回采。

2 方案制定与模拟

2.1 方案制定

根据矿山 2-1# 与 2-2# 矿体的实际开采技术条件,拟定三种方案进行研究。方案一:一、二步骤采场均为 40 m,一步骤以高强度配比充填,二步骤以低强度配比充填。方案二:一步骤采用 30 m 小参数,以高强度配比充填;二步骤采用大参数 50 m,以低强度配比充填。方案三:大矿房,小矿柱,即矿房 50 m,采后低强度配比充填,相邻采场留 10 m 间柱,后期不回采或少量回采。

2.2 模拟分析

2.2.1 物理模型的建立

根据上述方案,分别建立三维物理力学模型,具体如图 1、图 2、图 3 所示。

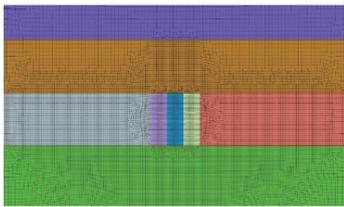


图 1 方案一网格模型

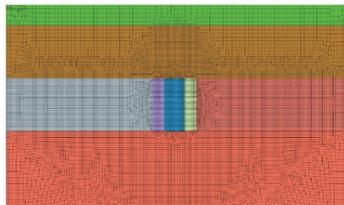


图 2 方案二网格模型

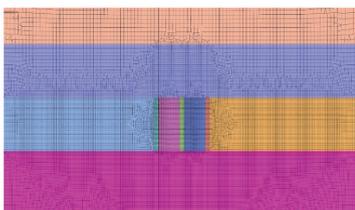


图 3 方案三网格模型

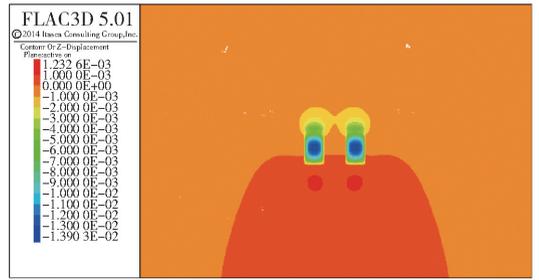
2.2.2 模拟结果分析

将上述方案的网格模型导入 FLAC3D 中,按照实际的开挖顺序进行模拟计算,计算结果如下所示。

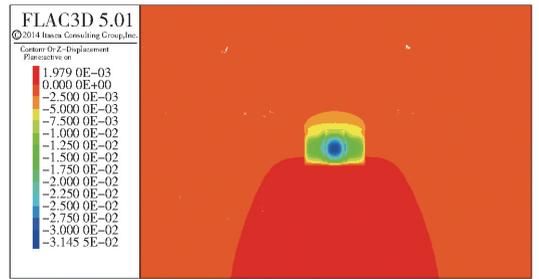
1) 竖向位移对比分析

以下三种方案不同回采步骤横剖面和纵剖面的

竖向位移分布图,图 4、图 5 所示为方案一的横纵剖面竖向位移对比分析图。

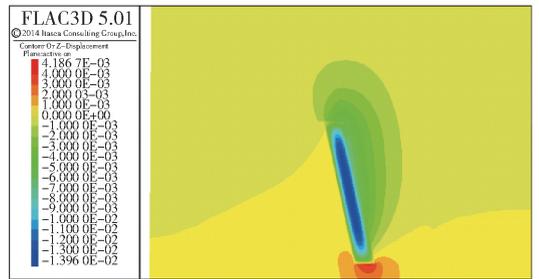


(a) 一步骤

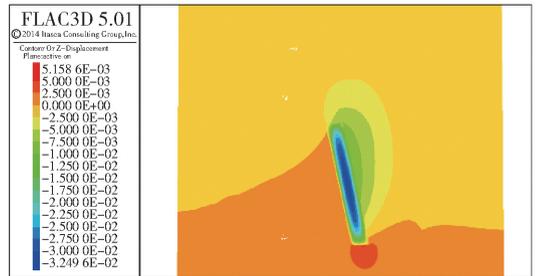


(b) 二步骤

图 4 方案一横剖面竖向位移分布图



(a) 一步骤



(b) 二步骤

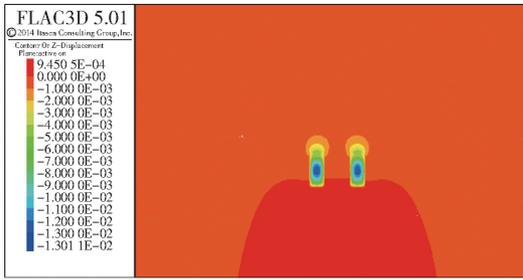
图 5 方案一纵剖面竖向位移分布图

从图 4、5 可以看出,一步骤位移最大值为 4.1 mm,二步骤最大值为 5.1 mm。

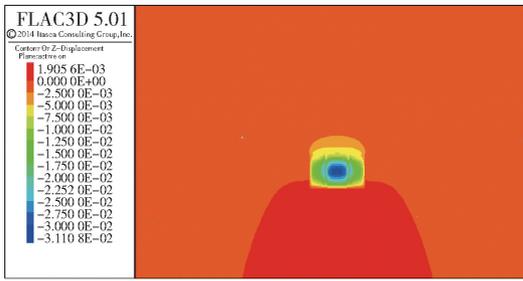
从图 6、7 可以看出,一步骤竖向位移最大值为 3.7 mm,二步骤最大值为 5.1 mm。

从图 8、9 可以看出,方案三竖向位移的最大值为 4.7 mm。

竖向位移分为正值和负值,正值表示上向位移,

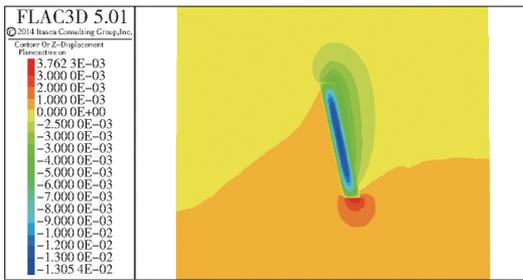


(a) 一步骤

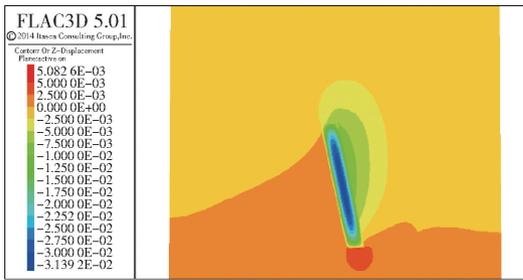


(b) 二步骤

图 6 方案二横剖面竖向位移分布图



(a) 一步骤



(b) 二步骤

图 7 方案二纵剖面竖向位移分布图

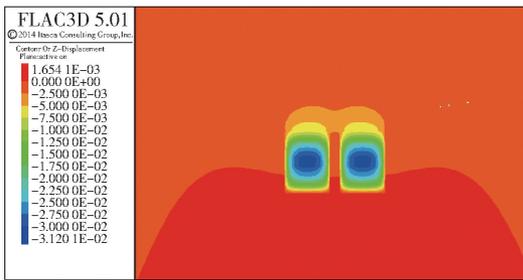


图 8 方案三横剖面竖向位移分布图

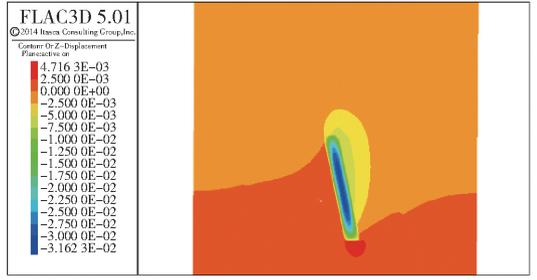
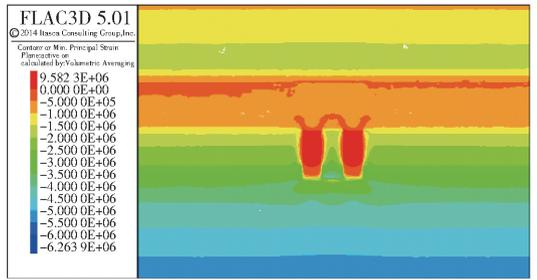


图 9 方案三纵剖面竖向位移分布图

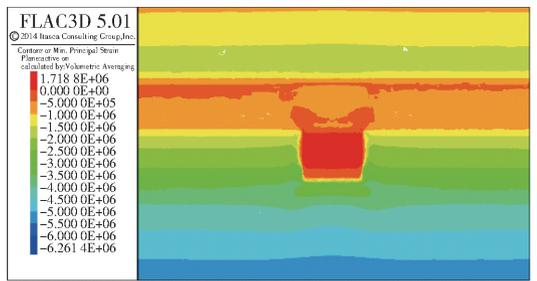
即凸起;负值表示下向位移,即为沉降。从图 4 至图 9 可以看出,三种方案的凸起大致与沉降规律相同,主要出现在底板上,而沉降主要发生在充填体内,顶板沉降较小。方案一中竖向位移最大值为 5.1 mm, -32.4 mm;方案二中竖向位移最大值为 5.1 mm, -31.6 mm;方案三中竖向位移最大值为 4.7 mm, -31.2 mm。三个方案的竖向位移都在允许范围。

2) 最大主应力对比分析

以下三种方案不同回采步骤横纵剖面的最大主应力分布图,图 10、图 11 所示为方案一的横纵剖面最大主应力对比分析图。



(a) 一步骤



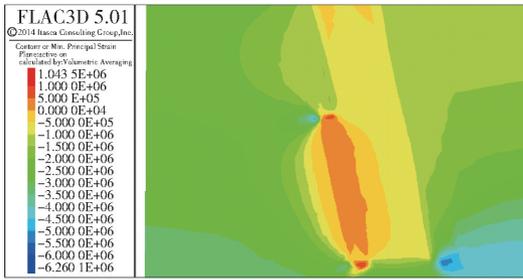
(b) 二步骤

图 10 方案一横剖面最大主应力分布图

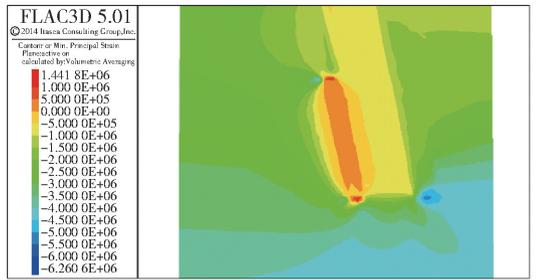
从上图可以看出,方案一中,一步骤最大主应力的最大值为 1.04 MPa,二步骤为 0.37 MPa。

从图 12、图 13 可以看出,方案二中,一步骤最大主应力的最大值为 1.4 MPa,二步骤为 0.5 MPa。

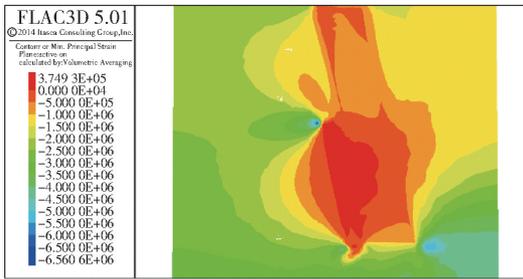
从图 14 可以看出,方案三中,最大主应力的最大值为 0.65 MPa。



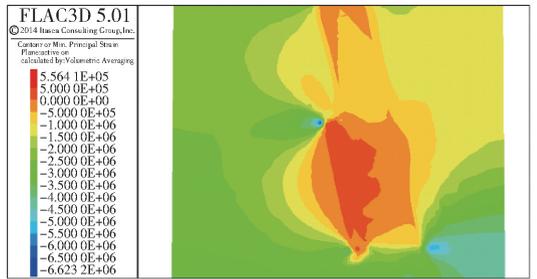
(a) 一步骤



(a) 一步骤



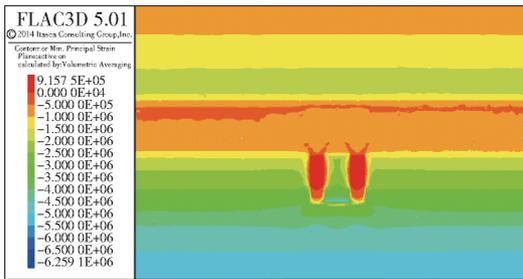
(b) 二步骤



(b) 二步骤

图 11 方案一纵剖面最大主应力分布图

图 13 方案二纵剖面最大主应力分布图



(a) 一步骤

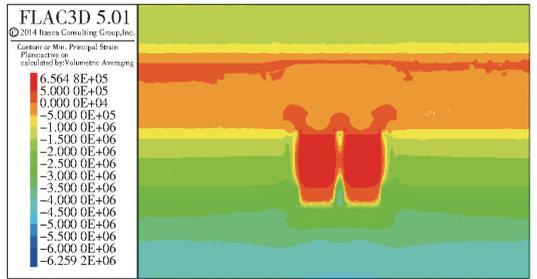
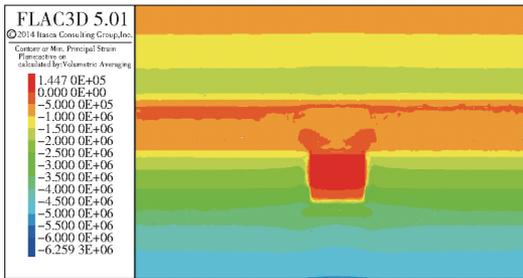


图 14 方案三横剖面最大主应力分布图



(b) 二步骤

图 12 方案二横剖面最大主应力分布图

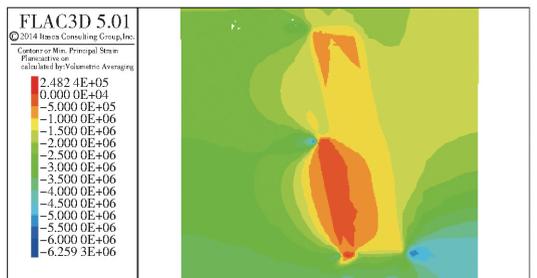


图 15 方案三纵剖面最大主应力分布图

从图 10 至图 15 可以看出,拉应力主要分布在矿房的顶底板区域,同时也出现在充填体内。方案一中最大主应力最大值为 1.04 MPa,方案二为 1.4 MPa,方案三为 0.65 MPa。这三种方案的计算结果均比岩石抗拉强度小,不会造成拉伸损伤破坏。充填体内虽然也存在拉应力,但其值较小,不会引起充填体失稳。

主应力分布如图 16 至图 21 所示。

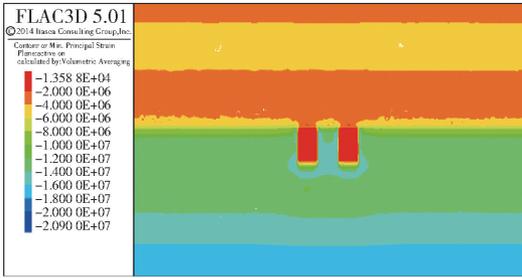
从图 16、图 17 可以看出,方案一中,一步骤最小主应力的最大值为 23.7 MPa,二步骤最大值为 24.1 MPa。

从图 18、图 19 可以看出,方案二中,一步骤最小主应力的最大值为 21.7 MPa,二步骤为 25.1 MPa。

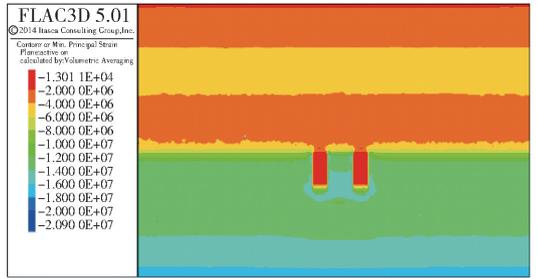
从图 20、图 21 可以看出,方案三中,最小主应力的最大值为 22.8 MPa。

3) 最小主应力对比分析

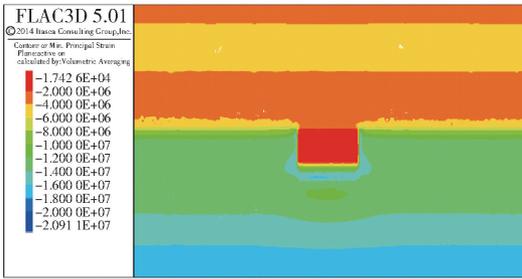
三种方案不同回采步骤横剖面 and 纵剖面的最小



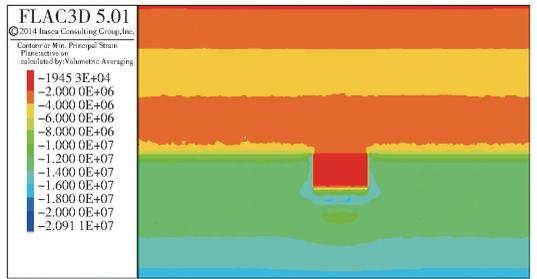
(a) 一步骤



(a) 一步骤



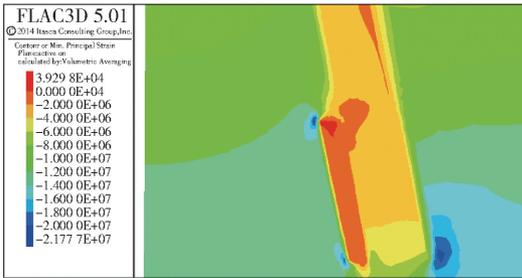
(b) 二步骤



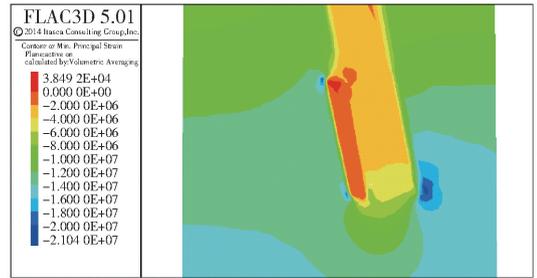
(b) 二步骤

图 16 方案一横剖面最小主应力分布图

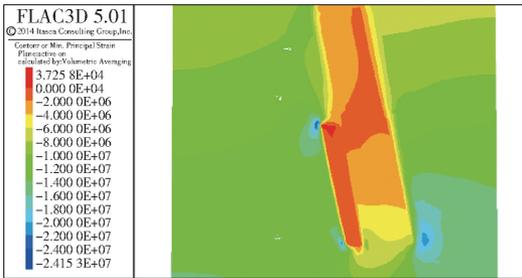
图 18 方案二横剖面最小主应力分布图



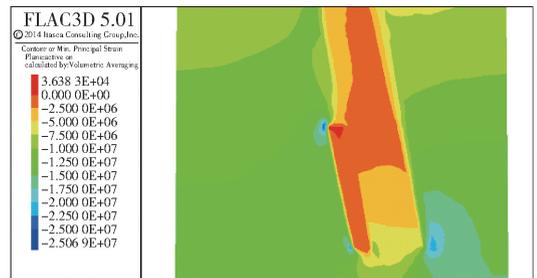
(a) 一步骤



(a) 一步骤



(b) 二步骤



(b) 二步骤

图 17 方案一纵剖面最小主应力分布图

图 19 方案二纵剖面最小主应力分布图

软件中最小主应力实际上是分析其压应力,压应力超过岩石或者充填体抗压强度时,岩石或充填体会发生相应的挤压破坏。从图 16 至图 21 可以看出,由于应力集中,最小主应力主要分布在矿房地板处及端部处。方案一,最小主应力的最大值为 24.3 MPa;方案二为 25.1 MPa,方案三为 22.8 MPa。计算结果表明,三个方案压应力的最大值都没有超过下盘大理岩的岩石抗拉强度,但是超过了上盘绿泥石灰岩的抗拉强度,所以在开挖的过程中,可能在上盘

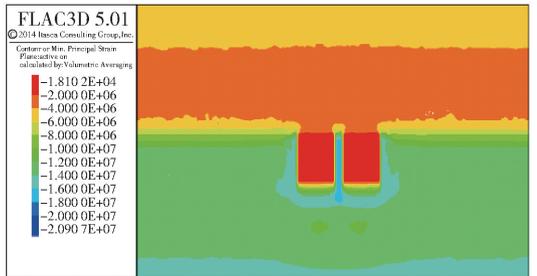


图 20 方案三横剖面最小主应力分布图

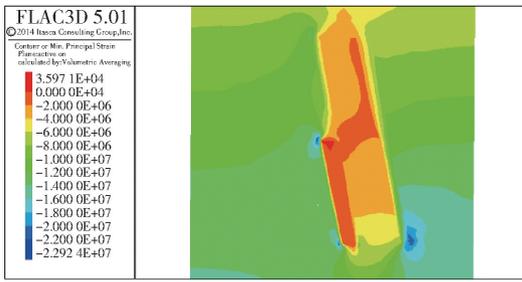


图21 方案三纵剖面最小主应力分布图

部位会存在两帮与顶板相交处发生的挤压破坏。

综上所述,从位移、最大主应力和最小主应力三个方面来看,三个方案均能够维持采场的稳定性,但方案三优于方案二优于方案一。

3 经济技术比较

某矿采用充填法开采,对充填成本有直接影响的是采用何种形式的采场结构参数和回采顺序,因此在保证采场稳定与安全的前提下,改变采场结构参数来实现矿山经济效益的提升。

方案一、方案二均分两步骤进行回采,一步骤充填体在二步骤回采时需发挥人工矿柱的作用,所以一步骤采场要用高强度配比充填;但方案三预留了间柱,可用低强度配比进行充填。

根据矿山实际情况,以一个矿块为例计算不同采场结构参数条件下的采场充填成本。一步骤充填成本为68元/m³,二步骤充填成本为59元/m³,此外还考虑到方案三中10m间柱损失,该部分矿石参照往年吨矿价值(扣除成本后)为26元/t,由此计算得到的充填成本见表1。

表1 不同采场结构参数条件下标准矿块充填成本

方案	一步骤充填 费用/万元	二步骤充填 费用/万元	损失矿石 价值/万元	合计/ 万元
方案一	295.4	256.3	0.0	551.7
方案二	221.5	320.4	0.0	541.9
方案三	448.5	0.0	84.7	533.2

从表中可以看出,方案三充填成本最低,为533.2万元;方案二次之,为541.9万元;方案一采场充填成本最高,为551.7万元。此外,方案三条件下较方案一、方案二采场充填挡墙架设方面也要节省部分费用。

从技术角度方面来说,方案三较方案一、方案二保留了10m间柱,对岩体变形和沉降控制更好,有利于采场稳定与安全。方案一、方案二为两步骤回

采,二步骤受一步骤充填体强度制约,对采场和矿山的生产组织和回采效率造成影响,而上述问题方案一并不存在。

4 结论

(1)三种方案其围岩及充填体的竖向位移、最大主应力和最小主应力均处于可控范围,能够满足采场整体稳定性要求。其中,方案三在控制顶底板及两帮围岩变形、降低应力集中程度方面表现最优,为采场提供了更可靠的被动支护。

(2)技术经济对比分析显示,方案三在充填成本方面具有明显优势。其标准矿块综合成本为533.2万元,低于方案一(551.7万元)和方案二(541.9万元)。

(3)方案三采用矿房间留设永久或半永久间柱的方式,无需像方案一、二那样严格遵循一步骤充填体养护达标后再回采二步骤的顺序。这使采场的回采效率和矿井生产组织的灵活性得到明显简化,避免了各步骤之间的相互制约,对实现矿井稳产高产目标更加有利。

[参考文献]

- [1] 古德生,李夕兵.现代金属矿床开采科学技术[M].北京:冶金工业出版社,2006.
- [2] 刘同有,于润沧.充填采矿技术与应用[M].北京:冶金工业出版社,2001.
- [3] 连欢超,杨坤尧,王立杰,等.厚大破碎矿体大直径深孔采场结构参数数值模拟优化[J].煤炭技术,2025,44(5):24-29.
- [4] 彭跃金,王扶成.不同岩性顶板跨度稳定性数值模拟研究[J].中国矿业,2024,33(S2):274-278.
- [5] 孙彬彬,江国建,孙胜,等.某矿山厚大矿体采场结构参数优化研究[J].采矿技术,2024,24(02):46-52.
- [6] 闫广亮,李真,张莞涛,等.思山岭铁矿地应力分布规律与采场结构参数优化[J].金属矿山,2023,(10):1-9.
- [7] 甘德清,孟岐,刘志义,等.基于响应曲面的采场结构参数优化方法与敏感性分析[J].矿业研究与开发,2025,45(3):31-40.
- [8] 徐路路,张钦礼,冯如.基于采场结构参数优化后的充填体强度数值模拟[J].黄金科学技术,2021,29(3):421-432.
- [9] 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.
- [10] 董志富,翟会超,于永纯,等.大直径深孔落矿嗣后充填采矿工艺采场结构参数数值模拟研究[J].矿业研究与开发,2023,43(6):1-7.