

基于数值建模的姑山铁矿采矿方法 优化研究

Study on Optimization of Mining Method in Gushan Iron Mine Based on Numerical Modeling

杨明¹, 石永豹¹, 朱金文¹, 陶云峰¹, 刘先苇¹, 吴迪²

(1. 安徽马钢矿业资源集团姑山矿业有限公司, 安徽 当涂 243181; 2. 北京科技大学, 北京 100083)

摘要: 姑山铁矿选用上向水平分层充填采矿法和上向进路充填采矿法在不同的地质条件下开采, 为对采场结构进行优化, 本研究通过理论分析和工程类比的方法提出3~4种采场参数方案, 再根据数值模拟手段, 从采场安全性、生产效率和生产安排等方面选出合适的采场方案, 优化布置, 为矿山安全高效开采、降低损失贫化提供设计参考。

关键词: 采矿方法参数优化; 数值模拟; 露转井; 姑山铁矿

中图分类号: TD861 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)05-0006-10

Abstract: Gushan iron ore mine selects upward horizontal stratified filling mining method and upward approach filling mining method to mine under different geological conditions, in order to optimize the structure of the quarry, this study proposes 3-4 kinds of quarry parameter schemes by means of theoretical analysis and engineering analogies, and then according to numerical simulation means, selects the suitable quarry scheme from the aspects of quarry safety, productivity and production arrangement, optimizes the layout, and provides design references for mine provide design reference for safe and efficient mining and reduce loss depletion.

Key words: mining method parameter optimisation; numerical simulation; open-turn shaft; Gushan iron ore mine

1 前言

矿产资源是国家经济发展的底层基础, 随着经济发展, 矿产资源的需求量不断增加, 除了依靠国外进口外, 更是要求国内矿山提高产量, 而采矿方法是提高产量的关键, 而在确定合适的采矿方法后, 合理的矿块参数设计也尤为关键^[1-2]。矿山往往在开采过程中, 会在自身采矿方法的基础上对其优化, 保证矿山能在安全的条件下, 更大可能的发挥其生产能力^[3]。丰山铜矿在其原本采矿方法通过优化回采工艺等环节, 使回采效率显著增加^[4], 白象山铁矿优化矿块参数, 提高出矿能力^[5], 喀拉通克铜镍矿优化采矿方法, 优化了采切比^[6], 某铜矿优化其采矿方法, 使生产能力、回采率、机械化程度明显增加^[7], 某铁矿采用FLAC3D和Rhino从应力、位移和塑性区对比分析不同方案的可行性, 以此优化采场

回采长度^[8], 良山铁矿在优选采矿方法后, 进行了数值模拟研究采场稳定性, 确保采场安全^[9]。

姑山铁矿曾是一座达到100万t/年以上产量的露天矿山, 从1954年开始生产, 经过六十多年的露天开采, 地表资源已枯竭。为继续开采地下资源, 已开展露转井工作, 综合考虑姑山铁矿床赋存特征、生产现状及开采技术条件, 为保证采场安全生产、实现贫富矿分采, 对围岩条件一般矿段推荐选用上向水平分层充填采矿法, 对于部分围岩条件较差矿段推荐选用上向进路充填采矿法。而采矿方法的选择和设计往往通过工程类比的方式确定, 具有一定的主观性和经验性^[10-11], 而目前数值模拟手段方法在采矿工程领域应用的愈发广泛, 能直观的表现不同采场结构下的应力、位移等情况, 对采矿方法优化提供了新方法^[12], 所以本研究通过数值模拟的方式对采矿方法进行参数优

[作者简介] 杨明(1987—), 男, 工程师, 从事采矿生产方面的管理工作。

[基金项目] 国家自然科学基金(52374209); 山东省自然科学基金(ZR2023ME012)。

[引用格式] 杨明, 石永豹, 朱金文, 等. 基于数值建模的姑山铁矿采矿方法优化研究[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(5): 6-15.

化,旨在确保矿山高效安全生产。

2 姑山铁矿三维地质模型构建

矿山地形复杂,矿体形状极不规整,正常情况下很难通过模拟方法获得比较准确的空区形态和关键剖面图,对于其外部载荷与地形特征的模拟存在较大误差,难以胜任地表生产区域稳定性的分析。因此,有必要对原始地质资料数据进行收集,建立真实反映复杂地层载荷和地形地貌条件的三维矿山模型,为矿山相关模型的分析与准确计算提供可靠数据,为采矿方法选择提供依据。

构建三维地质模型主要流程是根据收集的钻孔资料、-300 m 中段平面图和 -350 m 中段平面图等资料,运用 3DMine 构建姑山铁矿局部地质资源和矿体模型、局部开拓巷道系统模型。

2.1 地质数据库的建立

通过收集矿区探矿工程测量成果、原始地质编录成果、分析测试成果以及水文观测数据,利用 3DMine 软件创建矿区地质数据库,由于矿区的探矿工程均为钻孔,故需对钻孔信息进行处理并建立钻孔数据库,钻孔数据库由钻孔定位表、钻孔测斜表、岩矿石化验表和岩性表 4 个数据表组成,4 个数据表由一个 Excel 表格承载,用于后期的数据导入。创建好的数据库可以对任意数据进行查询、修改、增加、统计分析等。钻孔空间位置如图 1 所示。

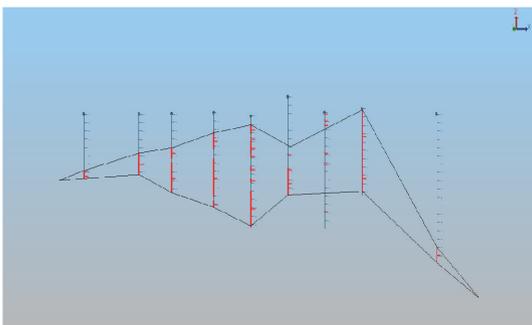


图 1 钻孔空间位置

2.2 局部矿体模型的建立

矿体模型的建立,首先要对矿体进行矿体解译,也就是我们常说的“圈矿”。在各地质剖面图中运用圈矿原则和矿床工业指标等完成矿体解译,解译完成后只显示各地质剖面图中同一矿体的解译线,由一个(单工程控制的矿体)或者多个封闭的矿体解译线构成的矿体线,15 号和 19 号勘探线之间局部矿体模型如图 2 所示。

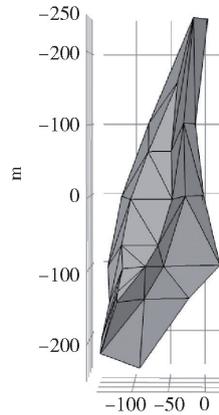


图 2 局部矿体模型

2.3 地表模型的建立

地表模型即是 3DMine 中的表面模型。某矿利用原有地形图,对地形图进行分析、整理、优化,形成地形等高线、道路、地表构(建)筑物等建模所需基础数据,保存为 3ds 线文件;利用“等高线赋高程”功能,完成等高线高程赋值,生成 DTM 表面模型。

2.4 矿体与开拓系统模型

对姑山矿开拓系统设计平面布置图进行处理,对井巷、竖井、硐室等赋标高,不同标高、不同标段工程分层保存,形成单线立体图,基于井巷中心线和设计断面,构建成井巷三维模型,实现不同区段、不同断面的不同显示,有效区分和管理开拓工程,将地表模型、矿体模型、井巷模型等组合,可得到不同的组合模型,用于不同问题的分析决策,图 3、图 4 所示为矿体与开拓系统模型的正视图和俯视图。

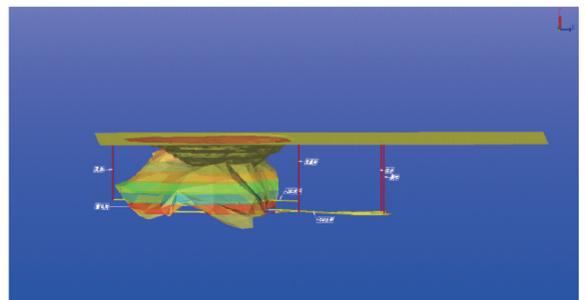


图 3 姑山铁矿矿体与开拓系统模型正视图

3 基于数值模拟的采场结构参数优化

对于不同采矿方法的采场结构参数优化,本研究采用的是先通过理论分析(如 Mathews 稳定图解法)和工程类比的方法确定合理的参数范围,制定出 3~4 组采场参数方案;再通过数值模拟的方法比较不同方案之间的优劣性,最终确定最为合理的采

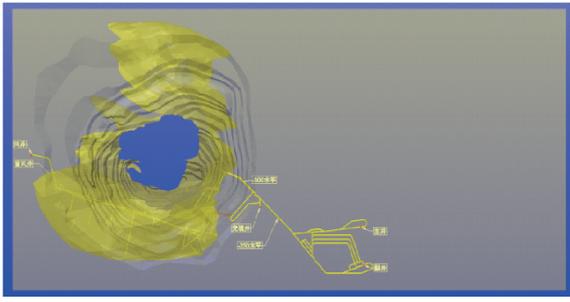


图4 姑山铁矿矿体与开拓系统模型俯视图

场参数。

3.1 建立几何模型

建立合理的数值模型是分析可靠性的前提条件,数值模型在考虑实际矿山地质情况下,进行合理优化,以确保在模拟准确的情况下,能得到模拟结构。

本研究在综合考虑各因素后,根据开采矿体建立了 $400\text{ m} \times 700\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的数值模型,模型的展示和网格剖分如图5所示。并根据地质调查得到的矿岩物理性质参数,具体参数见表1,为保证模型的准确性,需设定准确的边界条件,具体见表2。

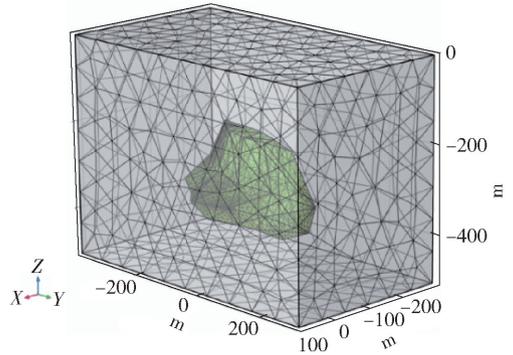


图5 模型展示及网格剖分

表1 物理力学参数

材料类型	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	内聚力/MPa	内摩擦角/ $^{\circ}$	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比 μ	
围岩	辉长闪长岩	1.65	0.03	22	1.0 ~ 5.0	10 ~ 30	0.24
	凝灰岩	2.10	0.028	28	10 ~ 30.0	10 ~ 60	0.22
矿体	4.07	0.35	42	14.0	14	0.27	

表2 模型边界条件

边界名称	边界条件
模型底面	固定约束
模型四周	辊支撑
模型上表面	自由
其他	自由

3.2 上向水平分层进路充填法的采场参数优化

针对该采矿方法的数值模拟根据进路断面尺寸的不同,一共分为四个方案,各方案的具体参数见表3。不同进路之间隔三采一,同时开采4条进路,开采完成后及时进行充填,然后进行下一轮回采工作。通过比较首次开采完成后,进路周边的应力和位移分布情况,从中选择两种方案进行更深入的研究,最终选出一种最合适的回采方案。

表3 采场参数优化备选方案

方案	断面尺寸/m	进路长度/m	进路总数
方案一	4 × 3	45	40
方案二	4 × 4	45	30
方案三	4 × 5	45	24
方案四	4 × 6	45	20

1) 方案初选

本研究将通过分析不同方案在开采完成后,巷道周边 Von Mises 应力和位移的分布情况来评估采场的稳定性。图6所示为不同方案在首次进路开采完成后,进路周边 Von Mises 应力的分布情况,从图中可以看出四种方案呈现出相同的应力分布规律:在回采进路顶底板形成低于原岩应力的应力降低区,在进路两帮会形成高于原岩应力的应力增高区。这主要是由于回采进路的矿石开采后,破坏了原有应力的平衡,上覆岩层的受力状态由三维变为二维,其应力向进路两帮转移,应力重新分布,直到达到新的平衡。对比四种方案的应力分布情况可知,随着进路断面面积的增加,进路两帮的应力集中系数增大,受到的应力增大。同时,受应力重新分布影响的岩层范围增加,进路稳定性降低。

图7所示为不同方案在首次进路开采完成后,回采进路周边垂直位移的分布情况。从图中我们可以看出,四种方案都发生了不同程度的底鼓和顶板下沉现象,且底鼓和顶板下沉的程度与进路断面面积成正相关。方案一到方案四顶板下沉位移和底鼓位移分别达到了 4.47 mm 和 4.29 mm、5.34 mm 和

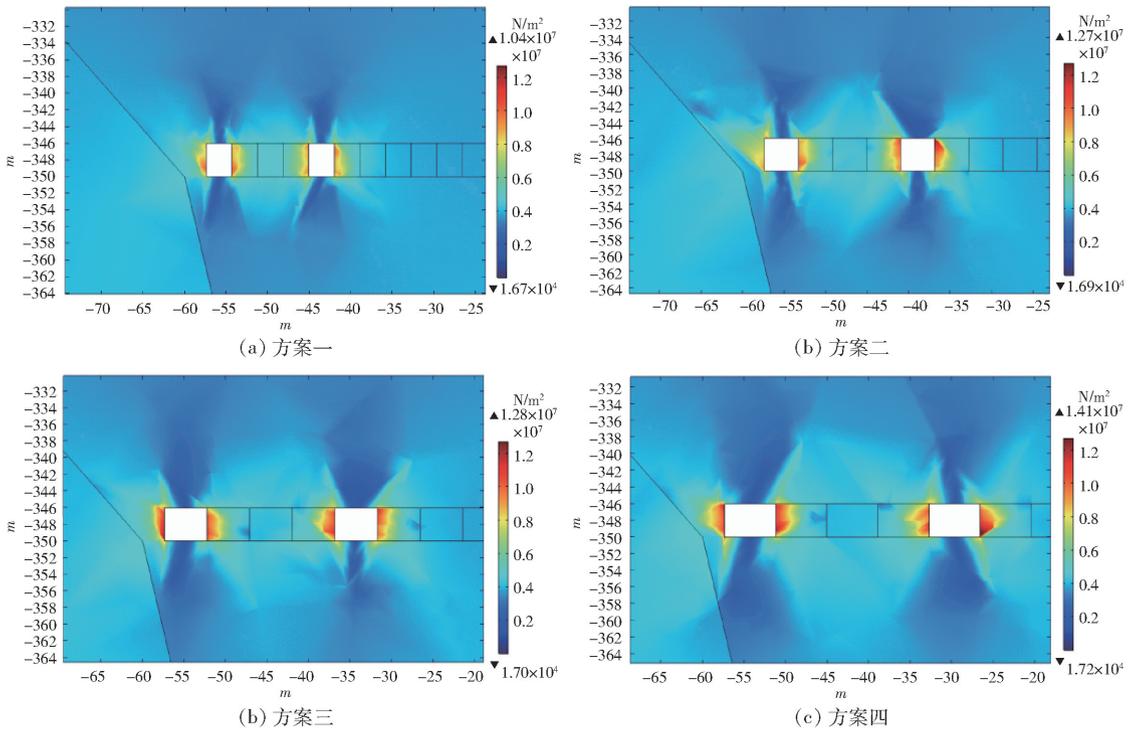


图6 不同方案 Von Mises 应力分布云图

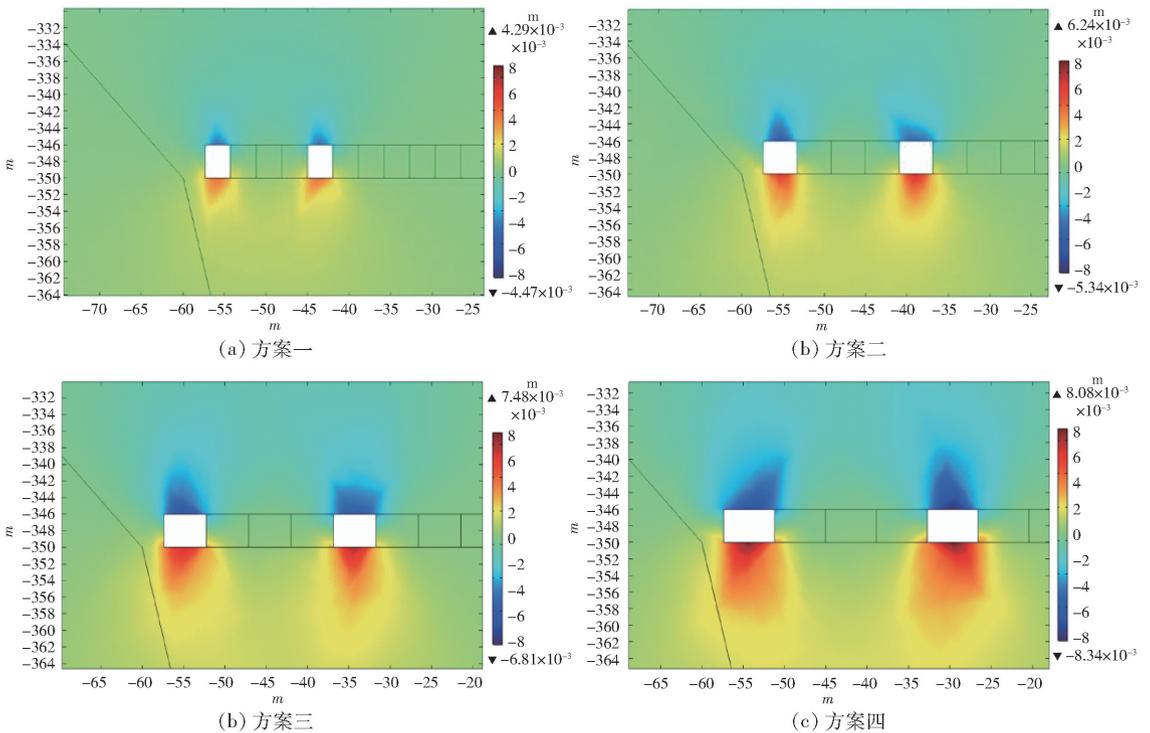


图7 不同方案垂直位移分布云图

6.24 mm、6.81 mm 和 7.48 mm、8.34 mm 和 8.08 mm。回采进路周边的位移分布情况与应力分布情况密切相关,底鼓现象主要是由于岩体受到巷道两帮的高压应力挤压,使得底板向上鼓起;顶板下

沉则主要是由于顶板在没有下部支撑时,受自重应力的作用而发生下向位移。

综合四种方案的应力和位移分布情况,方案一的应力集中系数最小,受到的应力最小,同时发生位

移也最小;方案四的应力集中系数最大,受到的应力最大,同时发生位移也最大;方案二和方案三处于中间状态。矿石生产过程中既要考虑生产的效率,也要注重生产过程中的安全。回采进路周边的应力集中系数越大,意味着受到的压应力和拉应力也越大,矿岩破坏造成损失的机率越大,因此初步排除方案四;进路断面过小则会降低生产效率,造成不必要的生产能力浪费,因此排除方案一。方案二和方案三需要进一步分析。

2) 方案优选

两种方案的回采顺序均为结束上一轮回采并充填后,再开始下一轮回采。图8所示为方案二和方案三在不同回采次数下,进路周边的应力分布情况。

从图中可知,在充填体和回采进路顶底板周围形成了应力降低区,在未采进路周围以及充填体与矿岩交界处形成了应力增高区。这主要是由于回采进路的矿石开采后,破坏了原有应力的平衡,上覆岩层的受力状态由三维变为二维,应力向进路两帮转移;充填体强度相对矿岩而言较弱,因此其承受的应力较低,多余的原岩应力需要向附近围岩转移。同时,回采进路与充填体接触一帮的应力明显低于与矿岩接触一帮,其原因与上述原因相同。对比两种方案,发现相同条件下,方案三(4×5 m)受到的应力要高于方案二(4×4 m),且随着开采的不断进行,二者的差距增大。

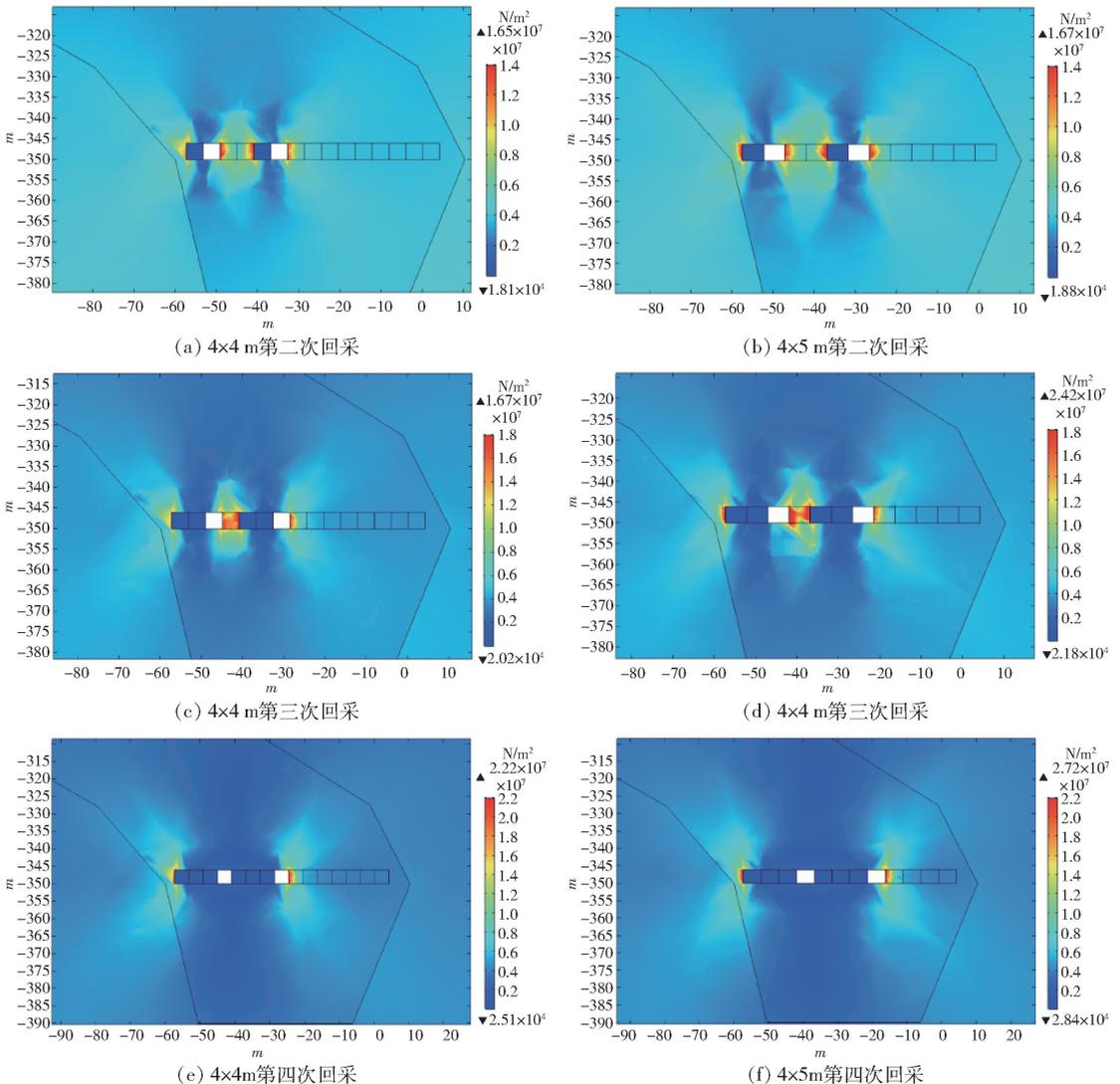


图8 不同方案 Von Mises 应力分布云图

随着开采的不断进行,开采的区域也越来越大,采场周围的应力集中系数不断增大,同时应力重新

分布影响的范围也越来越大。进行第四次回采时,方案二和方案三的最大应力分别达到了 22.2 MPa

和 27.2 MPa,其中方案三受到的应力已接近大多数矿岩的抗压强度。

图 9 所示为方案二和方案三在不同回采次数下,进路周边的垂直位移分布情况。从图中可以看出由于充填体的强度较低,所以充填体周围和回采进路周围形成了顶板岩层下沉、底板岩层向上鼓起的现象。对于未采进路,由于其强度较好,

所以基本没有或只有很小的底鼓和顶板下沉现象发生。对比两种方案,发现相同条件下,方案三(4×5 m)发生的位移要大于方案二(4×4 m),且受影响的区域也要更大。随着开采的不断进行,开采的区域也越来越大,发生位移也不断增加,以第四次回采为例,方案二和方案三的最大位移分别达到了 4 cm 和 5 cm。

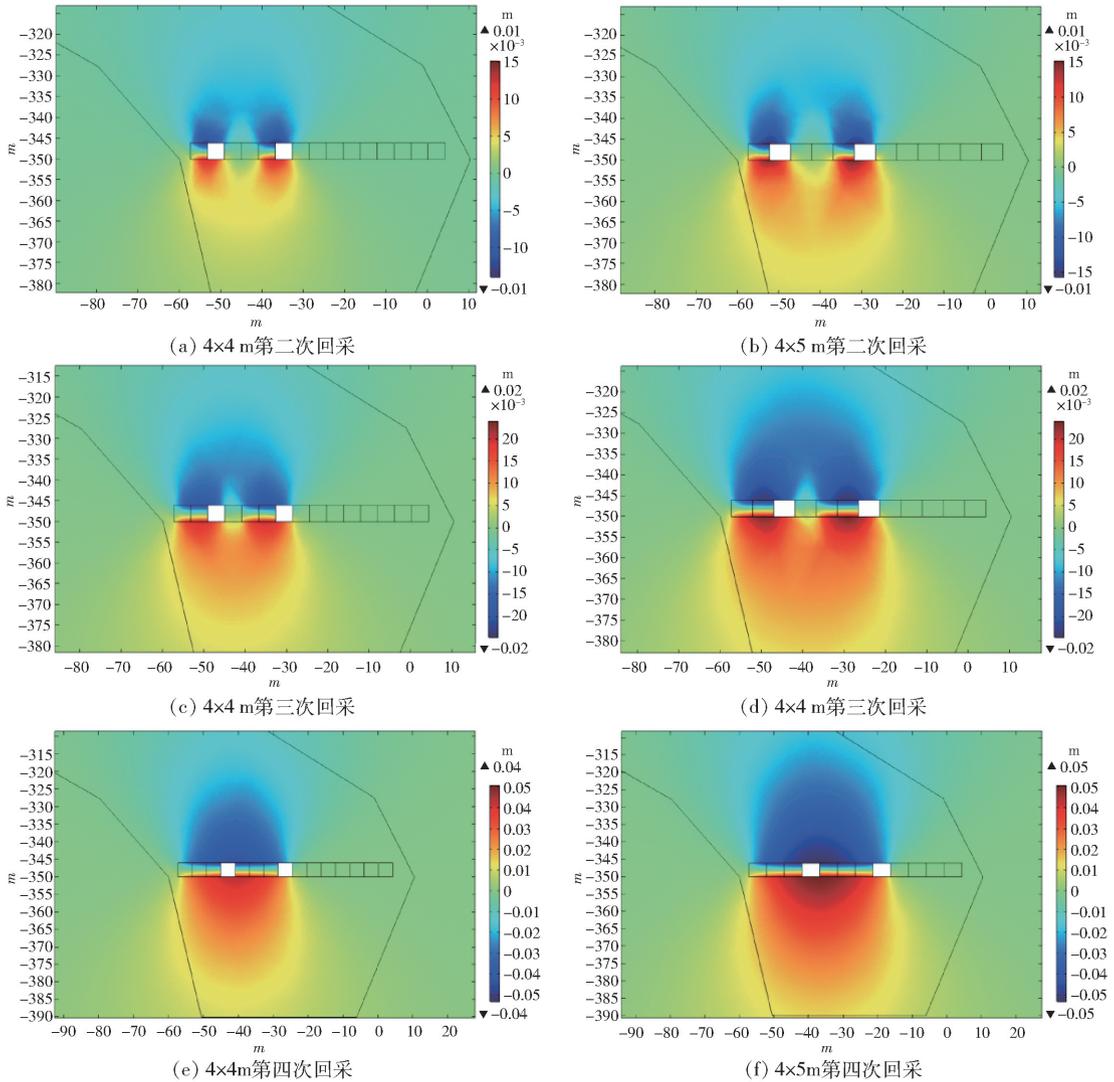


图 9 不同方案垂直位移分布云图

结合上述模拟结果与分析,综合考虑不同方案岩层中的位移和应力分布情况,同时结合现场已揭露矿岩的稳定性以及生产组织效率,决定采用能兼顾开采安全和生产效率的方案二(4×4 m)作为最终的采场参数。

3.3 向水平分层充填法的采场参数优化

针对该采矿方法的数值模拟根据矿房、矿柱尺寸的不同,一共分为三个方案,各方案的具体参数见

表 5。不同矿房或矿柱之间隔一采一,先采矿房后采矿柱,一轮开采完成后及时进行充填,然后进行下一轮回采工作。通过比较不同开采方案,采区周边的应力和位移分布情况,从中选择一种最合适的回采方案。

需要说明的是上向水平分层充填法的分层高度为 4 m,充填矿房时使用高强度充填体,作为回采矿柱的支撑;充填矿柱时使用低强度充填体进行充填,

表5 采场参数优化备选方案

方案	矿房+矿柱/m	矿房数目	矿柱数目
方案一	8+10	5	5
方案二	10+8	5	5
方案三	12+8	4	5

以节约充填成本。图10所示为三种方案回采矿房时的应力分布云图。从图中我们可以看出,进行第一次回采时,应力分布规律与使用进路回采相同,即

在顶底板岩层中形成应力降低区,在两帮围岩中形成应力增高区;进行第二次回采时,在回采分层附近同样会形成应力集中区和应力增高区;由于充填体强度要低于矿岩强度,所以在充填体与矿岩交界处也会形成应力集中区,但在已充填矿房顶底板的一定区域会形成应力降低区。总的来说,应力重新分布的影响范围和应力集中系数均与矿房尺寸和分层断面尺寸成正相关。

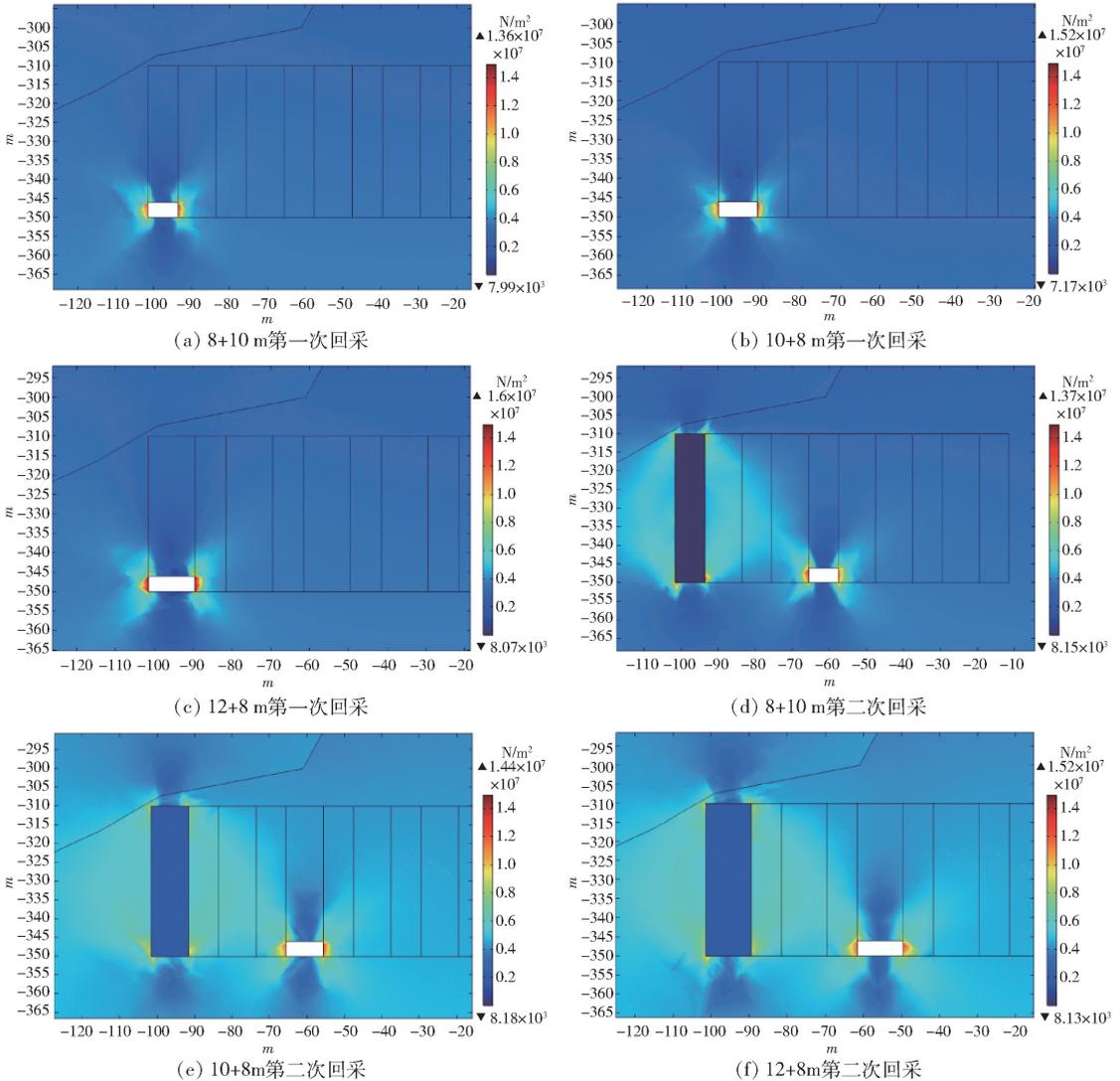


图10 不同方案回采矿房 Von Mises 应力分布云图

图11所示为三种方案回采矿柱时的应力分布云图。从图中可以看出,矿房回采完成后,第一次回采矿柱时,由于充填体强度低于矿岩强度,其承受的应力也较低,因此其上覆围岩受到的应力会向附近的矿柱转移,使得矿柱中的应力高于原岩应力,所以矿房回采完成后要及时回采矿柱,避免矿柱长期处

于高应力状态而被过多破坏,不利于其回采;矿房尺寸和充填区域越大,矿柱需要承受由于矿房开采引起的应力转移越大,故而矿房尺寸越大、矿柱尺寸越小时在矿柱中形成的应力集中现象越明显,因此方案一(8+10 m)矿柱受到的应力最低,方案三(12+8 m)矿柱受到的应力最大。最后一次回采矿柱时,

采场的其他区域均已充填,由于分层断面受到的应力大小与断面面积成正相关,同时因为矿房充填体强度大于矿柱充填体,矿房尺寸越大越有利于分层

断面获得更好的应力分布。所以最后一次回采矿柱时,方案二(10+8 m)受到的应力最小,方案一(8+10 m)受到的应力最大。

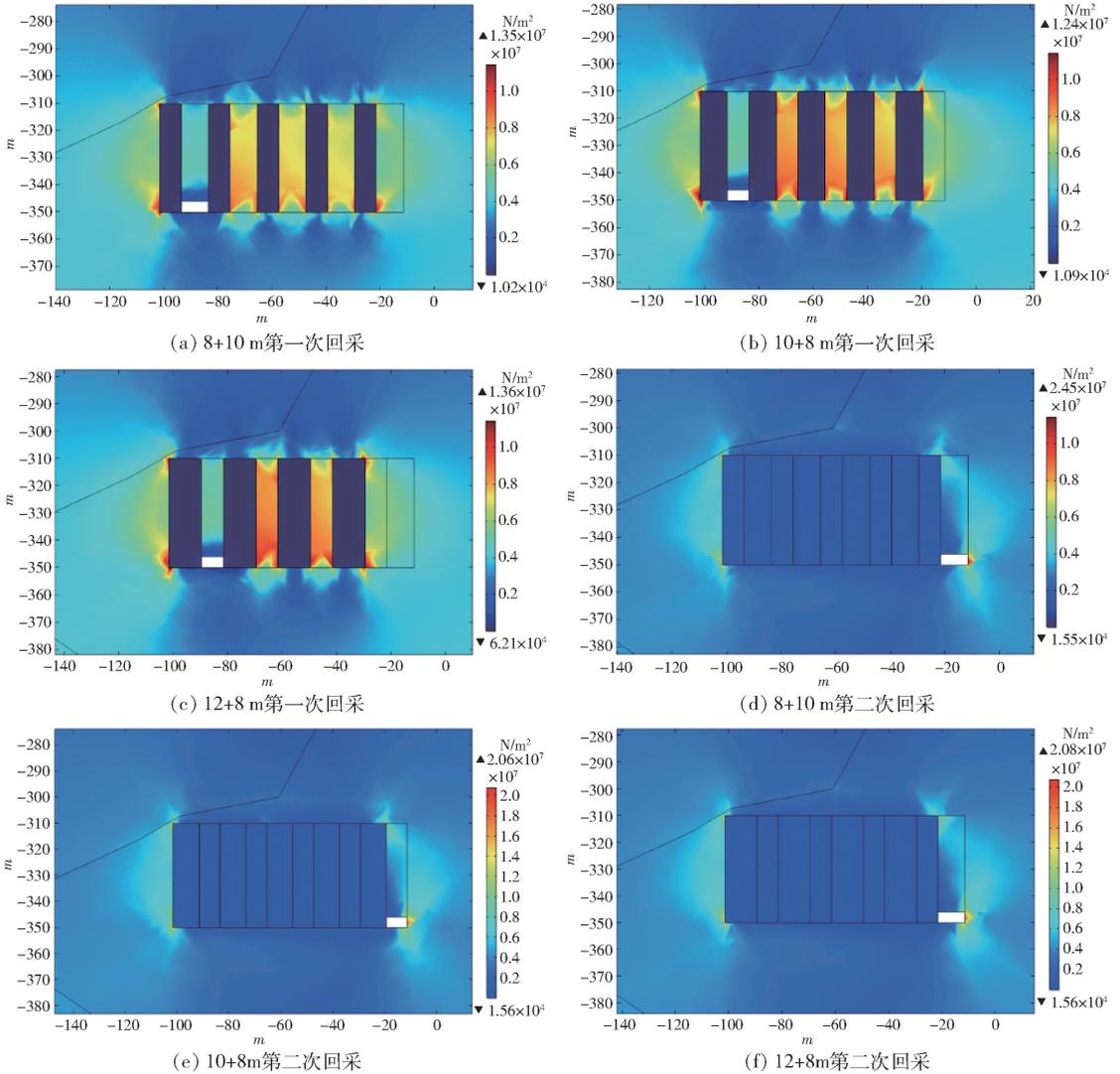


图 11 不同方案回采矿柱 Von Mises 应力分布云图

图 12 所示为三种方案回采矿房时的垂直位移分布云图。从图中可以看出,无论是第几次回采,回采分层的顶板附近都会发生不同程度的下沉,底板附近会发生不同程度的底鼓现象,这种现象与应力的分布情况密切相关,具体来说回采分层附近岩层的变形程度与回采分层断面大小成正相关;充填体由于其自身强度较低,因此会发生较大的变形,其中中心部位的变形量最大,不同方案之间充填体变形量与充填体积相关(即矿房尺寸),充填体积越大,变形越大。

生的位移也越大,且最大位移基本发生在充填体的中部和回采分层的顶板。最后一次回采矿柱时充填体区域的体积接近,但由于矿房和矿柱的充填体的强度不同,高强度充填体比重大的位移会略小,具体来说三种方案的最大底鼓位移和最大顶板下沉量分别达到了 6 cm 和 19 cm、6 cm 和 18.4 cm、6 cm 和 18.1 cm。

图 13 所示为三种方案回采矿柱时的垂直位移分布云图。从图中可以看出,充填体积越大,采场发

结合上述模拟结果与分析,可以得出如下结论:矿房尺寸较大的方案在回采矿柱时能获得更加有利的应力分布和较小的位移量,但是矿房尺寸越大,对矿岩的强度和自稳能力要求更高;矿柱尺寸较大的方案则有利于矿房的回采和节约充填成本。综合考

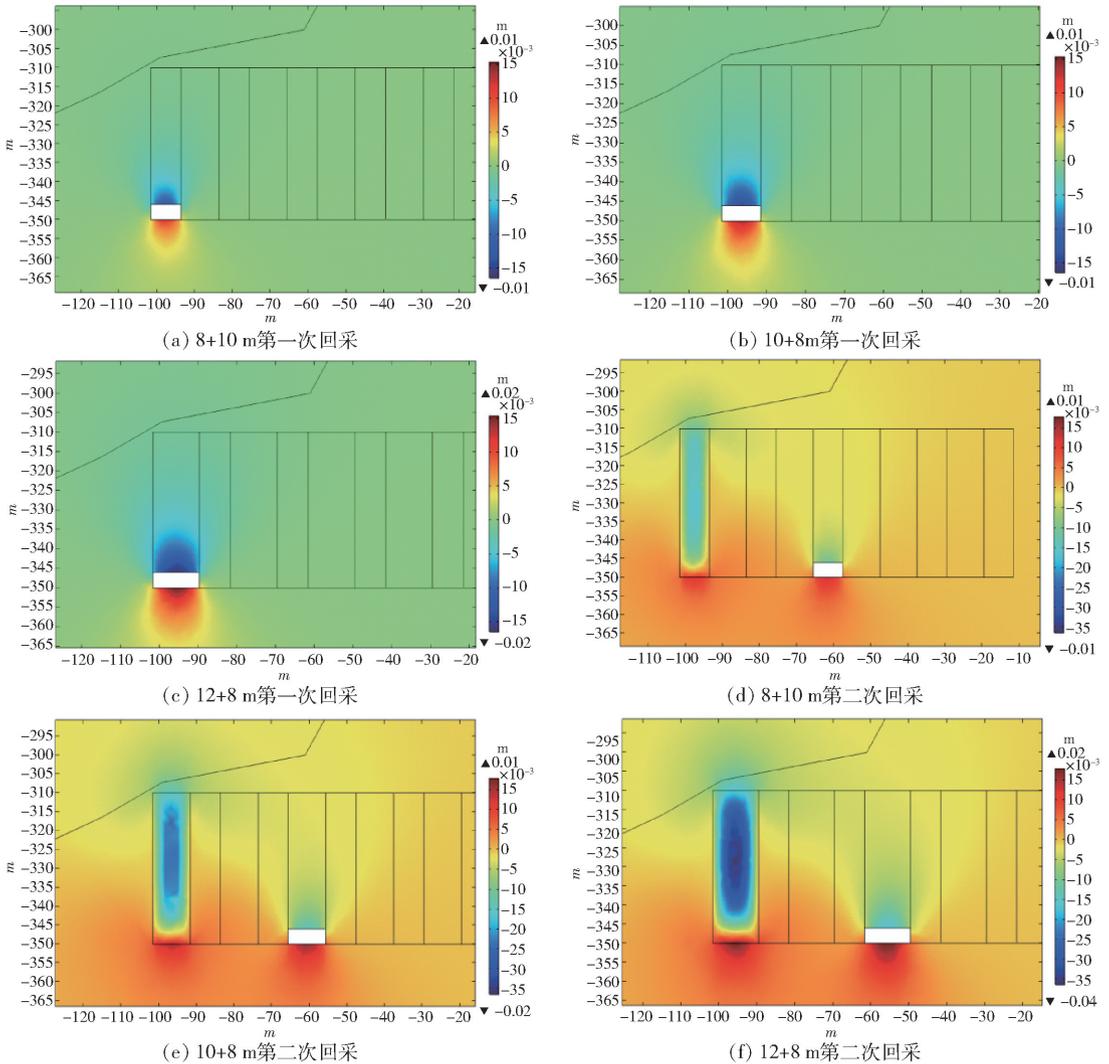


图 12 不同方案回采矿房垂直位移分布云图

考虑三种方案岩层中的位移和应力分布情况,同时结合现场已揭露矿岩的稳定性以及生产组织效率,决定采用位移和应力都能满足要求并能留有足够安全系数且具有较高生产效率的方案二(10+8 m)作为最终的采场参数。

4 结论

根据数值模拟对多种方案进行了岩层应力分布情况和岩层位移分布情况进行了模拟分析,最终结合生产组织效率、安全等多方面因素考虑,得到如下结论:

- (1) 上向水平分层进路充填法采用 4 m × 4 m 的进路断面进行回采。
- (2) 上向水平分层充填法的矿房尺寸确定为 10 m,矿柱尺寸确定为 8 m。

[参考文献]

- [1] 张爱民,刘育明,王晓谋等.深井大规模盘区回采采场结构参数研究[J].中国矿山工程,2022,51(3):38-42.
- [2] 陸礼镛.采矿方法是坑采矿山设计和生产的关键[J].有色矿山,1983(7):7-12.
- [3] 毛荐新,汪令辉,杨志国.冬瓜山铜矿高大采场二步回采顺序优选研究[J].中国矿山工程,2022,51(1):23-27+40.
- [4] 石大庆,王貽明,张纯锋,等.丰山铜矿机械化盘区高效采矿方法优化[J].金属矿山,2023(6):40-44.
- [5] 满东辉,张鹏,陈勇,等.白象山铁矿采矿方法优化研究[J].现代矿业,2023,39(11):59-62.
- [6] 周光信,王亚军,李晓辉.喀拉通克铜镍矿采矿方法优化研究[J].采矿技术,2023,23(6):12-17.
- [7] 胡建利.某高寒高海拔铜矿采矿方法优化与应用[J].金属矿山,2023(4):22-26.

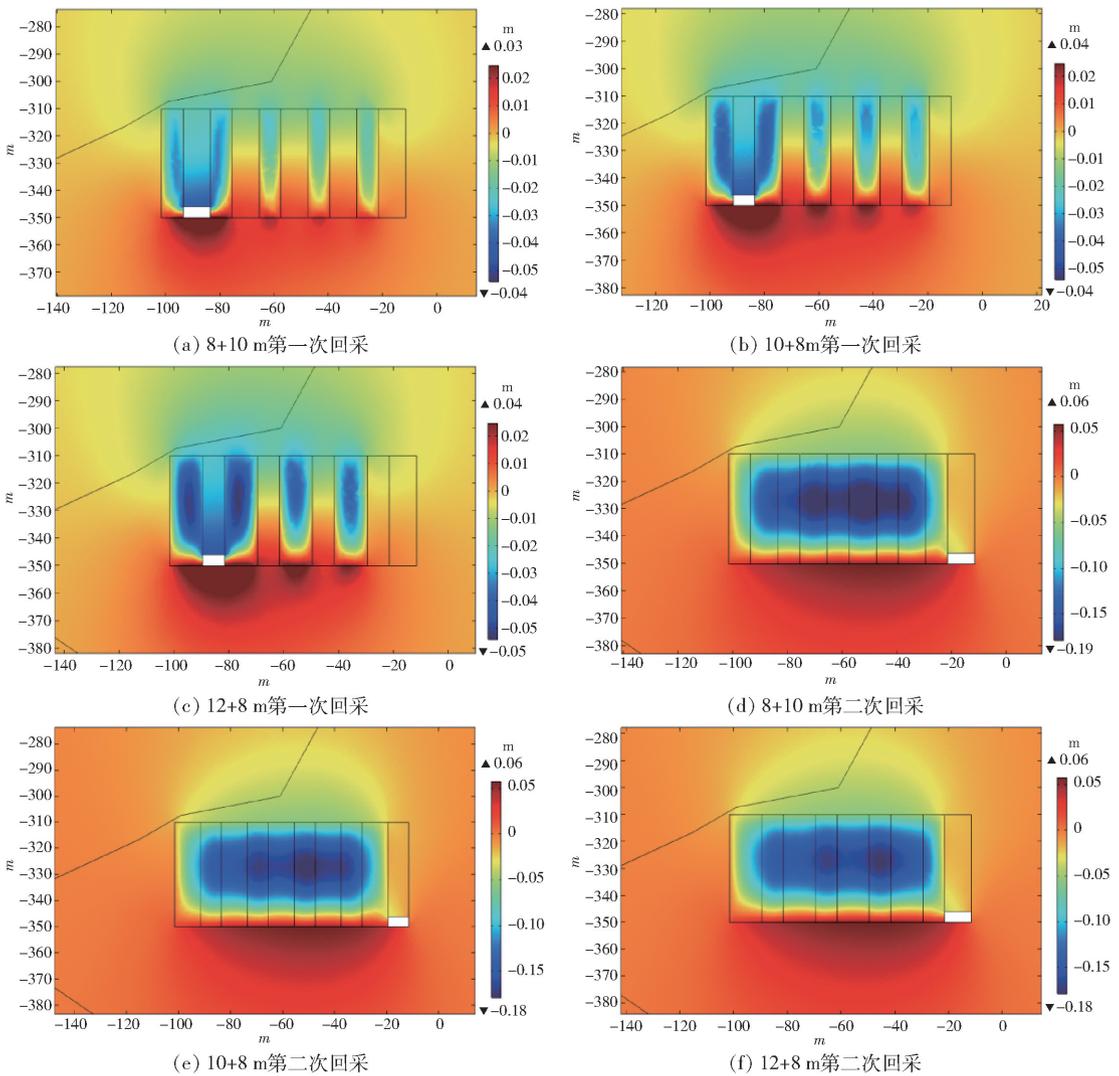


图 13 不同方案回采矿柱垂直位移分布云图

[8] 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.

[9] 黄桂林,吴志南. 缓倾斜厚大磷矿体开采方案技术优化[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(6):35-38+44.

[10] 韦志兴,韦勇明,肖体群,等. 某锰矿倾角变化矿体采矿方案创新优化及应用[J]. 有色金属(矿山部分),

2023, 75(1):45-49.

[11] 李真,褚洪涛. 基于模糊数学的柿竹园矿采矿方法优选[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(8):5-8.

[12] 张伟,倪彬,刘晓明. 数值分析技术在地压显现矿山采矿方法选择中的应用[J]. 中国矿山工程, 2014, 43(1):1-4+31.