# 某破碎厚大矿体稳定性分析及结构参数优化研究*

彭跃金[1,2],欧志成[3],林元生[1,2],杨宁[1,2],欧任泽[1,2],王辉林[3]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
3.西部矿业股份有限公司, 青海 西宁市 810008)

**摘要**:保证采场稳定性是支撑破碎厚大矿体高效安全开采的基础。以某矿破碎厚大矿体开采为工程背景,围绕下向壁式充填采矿法在矿体回采过程中的采场结构参数开展优化研究,从主应力、竖向位移和塑性区3个角度重点分析了进路尺寸、进路布置形式及充填次数对采场稳定性的影响。研究结果表明:开挖区域顶板主应力近似呈均匀分布,最小主应力在上盘及邻近区域表现为拉应力,而最大主应力始终为压应力;采场顶板中央沉降量最大,上盘区域沉降亦较明显,下盘未见沉降,仅出现轻微鼓胀现象。推荐的最优结构参数为:进路尺寸3.0 m × 3.0 m,进路垂直交叉呈"十"字形布置,并采用一次全高充填工艺。工业试验表明,该优化方案可将采场损失贫化率控制在约5%,采矿成本控制在150元/t,有效提升了资源回收效率与经济效益,为矿山后续安全高效开采提供了可靠的技术支撑。

**关键词**:破碎厚大矿体;结构参数优化;下向壁式充填法;采场稳定性;数值模拟
**中图分类号**:TD802 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)11-0038-08

**Stability Analysis and Optimization of Structural Parameters of a Broken and Thick Ore Body**

*PENG Yuejin*[1,2], *OU Zhicheng*[3], *LIN Yuansheng*[1,2], *YANG Ning*[1,2], *OU Renze*[1,2], *WANG Huilin*[3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Western Mineral Co., Ltd., Xining, Qinghai 810008, China)

**Abstract**: Ensuring the stope stability is the foundation for the efficient and safe extraction of broken and thick ore bodies. Taking the mining of a broken and thick ore body in a certain mine as the engineering background, researches were conducted on optimizing the structural parameters of the stope during the orebody mining process using the downward wall filling mining method. The influences of drift dimensions, drift layout patterns, and filling frequencies on stope stability were analyzed in detail from three perspectives of principal stress, vertical displacement, and plastic zone. The findings indicate that the principal stress in the roof of the excavation zone exhibits an approximately uniform distribution, with the minimum principal stress showing tensile stress in the hanging wall and adjacent areas, while the maximum principal stress remains compressive. The central roof of the stope experiences the greatest settlement, while significant settlement is also observed in the hanging wall area, with no settlement but slight bulging in the footwall. The recommended optimal structural parameters are as follows, drift dimensions of 3.0 m×3.0 m, a vertical cross-shaped layout of drift, and a full-height filling process. Industrial trials demonstrate that this optimized solution can control the loss and dilution rate of the stope to approximately 5%, with mining costs maintained at 150 yuan per ton. The resource recovery efficiency and economic benefits are effectively enhanced, providing reliable technical support for subsequent safe and efficient mining operations in the mine.

**Key words**: Broken and thick ore body, Optimization of structural parameter, Downward wall filling mining method, Stope stability, Numerical simulation

## 0 引言

矿产资源是生产生活的物质基础,实现矿产资源的高效安全开发对保障经济增长与资源回收具有不可或缺的意义。破碎厚大矿体在我国分布广泛,但尚未形成一种行之有效的开采方法。优化采场结

* **收稿日期**:2024-12-05
**基金项目**:"十四五"国家重点研发计划项目(2022YFC2904001)
**作者简介**:彭跃金(1993—),男,山西怀仁人,硕士,工程师,主要从事采矿技术研究。E-mail:1820943728@qq.com

构参数是解决这一问题的关键。常见的采场结构参数包括采场尺寸、采场布置形式等。目前,针对采场结构参数的优化大致可分为5个方法:综合理论分析[1-3]、数值模拟法[4-5]、经验类比法[6-7]、相似模拟试验法[8]和力学分析法[9-10]。李加州等[11]基于AHP-TOPSIS模型,选取评价指标优选采矿方案,并利用综合评价模型优选出最佳采场结构参数;徐祥熙等[12]综合岩体质量分级,基于Mathews图解法给出某铁矿间柱回采最佳结构参数;展卫露等[13]通过数值模拟手段,对拟定采矿方案进行参数优化,提升了采场生产能力,取得了较好的经济技术指标;朱晨迪等[14]利用数值模拟软件优化了不同顶板条件下矿柱的厚度及采场尺寸;刘冬等[15]根据现场节理扫描等手段确定了地质特性,建立了破碎矿体数值模型以优化采场进路跨度;李夕兵等[16]研发了相似模拟试验平台,通过正交试验建立了岩体计算函数,得到对应矿山的最优采场结构参数。在现有研究中,力学分析虽基于各类理论公式进行了一定的简化,但与实际情况存在一定的出入。相似模拟试验耗时耗力,成本较高;经验类比则高度依赖于专业能力和从业经验。而数值模拟手段具有简便可靠的优势,计算工具以及模拟软件能够支持大尺度模型的仿真分析,已被广泛地应用于采场结构参数优化。

针对某矿矿岩条件破碎但开采价值较高的特点,为实现该矿矿产资源的高效安全回采,本研究基于折减后的矿体力学参数建立数值模型,对开采过程进行仿真模拟,科学地确定了最优采场结构参数,以期为该矿矿产资源回收提供技术依据。

## 1 工程概况与数值模拟

### 1.1 工程概况

某矿矿体极为破碎,呈块状、片状及粉末状,易破碎,上下盘围岩和夹石节理裂隙发育,多呈碎裂状,岩体稳定性较差。整个矿体呈现出层状,倾向南,倾角为40°～45°,平均走向长350 m,矿体平均厚度为35 m。在该矿岩条件下,最终选择采用下向分层壁式充填采矿法进行开采。

### 1.2 矿区岩体力学参数及模型建立

下向分层壁式充填采矿法合理的采场结构参数与回采顺序是支撑井下采场安全高效生产的关键。根据矿体赋存条件和下向分层壁式充填采矿法的技术特点,建立矿体开采模型,长80 m,高48 m(+30～+78 m),倾角45°,矿体厚35 m,矿体模型参数见表1。选取进路高度、进路宽度、进路布置方式及合理充填次数为不同结构参数。在采场($Z$=60 m)中线上盘、中部和下盘3个位置布置监测点,得到不同结构参数条件下最大、最小主应力,位移沉降量和塑性区分布的模拟结果,具体布置方案见表2。其中进路布置方式以"器"字代表竖向平行布置,以"品"字代表竖向平行横向交错布置,以"十"字代表横竖垂直交错布置。图1为矿体可视化模型,图2为采场正视图。

**表1 岩体力学参数及充填体参数**

**Table 1 Rock mechanics parameters and backfill parameters**

| 材料 | 弹性模量 $E$/GPa | 体积模量 $K$/GPa | 剪切模量 $G$/GPa | 抗拉强度 $T$/MPa | 密度 $\rho$/(kg/m$^3$) | 黏聚力 $C$/MPa | 内摩擦角 $\varphi$/(°) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 矿体 | 3.00 | 2.78 | 1.14 | 0.05 | 2 800 | 0.80 | 25 |
| 围岩 | 10.00 | 7.25 | 3.94 | 0.15 | 2 980 | 2.00 | 27 |
| 高强度充填体 | 1.10 | 0.92 | 0.42 | 0.16 | 2 200 | 0.30 | 22 |
| 低强度充填体 | 0.70 | 0.58 | 0.27 | 0.14 | 2 100 | 0.25 | 20 |

**表2 布置方案**

**Table 2 Layout schemes**

| 试验分组 | 进路高度/m | 进路宽度/m | 进路布置方式 | 充填次数 | 备注 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3.0 | 2.5～5 | "十" | 1 | 进路高度 |
| 2 | 4.0 | 2.5～5 | "十" | 1 | 进路高度 |
| 3 | 5.0 | 2.5～5 | "十" | 1 | 进路高度 |
| 4 | 3.0 | 2.5 | "十" | 1 | 进路宽度 |
| 5 | 3.0 | 3.0 | "十" | 1 | 进路宽度 |
| 6 | 3.0 | 4.0 | "十" | 1 | 进路宽度 |
| 7 | 3.0 | 5.0 | "十" | 1 | 进路宽度 |
| 8 | 3.0 | 3.0 | "器" | 1 | 进路布置方式 |
| 9 | 3.0 | 3.0 | "品" | 1 | 进路布置方式 |
| 10 | 3.0 | 3.0 | "十" | 1 | 进路布置方式 |
| 11 | 3.0 | 3.0 | "十" | 1 | 充填次数 |
| 12 | 3.0 | 3.0 | "十" | 2 | 充填次数 |

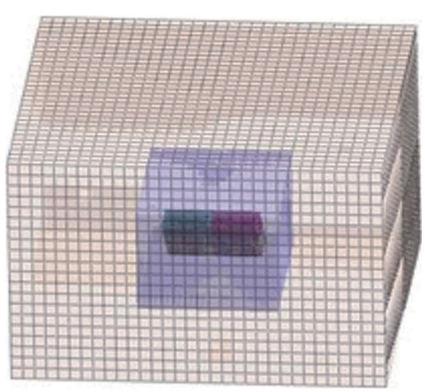


**图1 矿区整体可视化模型**

**Fig.1 Overall visualization model of the mining area**

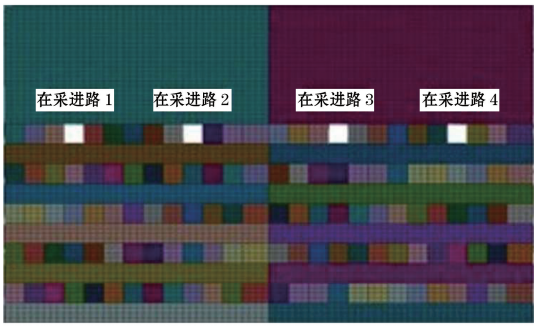



**图 2 采场正视图**

**Fig.2 Front view of the stope**

## 2 模拟结果分析

### 2.1 进路高度模拟结果分析

模拟设置进路高度分别为 3.0 m、4.0 m、5.0 m，模拟整个矿房的回采充填全过程。得到不同进路高度下盘区最大、最小主应力的模拟结果，如图 3 所示，数据符号用于区分应力状态，拉应力表示为正值，压应力表示为负值(下同)。随着采场“开挖—充填”循环的进行，采场上盘和中部的最小主应力逐渐变小，表现为拉应力，而下盘的最小主应力一直保持增大的趋势，始终表现为压应力。这是由于矿体呈 40°～50°倾斜状态，且矿体厚大，上盘围岩和矿体对充填体存在倾覆压应力，采场中线附近的充填体在倾覆压应力场作用下发生沉降，且沉降量最大，从而表现为受拉。与前两者不同的是，下盘充填体前部和上部虽也受到倾覆压应力，但其始终受到下盘围岩的支撑应力，故下盘监测点的最小主应力一直增大，表现为压应力。

由图 3(a)可知，采场开挖充填循环完成后，最小主应力随着进路高度的增加而逐渐降低，但降低幅度并不大，上盘监测点的最小主应力为 0.079～0.093 MPa，中部监测点的最小主应力为 0.017～0.050 MPa，下盘则表现为压应力，进路高度越高，压应力越大。

由图 3(b)可知，采场上盘的最大主应力先逐渐变大，随着进路高度的进一步增加，最大主应力又会逐渐变小，而采场下盘和中部的最大主应力一直保持增大的趋势。上盘和中部测点压应力整体小于下盘，表明靠近采场上盘的张拉变形程度较靠近下盘更为剧烈。采场开挖充填循环完成后，最大主应力随着进路高度的增加而逐渐增大，上盘监测点的最大主应力为 0.16～0.21 MPa，中部监测点的最大主应力为 0.26～0.47 MPa，下盘监测点的最大主应力为 7.1～8.3 MPa。

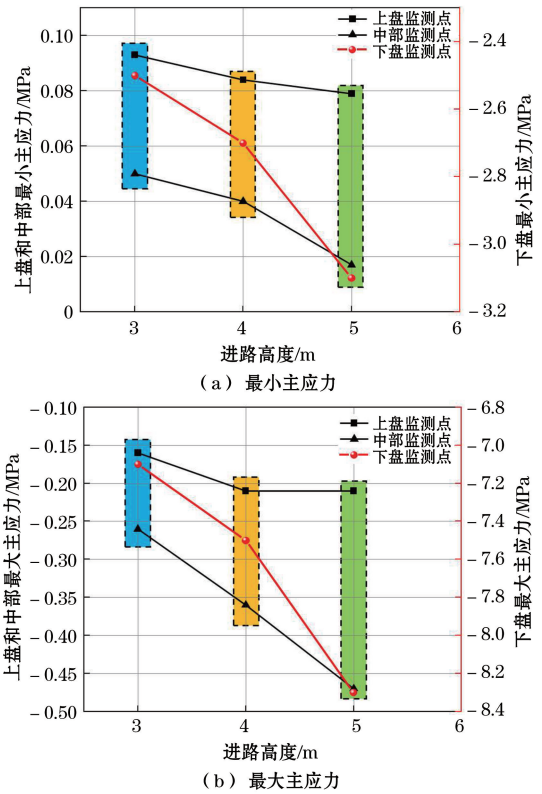



**图 3 不同进路高度下主应力对比**

**Fig.3 Comparison of principal stress under different drift heights**

图 4 为不同进路高度条件下，采场上盘、中部、下盘各监测点的位移变化情况。图中纵坐标符号代表位移状态，负号表示下沉，正号表示底鼓(下同)。

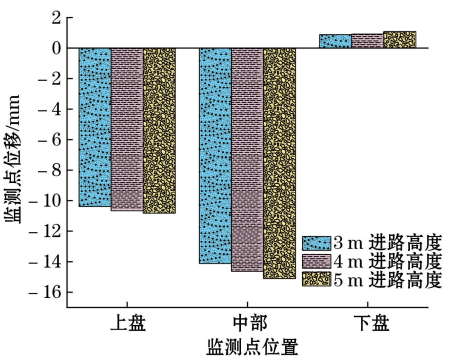



**图 4 不同进路高度下竖向位移对比**

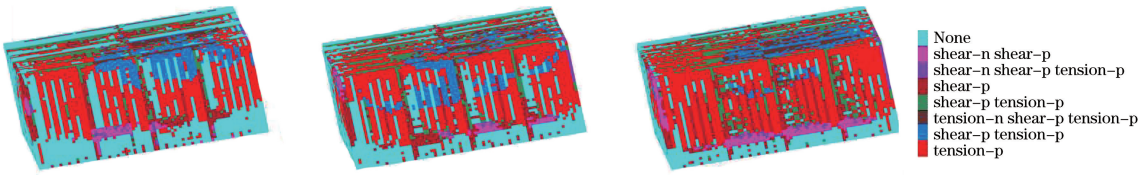
**Fig.4 Comparison of vertical displacement under different drift heights**

由图 4 可知，随着采场“开挖—充填”循环的进行，采场上盘竖向位移逐渐变大。采场发生沉降，且最大沉降量位于采场中部，下盘有一定程度的鼓胀，越靠近下盘鼓胀量越大。随着进路高度的增大，采

场顶板发生沉降的范围逐渐扩大，沉降量也逐渐增大，采场中部的沉降最大，各模型顶板沉降量为14.12～15.11 mm，上盘边界的沉降量次之，为10.38～10.82 mm，下盘边界未发生沉降，有轻微鼓胀。

不同进路高度条件下，采场塑性区分布状态如图5所示。采场回采过程中，模型出现了不同状态的塑性区分布，在靠近采场上盘和中部大部分区域出现了塑性区，越靠近上盘，塑性区面积越大，塑性破坏种类越多，主要为拉伸塑性破坏，下盘基本无塑性区，与围岩交界的局部偶见剪切塑性破坏。同时，随着进路高度的增加，模型整体的塑性区面积分布呈现逐渐增加的趋势，对整个采场稳定性造成不利的影响。

对比主应力、位移沉降和塑性区分布的情况，优选出最佳进路高度为3 m。



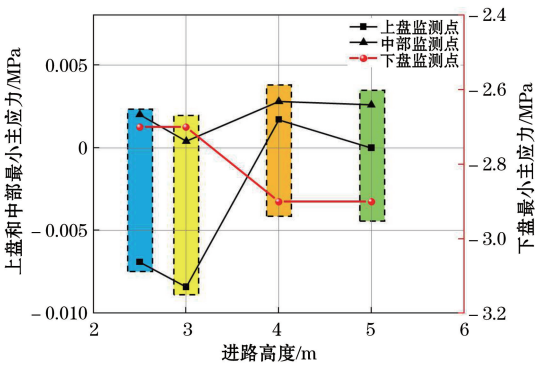

（a）$h$=3 m　（b）$h$=4 m　（c）$h$=5 m

**图5　不同进路高度下塑性区对比**

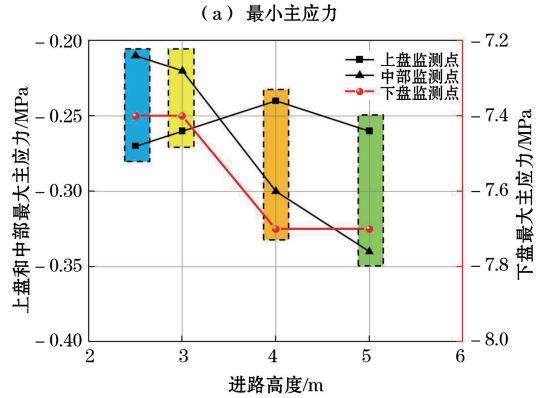
**Fig.5　Comparison of plastic zones under different drift heights**

## 2.2　进路宽度模拟结果分析

在确定进路高度为3 m的基础上，设置进路宽度分别为2.5 m、3.0 m、4.0 m、5.0 m，开展回采盘区第5个分层中间位置回采过程的模拟分析，采场主应力、位移沉降、塑性区分布情况见图6至图8。




（a）最小主应力




（b）最大主应力

**图6　不同进路宽度下主应力对比**

**Fig.6　Comparison of principal stress under different drift widths**

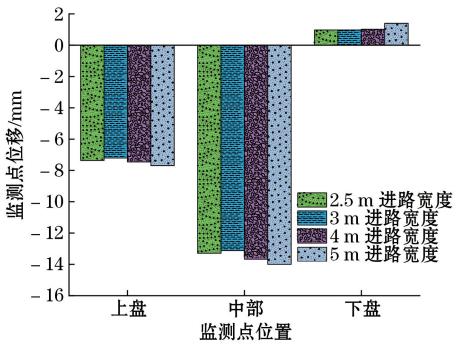
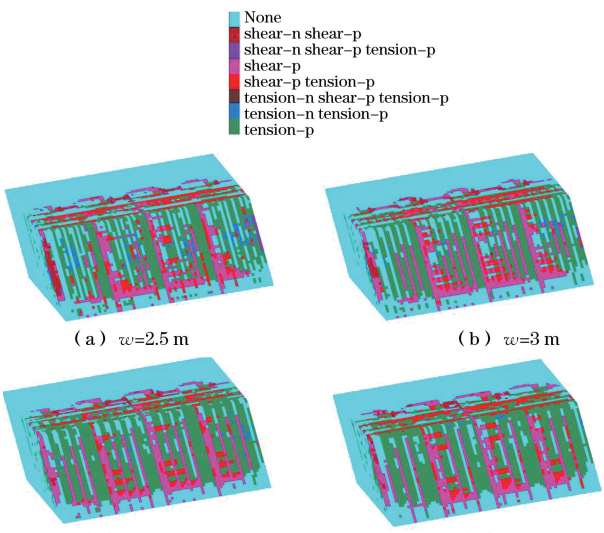



**图7　不同进路宽度下竖向位移对比**

**Fig.7　Comparison of vertical displacement under different drift widths**




（a）$w$=2.5 m　（b）$w$=3 m

（c）$w$=4 m　（d）$w$=5 m

**图8　不同进路宽度塑性区对比**

**Fig.8　Comparison of plastic zones under different drift widths**

由图 6(a)可知,模拟采场开挖至第 5 分层中间位置时,上盘监测点的最小主应力表现为拉应力和压应力,数值范围为−0.008 4～0.001 7 MPa,中部监测点的最小主应力为拉应力,数值范围为 0.000 4～0.002 8 MPa,下盘表现为压应力,进路宽度越大,压应力越大,但数值较小,为−2.7～−2.9 MPa。

由图 6(b)可知,随着进路宽度的增加,采场上盘的最大主应力先变小后逐渐增大,数值范围为0.24～0.27 MPa,而中部和下盘的最大主应力一直保持增大的趋势,中部监测点数值范围为 0.21～0.34 MPa,下盘监测点数值范围为 7.4～7.7 MPa。上盘和中部测点压应力整体小于下盘,表明靠近上盘的采场顶板张拉变形程度较靠近下盘的采场顶板更为剧烈。

从图 7 可以看出,采场上盘和中部竖向位移逐渐变大,最大沉降量位于采场中部,下盘有一定程度的鼓胀,越靠近下盘,鼓胀量越大。随着进路宽度的增大,采场中部发生沉降的范围逐渐扩大,沉降量也逐渐增大。模拟开采至第 5 分层中间位置且进路未充填的情况下,各模型中部沉降量最大为 13.12～14.00 mm,上盘边界的沉降量次之,为 7.21～7.69 mm,下盘边界未发生沉降,有轻微鼓胀。

由图 8 可知,随着进路宽度的增加,模型塑性区的体积逐渐增加。当进路宽度为 2.5～3.0 m 时,塑性区体积最小,靠近上盘部分区域主要为拉伸破坏,但塑性区未贯穿整个采场,无大面积垮落风险;当进路宽度为 4.0 m 时,塑性区范围往下盘延伸;当进路宽度为 5.0 m 时,塑性区体积最大,塑性区贯通整个采场,塑性破坏较为严重。因此,基于上述分析,本文优选进路宽度为 3.0 m。

### 2.3 进路布置方式模拟结果分析

设置进路布置方式分别为“器”字形上下平行布置、“品”字形上下交错布置、“十”字形垂直交叉布置,模拟回采完盘区前 5 个分层并充填完毕的情况,各模型主应力、位移沉降、塑性区分布情况见图 9 至图 11。

由图 9(a)可知,模拟采场回采充填完前 5 个分层,上盘监测点的最小主应力表现为拉应力和压应力,数值范围为−0.051～0.023 MPa,中部监测点的最小主应力均为拉应力,数值约为 0.050 MPa。由应力云图也可得知,顶板大部分区域拉应力较小;下盘则表现为压应力,但数值较小,为−2.37～−2.40 MPa。

由图 9(b)可知,3 种进路布置方式下,最大主应力始终表现为压应力,“器”字形和“品”字形进路布置模型的最大主应力较大,“十”字形进路布置模型的最大主应力最小。其中,上盘监测点的最大主应力约为 0.30 MPa,中部监测点的最大主应力为 0.16～0.28 MPa,下盘监测点的最大主应力为 6.95～6.99 MPa。

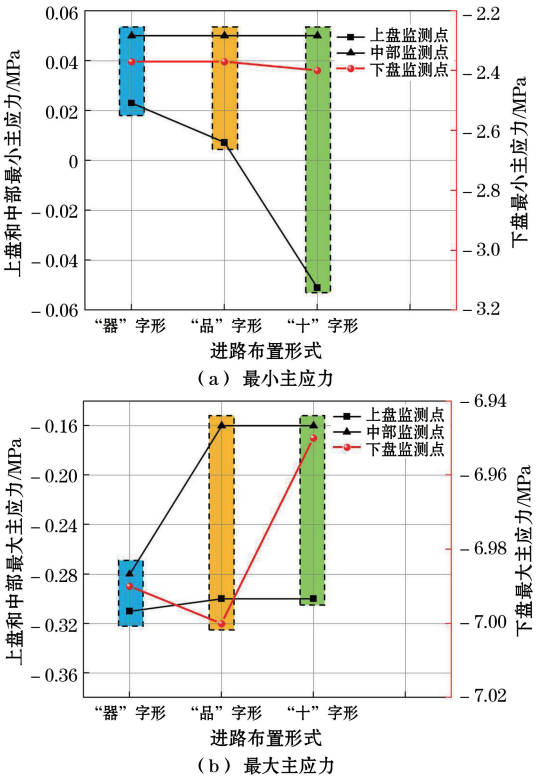



**图 9 不同进路布置形式下主应力对比**

**Fig.9 Comparison of principal stress under different drift layout patterns**

从图 10 可以看出,模拟开采至第 5 分层中间位置且进路未充填的情况下,各模型中部沉降量为 13.59～14.20 mm,上盘沉降量次之,沉降量为 7.77～7.85 mm,下盘未发生沉降,有轻微鼓胀。对比 3 种进路布置形式,“十”字形布置方案下,上盘、中部和下盘的沉降量均较小。

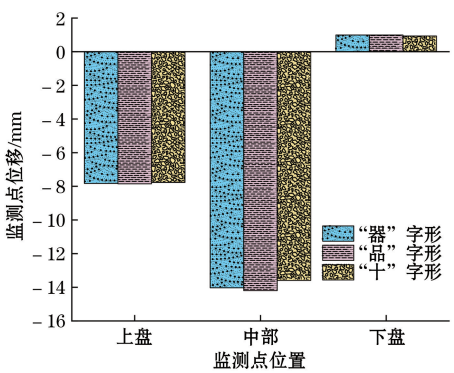
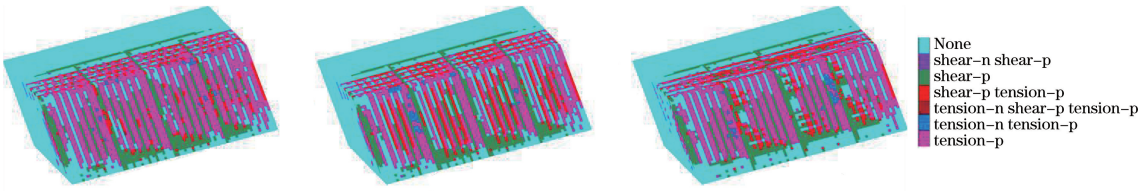



**图 10 不同进路布置形式下竖向位移对比**

**Fig.10 Comparison of vertical displacements under different drift layout patterns**

从图 11 可以看出，进路布置方式为“十”字形垂直交叉布置时，塑性区体积最小，靠近上盘部分区域主要为拉伸破坏，但塑性区未贯穿整个采场，无大面积垮落风险；当进路布置方式为“器”字形上下平行布置、“品”字形上下交错布置时，塑性区范围往下盘延伸，破坏较为严重，顶板垮塌风险较大。

对比分析不同布置形式的应力分布、位移沉降量和塑性区分布可知，“十”字形为最佳布置形式。




（a）“器”字形　（b）“品”字形　（c）“十”字形

**图 11　不同进路布置形式塑性区对比**

**Fig.11　Comparison of plastic zones under different drift layout patterns**

## 2.4　进路充填次数模拟结果分析

分别设置一次充填进路采空区全部高度、两次各充填进路采空区一半高度的条件，对回采完盘区前 7 个分层及充填过程进行模拟分析，各模型主应力、位移沉降结果见表 3 至表 5，塑性区分布情况如图 12 所示。

从表 3 和表 4 可以看出，模拟采场上盘监测点的最小主应力均表现为拉应力，数值范围为 0.005 7～0.067 MPa，中部监测点的最小主应力均为拉应力，约为 0.05 MPa。最大主应力始终表现为压应力，上盘监测点的最大主应力为－0.23～－0.30 MPa，中部监测点的最大主应力为－0.41～－0.50 MPa，下盘监测点的最大主应力为－7.12～－7.35 MPa。

从表 5 可以看出，各模型顶板中部沉降量为 14.02～14.70 mm，上盘边界的沉降量次之，为 8.79～9.00 mm，下盘边界未发生沉降，有轻微鼓胀。

**表 3　不同充填次数下模型最小主应力**

**Table 3　Minimum principal stress of model under different filling times**

| 充填次数 | 上盘监测点/MPa | 中部监测点/MPa | 下盘监测点/MPa |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.005 7 | 0.05 | －2.58 |
| 2 | 0.067 0 | 0.05 | －2.43 |

**表 4　不同充填次数下模型最大主应力**

**Table 4　Maximum principal stress of model under different filling times**

| 充填次数 | 上盘监测点/MPa | 中部监测点/MPa | 下盘监测点/MPa |
|---|---|---|---|
| 1 | －0.23 | －0.41 | －7.12 |
| 2 | －0.30 | －0.50 | －7.35 |

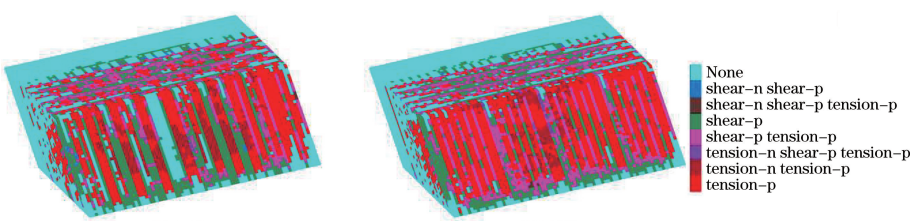
**表 5　不同充填次数下模型竖向位移**

**Table 5　Vertical displacement of model under different filling times**

| 充填次数 | 上盘监测点/mm | 中部监测点/mm | 下盘监测点/mm |
|---|---|---|---|
| 1 | －8.79 | －14.02 | 0.91 |
| 2 | －9.00 | －14.70 | 1.02 |

由图 12 可知，一次全高充填完成的模型的塑性区体积更小，一次充填进路采空区一半高度，分两次充填完成的模型的塑性区体积更大。一次全高充填完成的模型顶板靠近上盘部分区域存在当前状态的塑性区，主要为拉伸破坏，但塑性区未连通贯穿整个顶板，无大面积垮落风险；一次充填半高，分两次充填完成的模型盘区顶板塑性区范围往下盘及两侧有所延伸，同样以拉伸破坏为主，但出现了更多当前状态的剪切破坏区，顶板塑性破坏有较大的贯通趋势，顶板垮塌风险较大。

因此，在实际生产过程中推荐对采空区进行一次性全部充填，以确保采场的稳定性。




（a）一次充填　（b）两次充填

**图 12　不同充填次数塑性区对比**

**Fig.12　Comparison of plastic zones under different filling times**

## 3 现场试验效果

采场沿矿体走向划分盘区,盘区长度为 80 m,中段高度为 60 m,每隔 12 m 划分一个分段,在每个分段内再划分进路,根据模拟结果,进路断面规格为 3.0 m×3.0 m,上下层进路布置“十”字形,每分层回采结束后充填宽度为 2 m,预留 1 m 空间作为相邻进路的隔离空间和崩矿自由面。当进路沿走向布置时,回采顺序为由上盘向下盘开采,当进路垂直走向布置时,回采顺序为由一侧向另一侧开采。进路回采完成后在一侧采用钢骨架和钢筋网沿进路长度方向架设柔性充填挡墙进行充填,在相邻进路回采时,采用后退式撤出并回收挡墙材料。采矿方法如图 13 所示。

根据优化的结构参数对矿体应用下向壁式充填法,不留间柱和顶底柱,单向连续回采,简化了回采步骤,提高资源的回收率。得到的主要技术经济指标见表 6。进路生产能力达 35 t/d,损失率和贫化率均控制在 5%左右,有效提升了资源回收效率与经济效益。

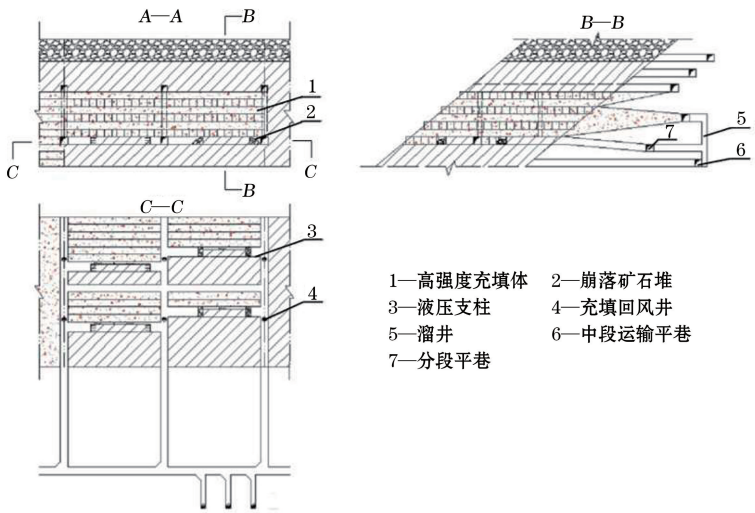



**图 13 下向壁式充填法采矿法**

**Fig.13 Downward wall filling mining method**

**表 6 主要技术经济指标**

**Table 6 Main technical and economic indicators**

| 进路生产能力/(t/d) | 采切比/(m/kt) | 损失率/% | 贫化率/% | 采矿成本/(元/t) |
|---|---|---|---|---|
| 35 | 7.5 | 5 | 5 | 150 |

## 4 结论

在确定矿体和围岩的条件下,归纳确定了影响某矿一分矿下向分层壁式充填采矿法的采场结构参数和回采顺序研究的关键因素为:进路高度、进路宽度、进路布置方式、充填次数,通过数值模拟软件建立模型并进行采充模拟,得到以下主要结论。

(1) 主应力在开挖区域顶板均匀分布,最小主应力在靠近上盘区域表现为拉应力,说明受拉区域主要为采场上盘,最大主应力始终表现为压应力。采场中部沉降量最大,上盘沉降量也较大,下盘无沉降,仅有轻微鼓胀。

(2) 基于数值模拟分析了不同模型的主应力、位移沉降、塑性区分布情况,在保证回采安全的前提下同时考虑生产实际,推荐进路高度为 3.0 m,进路宽度为 3.0 m,进路布置方式为“十”字形垂直交叉布置,充填次数为一次全高充填。

(3) 将参数优化结果应用于现场,在保证采场安全回采和生产能力的前提下,实现了技术经济指标的优化,将损失贫化率控制在 5%左右,采矿成本控制在 150 元/t。

**参考文献(References):**

[1] 彭超,郭奇峰,冀东,等.多重赋权模糊综合评价在采场结构参数优化中的应用[J].金属矿山,2014(4):22-27.
PENG Chao, GUO Qifeng, JI Dong, et al. Application of fuzzy comprehensive analysis based on multiple weights to optimization of stope structure parameters[J]. Metal Mine, 2014(4):22-27.

[2] 黄武胜.阿勒泰某金矿采空区稳定性评价与采矿方法优化研究[D].北京:北京科技大学,2016.
HUANG Wusheng. Research on mind-out areas stability assessment and mining method optimization of a gold mine in the Altai City[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2016.

[3] 李梅,刘文豪,任高峰,等.低品位磷矿房柱法采场结构参数优化及应用[J].矿业研究与开发,2024,44(10):28-35.
LI Mei, LIU Wenhao, REN Gaofeng, et al. Optimization of structural parameters and application of room-and-pillar method mining for low-grade phosphate ore[J]. Mining Research and Development,2024,44(10):28-35.

[4] 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. Optimization study of the structural parameters of the quarry of a gently inclined very thin ore body[J]. Metal Mine,2022 (11):52-57.

[5] 罗来和,夏国进,王沉,等.基于FLAC3D的采矿方法优选及采场结构参数优化[J].矿冶工程,2021,41(6):129-133.
LUO Laihe, XlA Guojin, WANG Chen, et al. Optimization of mining method and stope structure parameters based on FLAC3D[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2021,41(6):129-133.

[6] 刘恩彦.和睦山铁矿后观音山矿段充填采矿方法研究[D].长沙:中南大学,2012.
LIU Enyan. Research on the filling mining method of the back Guanyinshan section of the Hemushan Iron Mine[D]. Changsha:Central South University,2012.

[7] 陈永祺,王小林,程国华,等.镜铁山矿井下切采一体化技术[J].金属矿山,2018(1):27-31.
CHEN Yongqi, WANG Xiaolin, CHENG Guohua, et al. Underground cutting and mining integrated technology in Jingtieshan Mine[J].Metal Mine,2018(1):27-31.

[8] 孙国文,汪龙.松湖铁矿无底柱分段崩落法采场结构参数优化[J].矿业研究与开发,2019,39(7):19-23.
SUN Guowen, WANG Long. Parameter optimization on the stope structure of non-pillar sublevel caving method in Songhu Iron Mine[J]. Mining Research and Development,2019,39(7):19-23.

[9] 尹升华,吴爱祥,李希雯.矿柱稳定性影响因素敏感性正交极差分析[J].煤炭学报,2012,37(增刊1):48-52.
YIN Shenghua, WU Aixiang, LI Xiwen. Orthogonal polar difference analysis for sensitivity of the factors influencing the ore pillar stability[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(Suppl.1):48-52.

[10] 王在泉,李华峰.矿柱抗剪安全系数的数值计算方法及分析[J].采矿与安全工程学报,2010,27(2):277-280.
WANG Zaiquan, LI Huafeng. Numerical calculation method for shear safety coefficient of mine pillar[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2010,27(2):277-280.

[11] 李加州,马俊杰.基于AHP-TOPSIS模型的某矿采场结构参数优选[J].金属矿山,2023(8):189-195.
LI Jiazhou, MA Junjie. Optimization of stope structure parameters based on AHP-TOPSIS model of a mine[J]. Metal Mine,2023(8):189-195.

[12] 徐祥熙,彭跃金,吴会明,等.基于Mathews的某铁矿残留间柱回采结构参数研究[J].中国矿业,2024,33(增刊2):254-258.
XU Xiangxi, PENG Yuejin, WU Huiming, et al. Study on structural parameters of residual pillar mining based on Mathews for a certain iron ore[J]. China Mining Magazine,2024,33(Suppl.2):254-258.

[13] 展卫露,张忠传,李正明,等.锡铁山铅锌矿采矿方法优选及采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(8):48-55.
ZHAN Weilu, ZHANG Zhongchuan, LI Zhengming, et al. Study on mining method preference and optimization of quarry structure parameters in Xitieshan lead-zinc mine[J]. Mining Research and Development,2024,44(8):48-55.

[14] 朱晨迪,朱胜利,江科,等.某钼矿矿柱回采方案及采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(5):1-8.
ZHU Chendi, ZHU Shengli, JIANG Ke, et al. Optimization study on the mining scheme of a molybdenum ore pillar and the structural parameters of the mining field[J]. Mining Research and Development,2024,44(5):1-8.

[15] 刘冬,邵安林,金长宇,等.地下破碎矿体数值计算模型的构建及采场结构参数优化[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(2):437-444.
LIU Dong, SHAO Anlin, JIN Changyu, et al. Numerical model building for broken ore body and optimization of stope structural parameters [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2019,50(2):437-444.

[16] 李夕兵,刘志祥,彭康,等.金属矿滨海基岩开采岩石力学理论与实践[J].岩石力学与工程学报,2010,29(10):1945-1953.
LI Xibing, LIU Zhixiang, PENG Kang, et al. Theory and practice of rock mechanics related to exploitation of undersea metal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(10):1945-1953.