水平矿柱回采进路荷载力学分析及结构参数优选*

刘波，张耀平，雷大星，邹雄刚，张超美

（赣南科技学院 资源与土木工程学院， 江西 赣州市 341000）

摘要：为安全高效地回采地下矿山水平矿柱并确保采场稳定，以某铜矿为工程背景，进行采场回采进路参数优化研究。基于简支梁结构力学模型，分析进路顶板拉应力随进路宽度变化的规律，初步确定进路宽度与预留顶板厚度；进一步采用FLAC3D数值模拟，对比不同预留顶板厚度下进路宽度对采场整体稳定性的影响。结果表明：基于简支梁结构力学模型，优选进路结构参数为预留顶板厚度2 m、进路宽度4 m；以方案3（进路宽度3.5 m，进路高度4 m）为例，理论计算显示其顶板最大拉应力为0.37 MPa，安全系数为1.86，数值模拟中最大拉应力为0.49 MPa，采场顶板位移较小且顶板基本未发生塑性破坏，结构保持稳定。采用简支梁理论与数值模拟相结合的方法，能够准确预测水平矿柱回采中的荷载变化与应力分布，为类似矿山工程的回采进路结构参数优选提供依据。

关键词：水平矿柱回采；进路荷载；结构参数优选；简支梁理论；数值模拟

中图分类号：TD853 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)01-0090-09

Mechanical Analysis of Drift Load and Optimization of Structural Parameters for Mining of Horizontal Pillars

LIU Bo, ZHANG Yaoping, LEI Daxing, ZOU Xionggang, ZHANG Chaomei

(School of Resources and Civil Engineering, Gannan University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: Taking a copper mine as the engineering background, optimization research on the parameters of stope mining drifts was carried out to realize the safe and efficient mining of horizontal pillars in underground mines and ensure the stability of stopes. Based on the structural mechanical model of simply supported beam, the law of tensile stress of drift roof varying with drift width was analyzed, and the drift width and reserved roof thickness were initially determined. Further, FLAC3D numerical simulation was used to compare the influence of drift width on the overall stability of stope under different reserved roof thicknesses. The results show that based on the structural mechanical model of simply supported beam, the optimized structural parameters of the drift are a reserved roof thickness of 2 m and a drift width of 4 m. Taking Scheme 3 (drift width of 3.5 m, drift height of 4 m) as an example, theoretical calculation shows that the maximum tensile stress of its roof is 0.37 MPa, and the safety coefficient reaches 1.86.In the numerical simulation, the maximum tensile stress is 0.49 MPa, the stope roof displacement is small, the roof basically does not undergo plastic failure, and the structure remains stable. The method combining the simply supported beam theory and numerical simulation can accurately predict the load changes and stress distribution in the mining of horizontal pillars, and provide a basis for the optimization of structural parameters of mining drift for similar mine projects.

Key words: Mining of horizontal pillar, Drift load, Optimization of structural parameter, Simply supported beam theory, Numerical simulation

0 引言

矿业领域经过数十年快速发展，我国大量矿山浅部矿体资源逐渐枯竭，矿产资源开发逐步转向深部环境[1]。部分矿山受早期技术和开采工艺限制，遗留的水平矿柱较多。据统计，我国尚在生产的矿山中，顶底柱矿体资源储量占矿山总储量的20%～50%[2]。水平矿柱是保障地下矿山安全开采的关键因素，但蕴含着大量的矿产资源[3-4]。因此，确定安全合理的水平矿柱回采进路结构参数，是高效回收水平矿柱亟待解决的问题，对于提升矿山资源高效利用具有重要战略意义。

* **收稿日期**：2025-01-08

基金项目：江西省教育厅科技项目(GJJ2403710)

作者简介：刘波(1986—)，男，江西赣州人，讲师，硕士，主要从事岩石力学、采矿工艺等方面的研究。E-mail：liubo2010225163.com

通信作者：张耀平(1974—)，男，江西赣州人，博士，教授，主要从事岩石力学、采矿工艺等方面的研究。E-mail：zyp2005csu@126.com

采用阶段空场嗣后充填采矿法开采的矿山,其水平矿柱资源的赋存条件较为复杂。在充填体下回采矿柱时,在地压控制方面面临一定挑战[5-8],易出现顶板下沉、局部冒落和矿壁片帮等问题,给中段水平矿柱安全回采带来巨大隐患[9]。针对安全、经济地回收水平矿柱资源所面临的难题[10-13],已有许多学者进行了理论研究和工程实践。吴浩等[14]采用改进的复变函数理论结合数值模拟,对进路采场围岩应力进行研究,得出进路顶底板受力随侧压系数增大的变化规律。李嘉峰等[15]通过分析破碎岩层下的普氏拱结构形成原理和回采进路宽度,推导出破碎覆岩下回采巷道临界宽度。王俊等[16]利用厚板理论分析下向进路充填假顶的受力情况,并与数值模拟结果对比,得出最优配比的充填进路假顶。李小松等[17]通过建立采场大跨度假顶模型,确定了填充物的假顶厚度。

部分学者通过建立矿体结构力学模型和数值模拟分析来确定回采水平矿柱的进路结构参数,冯帆等[18]针对进路巷道上覆充填顶板建立了“嵌固梁”力学模型,解出进路顶板均布荷载理论值。罗来和等[19]利用 FLAC3D 数值模拟软件对 3 种采矿法不同的采场结构参数进行分析,最终确定了最优采矿方法为上向进路充填采矿法,其进路高度为 3 m、宽度为 6 m。李兴权等[20]针对开挖进路一侧为充填体、一侧为矿体的情况,建立力学模型,并引入半逆解法进行顶柱力学分析,揭示了水平应力和剪切应力是顶柱开挖的主要影响应力。刘光清等[21]通过建立组合赋权 TOPSIS 法的结构参数评价模型,计算出不同进路参数方案的优先级,得出最优的采场进路断面规格为 4.5 m×4 m。姜立春等[22]利用非对称顶板-矿柱结构体协同承载机理,成功实现了胶结充填体下的顶柱安全回采。

上述学者对回采进路结构或充填顶板稳定性进行了大量研究,优选得到针对具体矿山的最优回采参数,并成功应用于实践,为矿山水平矿柱的回收提供可靠的理论依据和实践参考。不同矿山水平矿柱的赋存条件存在差异,针对充填体下回采水平矿柱的研究成果相对较少,尤其涉及深部矿山水平矿柱回采进路的参数优化,相关成果更是鲜见报道,亟需开展该领域的理论探索和实践案例研究。因此,基于简支梁进路结构力学模型对水平矿柱回采进路结构参数进行优化,对安全高效回收水平矿柱的具有重要意义。

本研究针对某矿山进路式充填采矿法回收水平矿柱的进路结构,结合经典弹性力学理论对进路预留顶板进行受力分析,得到进路顶板的应力表达式,结合数值模拟对进路结构应力、位移和塑性区变化进行分析,得出最优回采进路结构参数,从而为工程实践提供指导。

1 进路采场顶板受力分析

某铜矿在开采-388～-613 m 中段矿体时,采用分段空场嗣后充填采矿法,中段之间预留 6 m 高的水平矿柱,水平矿柱的矿石品位较高。在进行-523 m 中段水平矿柱资源回收时,结合水平矿柱的赋存条件,综合考虑安全性和经济性,提出采用进路式充填采矿法回收水平矿柱资源,初步设计进路宽度为 3～5 m,进路高度为 4～4.5 m,即预留 1.5～2 m 厚的矿体护顶层。

现有研究表明,采场顶板破坏形式分为 2 种:一种是顶板受到的轴向压力达到极限时,内部的微裂缝扩展并交汇,使岩石发生结构性破坏[23];另一种是当顶板岩层中拉应力超过岩体的抗拉强度,岩体产生失稳破坏,顶板岩层出现拉裂痕,并不断向四周发展,最终导致顶板岩层垮塌[24]。

普氏理论认为,当巷道开挖后,顶部岩石发生崩落,顶板上会形成传递压力的自然平衡拱门结构,该结构所对应的压力等于拱内崩落岩石的自重[25]。进路采场压力拱如图 1 所示,其中,压力拱高(H)用式(1)表示。

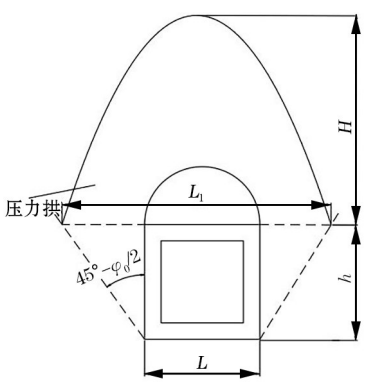


图 1 进路采场压力拱

Fig.1 Drift stope pressure arch

$$H=\frac{\frac{L}{2}+h\times\tan\left(45\frac{\varphi_0}{2}\right)}{f} \tag{1}$$

式中:L 为进路宽度;h 为进路高度;φ_0 为岩石内摩擦角;f 为岩石坚固性系数。

进路顶板的荷载(q)为:

$$q=\gamma h_0+\gamma_1 h_1 \tag{2}$$

式中:γ、γ_1 分别为矿体和充填冒落层的容重,根据

矿山实际情况，$\gamma=27\ \mathrm{kN/m^3}$，$\gamma_1=19\ \mathrm{kN/m^3}$；$h_0$ 和 h_1 分别为预留原岩层和充填冒落层的厚度。

2 基于简支梁进路结构力学分析

设计进路宽度为 3～5 m，进路预留原岩顶板厚为 1.5～2.0 m，顶、底柱进路结构模型根据进路顶板的力学特点进行简化，视为均布荷载和自重应力作用的简支梁结构力学模型。通过弹性力学简支梁受均布荷载力学方程半逆解法求解[20,26]，对进路顶板的受力情况进行分析，比较其受力大小与顶板的抗拉强度，以确定进路采场结构参数的安全合理范围。水平矿柱回采进路结构如图 2 所示，图 2 中 L 为进路的水平跨度。进路结构力学模型如图 3 所示。

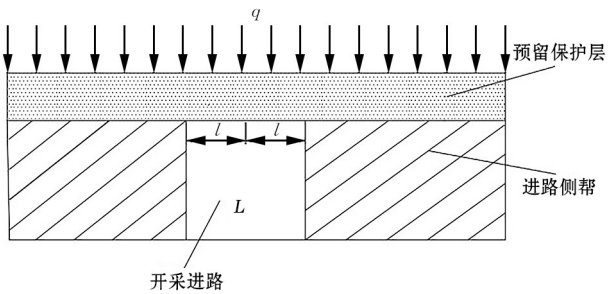


图 2 水平矿柱回采进路结构

Fig.2 Mining drift structure of horizontal pillar

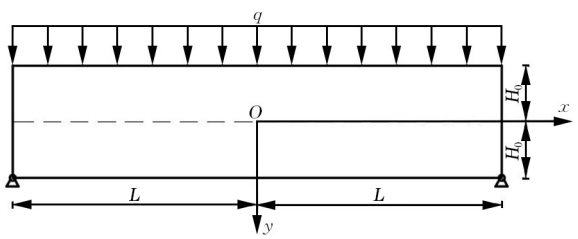


图 3 进路结构力学模型

Fig.3 Mechanical model of drift structure

根据弹性力学理论[26]，进路顶板应力分量的一般表达式如下：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}=\sigma_x\\[2ex]\dfrac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}=\sigma_y\\[2ex]-\dfrac{\partial^2\varphi}{\partial x\partial y}=\tau_{xy}\end{cases}\tag{3}$$

式中：σ_x 为进路顶板 x 方向上的应力；σ_y 为进路顶板 y 方向上的应力；τ_{xy} 为进路顶板所受到的剪切应力。

将采场顶板假定为矩形简支梁，其中 σ_x 主要由弯矩引起，σ_y 由上部荷载 q 的挤压应力产生，q 的值可通过普氏理论确定，假定顶板承受的均布荷载，不随 x 变化而改变，因此可以假设 σ_y 不随 x 的变化而改变，则可以假设 σ_y 只是 y 的函数，对 x 二次积分，得出：

$$\varphi=\frac{x^2}{2}f(y)+xf_1(y)+f_2(y)\tag{4}$$

式中，φ 为应力函数。

应力函数 φ 的相容方程[26]为：

$$\frac{\partial^4\varphi}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4\varphi}{\partial x^2\partial y}+\frac{\partial^4\varphi}{\partial y^4}=0\tag{5}$$

将式(4)代入式(5)，得出：

$$\frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}^4f(y)}{\mathrm{d}y^4}x^2+\frac{\mathrm{d}^4f_1(y)}{\mathrm{d}y^4}x+\frac{\mathrm{d}^4f_2(y)}{\mathrm{d}y^4}+2\frac{\mathrm{d}^2f(y)}{\mathrm{d}y^2}=0\tag{6}$$

解上述方程得：

$$\varphi=\frac{x}{2}(Ay^3+By^2+Cy+D)+x(Ey^3+Fy^2+Gy)-\frac{A}{10}y^5-\frac{B}{6}y^4+Hy^3+Ky^2\tag{7}$$

式中，A、B、C、D、E、F、G、H 和 K 均为积分常数。

引入边界条件：

$$\begin{cases}(\sigma_y)_{y=\frac{h_0}{2}}=0\\(\sigma_y)_{y=\frac{h_0}{2}}=-q\\(\tau_{xy})_{y=\pm\frac{h_0}{2}}=0\end{cases}\tag{8}$$

由进路顶板两侧的对称性可知，σ_x 和 σ_y 是 x 的偶函数，τ_{xy} 是 x 的奇函数，求解得出各应力分量如下：

$$\begin{cases}\sigma_x=-\dfrac{6q}{h_0^3}x^2y+\dfrac{4q}{h_0^3}y^3+6Hy+2K\\[2ex]\sigma_y=-2\dfrac{q}{h_0^3}y^3+\dfrac{3q}{2h_0}y-\dfrac{q}{2}\\[2ex]\tau_{xy}=\dfrac{6q}{h_0^3}xy^2-\dfrac{3q}{2h_0}x\end{cases}\tag{9}$$

此时再考虑梁的左右两边的小边界条件，因为问题的对称性，此处以右侧为例，根据圣维南原理，小边界上的面力分布对结构整体应力分布的影响是局部的，假设小边界上的面力为 0，但此时无法满足“当 $x=l$ 时，不论 y 取何值，均有 $\sigma_x=0$”的条件，考虑将小边界上的面力变换为分布不同但静力等效的面力，即 σ_x 在小边界上的主矢量和主矩均为 0，可得出：

$$\int_{-\frac{h_0}{2}}^{\frac{h_0}{2}}(\sigma_x)_{x=l}\mathrm{d}y=0\tag{10}$$

$$\int_{-\frac{h_0}{2}}^{\frac{h_0}{2}}(\sigma_x)_{x=l}y\mathrm{d}y=0\tag{11}$$

将式(9)中 σ_x 的函数代入到式(10)和式(11)

中，得出：

$$\begin{cases} K=0 \\ H=\dfrac{ql^2}{h_0^3}-\dfrac{q}{10h_0} \end{cases} \tag{12}$$

将 H 和 K 的值代入式(9) σ_x 的函数中，整理得出：

$$\begin{cases} \sigma_x=\dfrac{6q}{h_0^3}(l^2-x^2)y+\dfrac{qy}{h_0}\left(\dfrac{4y^2}{h_0^2}-\dfrac{3}{5}\right) \\ \sigma_y=-2\dfrac{q}{h_0^3}y^3+\dfrac{3q}{2h_0}y-\dfrac{q}{2} \\ \tau_{xy}=\dfrac{6q}{h_0^3}xy^2-\dfrac{3q}{2h_0}x \end{cases} \tag{13}$$

在进路顶板中心点处($x=0$、$y=h_0/2$)，取得最大拉应力值，通过计算，当 $h_0=1.5$ m 和 $h_0=2$ m 时，进路顶板的受力及安全系数分别见表 1、表 2。工程中安全系数 $n=[\sigma_t]/\sigma_{t\max}$，进路顶板岩体的抗拉强度 σ_t 取 −523 m 中段上盘主要岩体的强度，大理岩的试验力学参数中 $\sigma_t=0.71$ MPa，$\sigma_{t\max}$ 为进路顶板产生的最大拉应力。

表 1　不同进路宽度下顶板受力及安全系数($h_0=1.5$ m)

Table 1　Roof force and safety factor under different drift widths ($h_0=1.5$ m)

进路宽度/m	进路荷载/kPa	最大拉应力/MPa	安全系数
3.0	145.0	0.46	1.50
3.5	154.5	0.66	1.05
4.0	164.0	0.91	0.77
4.5	173.5	1.21	0.58
5.0	183.0	1.56	0.44

表 2　不同进路宽度下顶板受力和安全系数($h_0=2$ m)

Table 2　Roof force and safety factor under different drift widths($h_0=2$ m)

进路宽度/m	进路荷载/kPa	最大拉应力/MPa	安全系数
3.0	140.64	0.26	2.63
3.5	150.14	0.37	1.86
4.0	159.64	0.51	1.37
4.5	169.14	0.68	1.03
5.0	178.64	0.87	0.79

进路顶板所受的最大拉应力与进路宽度的关系曲线如图 4 所示。由图 4、表 1 和表 2 可知，当 h_0 分别为 1.5 m 和 2 m 时，进路顶板产生的最大拉应力随着进路宽度的增加而增加，拉应力增长速率也随之增加。当 h_0 为 1.5 m，进路宽度取 3 m、3.5 m、4 m、4.5 m、5 m 时，采场顶板的安全系数分别为1.50、1.05、0.77、0.58、0.44。进路采场顶板的安全系数随着宽度的增加而逐步降低，由稳态向失稳态转化。本设计采用安全系数 1.2，即当计算得到采场顶板的安全系数大于等于 1.2 时，认为此设计符合安全要求。当进路宽度保持在合适范围内，进路顶板会随 h_0 的减小而从安全转为不安全状态。如进路宽度 $L=4$ m 时，$h_0=1.5$ m 对应的最大拉应力为 0.91 MPa，安全系数为 0.77，不满足设计规范要求；$h_0=2$ m 对应的最大拉应力为 0.51 MPa，安全系数为 1.37，满足安全系数设计规范要求，可以采用。

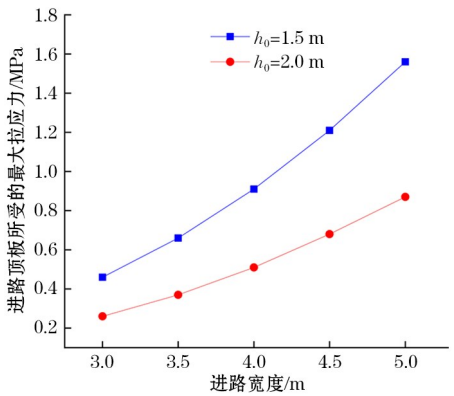


图 4　进路顶板所受的最大拉应力与进路宽度的关系曲线

Fig.4　Relationship curves between maximum tensile stress on the drift roof and drift width

3　开采稳定性数值模拟分析

本文采用数值模拟软件模拟分析水平矿柱在不同进路参数下的回采变化规律，通过对其应力、位移和塑性区变形进行观测，分析最大拉应力是否超过岩体抗拉强度、位移是否发生突变以及塑性区是否出现贯通现象，判断方案能否符合设计要求。基于进路采场结构力学分析，初步选择以下 4 种方案进行数值模拟计算，见表 3。

表 3　水平矿柱回采方案

Table 3　Mining schemes for horizontal pillars

方案	进路宽度/m	进路高度/m	顶板矿体厚度/m
1	4.0	4.0	2.0
2	4.0	4.5	1.5
3	3.5	4.0	2.0
4	3.5	4.5	1.5

3.1　数值模拟模型与计算参数

根据对进路结构的力学分析，选用预留顶板矿体厚度为 1.5 m 和 2 m，进路宽度为 3.5 m 和 4 m 交叉组合 4 种方案，设置两侧为围岩，顶部和底部为充填体，采用 Rhino6 建模软件建立 4 种方案的三维

模型,将模型耦合 FLAC3D,计算网络模型如图 5 所示。模型材料力学参数见表 4。

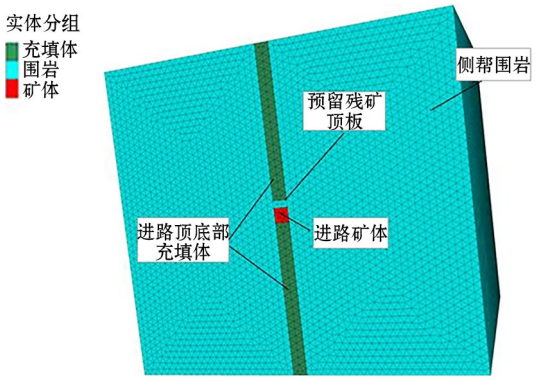


图 5 计算网格模型

Fig.5 Computational mesh model

表 4 模型材料力学参数

Table 4 Mechanical parameters of model materials

材料	密度/(g·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
大理岩	2 600	15.69	0.27	2.23	42.03	4.97	0.71
含铜黄铁矿	3 600	41.43	0.24	10.76	45.07	28.46	0.77
胶结充填体	1 900	0.81	0.21	0.40	32.00	1.80	0.30

3.2 模拟结果及分析

3.2.1 应力分析

各方案的最大主应力云图如图 6 所示。通过分析进路采场的最大主应力,方案 1 在预留的顶板上出现的最大压应力为 1.36 MPa,在顶板上回采时产生最大拉应力为 0.52 MPa,最大拉应力值未超过采场顶板岩体的抗拉强度(0.71 MPa)。方案 2 中最大压应力出现在进路顶板上部,为 1.74 MPa,此时进路顶角及两侧均出现最大拉应力,为 0.95 MPa,最大拉应力值超过顶板岩体的抗拉强度,采场顶板将会破坏,该方案的安全性较差,不符合设计要求。方案 3 在进路顶板上方出现最大压应力,为 1.16 MPa,两侧也存在较小的挤压应力,同时采场顶板中间位置产生拉应力,拉应力值为 0.49 MPa,此时拉应力值小于采场顶板岩体的抗拉强度,顶板不会因受到拉应力而破坏,方案 3 能满足采场回采稳定性要求。方案 4 同样在顶板上方产生最大压应力,为 1.37 MPa,最大拉应力为 0.67 MPa,此时进路顶板拉应力虽然未超过顶板的抗拉强度,但安全系数为 1.06,小于设计安全系数 1.2,不满足设计要求。

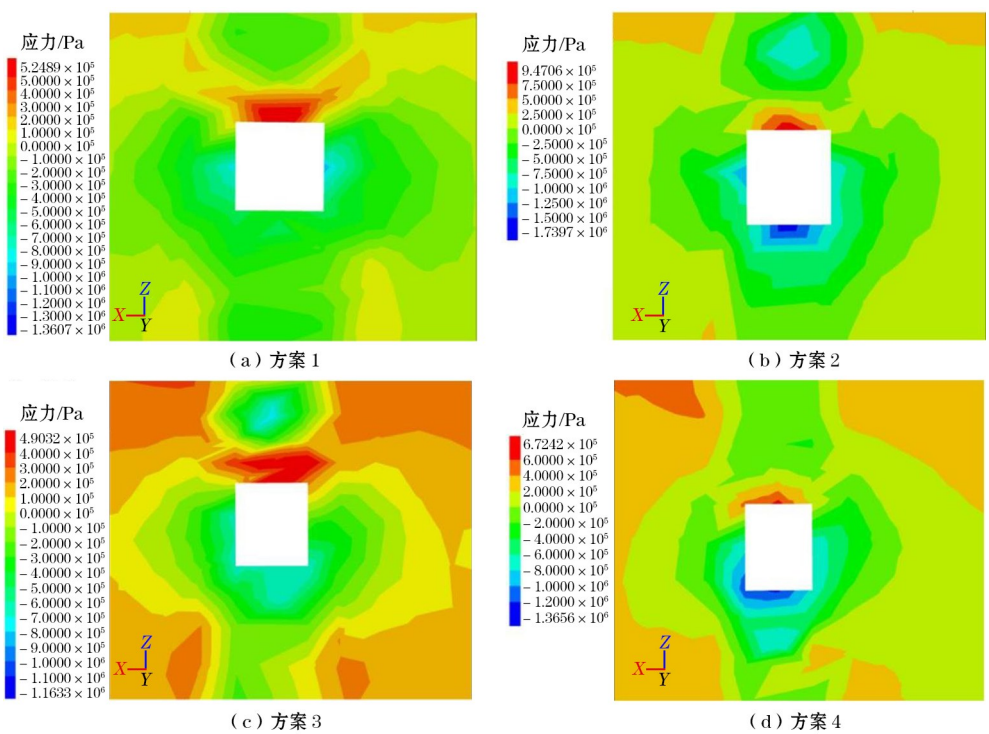


图 6 各方案的最大主应力云图

Fig.6 Maximum principal stress cloud diagrams of each scheme

3.2.2 位移分析

原岩应力状态在进路开挖过程中被破坏,岩体内部应力状态重新分布,进路周边围岩在应力重分布过程中发生位移变形,导致回采进路周边围岩失稳。本文通过对进路顶板沉降量和底板隆起量进行分析,研究不同参数下回采进路的稳定性。

各方案的进路 Z 方向位移云图如图 7 所示。由图 7 可知,顶板沉降量为:方案 3(0.6 mm)<方案 1(1.4 mm)<方案 4(1.5 mm)<方案 2(2.1 mm),方案 3 的采场顶板沉降量最小。底板在进路中心位置存在一定的隆起,由模拟结果可知,方案 3(7.6 mm)<方案 2(8.5 mm)<方案 4(10.9 mm)<方案 1(12.9 mm),方案 3 的底板隆起量最小。

综上可知,采场的底板隆起量普遍大于顶板沉降量,采场上部岩体强度高于下部充填体,其中方案 3 的位移量小于其他方案的位移量,同时方案 3 采场顶板受到的拉应力也较小,说明采用方案 3 回收水平矿柱时,采场的稳定性最好。

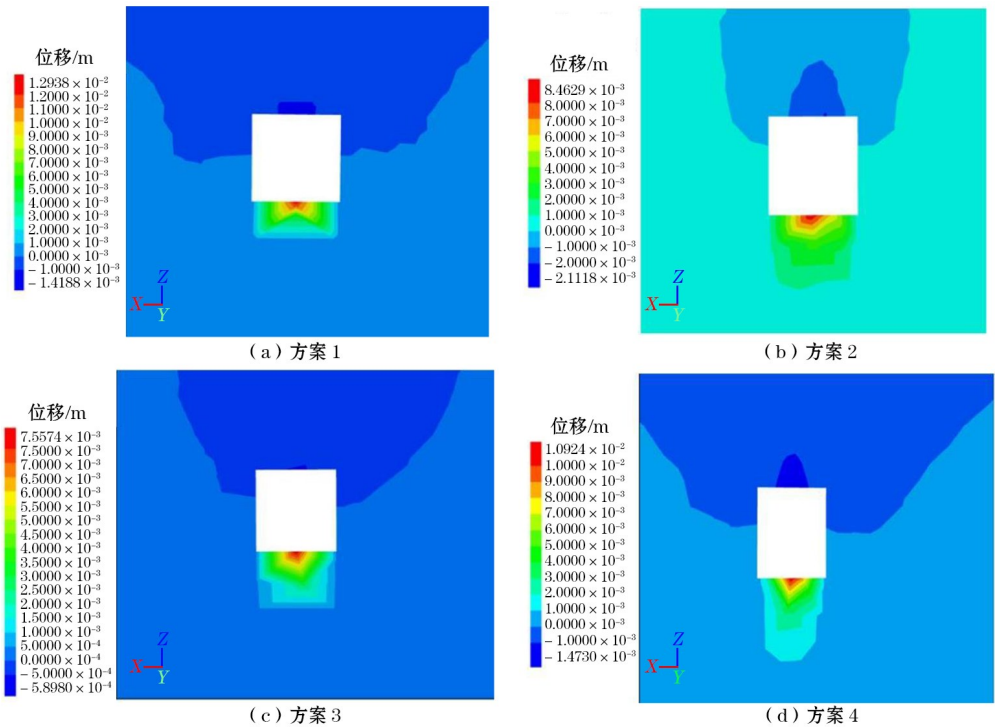


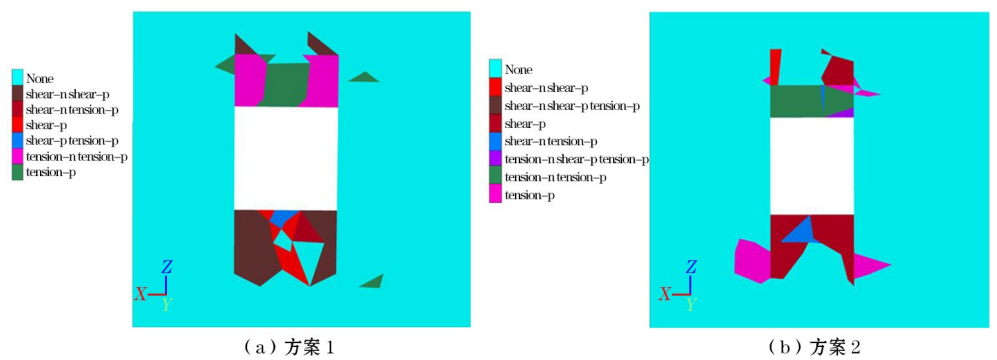
图 7　各方案的进路 Z 方向位移云图

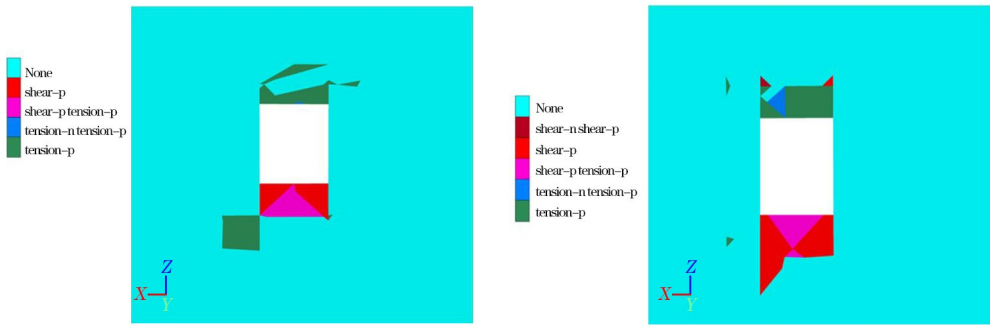
Fig.7　Z-direction displacement cloud diagrams of drift for each scheme

3.2.3　塑性区分析

对各方案的塑性区变形进行分析,模拟结果如图 8 所示。方案 1 采场顶板边角处出现拉伸破坏,在顶板与上部充填体连接位置出现少量剪切破坏,但采场顶板塑性区未发生贯通,同时采场下部矿体与充填体连接位置出现剪切破坏;方案 2 进路顶板出现大范围拉伸破坏,且在采场顶板左侧与充填体连接位置出现部分剪切破坏,塑性区基本贯穿采场顶板,采场下部充填体与围岩连接位置出现少量剪切破坏;方案 3 进路采场顶板中心处产生少量拉伸破坏,其余位置没有正在破坏的塑性区;方案 4 进路采场顶板存在拉伸破坏,在顶板与充填体连接处产生少量剪切破坏,采场顶板塑性区未发生贯通,在采场下部矿体与充填体连接位置出现部分剪切破坏。

综上可得,从塑性区分析,方案 2 塑性区基本贯穿采场顶板,安全性最差,方案 1 和方案 4 次之,而方案 3 在采场回采过程中出现的塑性破坏最少,作为进路回采方案,其安全性最高。





(c) 方案 3　　(d) 方案 4

图 8　各方案的进路采场塑性区分布云图

Fig.8　Plastic zone distribution cloud diagrams of drift stope for each scheme

3.3　数值模拟结果与理论计算结果对比

将各方案理论计算和数值模拟所得到的最大应力值进行对比分析,具体结果见表 5。方案 1 数值模拟中得到的最大拉应力值出现在采场顶板中部位置,拉应力值为 0.52 MPa,与理论计算得出的采场顶板受到的拉应力值 0.51 MPa 基本一致;方案 2 数值模拟中得到的采场顶板最大拉应力值为 0.95 MPa,与理论计算的拉应力值 0.91 MPa 均超出了采场顶板的抗拉强度,此方案进行矿柱回采时稳定性差,不满足设计要求;方案 3 数值模拟中最大拉应力值为 0.49 MPa,理论分析中拉应力值为 0.37 MPa,数值模拟结果虽然大于理论计算值,但两种方法得到的拉应力值均小于采场顶板的抗拉强度,且方案 3 模拟中的位移量和塑性区均很小,可以得出方案 3 能够保障采场的安全回采;方案 4 数值模拟中得到的最大拉应力值为 0.67 MPa,与理论计算得出的拉应力值 0.66 MPa 基本一致。

综上所述,理论计算和数值模拟两种方法得到的相同进路结构参数对采场的影响基本一致,研究表明数值模拟能够和理论计算相互印证,数值模拟能对水平矿柱回采的进路结构参数进行优化。综合分析两种方法,方案 3 中的进路结构参数为最优。

表 5　理论计算与数值模拟的最大应力值

Table 5　Maximum stress values of theoretical calculation and numerical simulation

方案	理论计算/MPa	数值模拟/MPa
1	0.51	0.52
2	0.91	0.95
3	0.37	0.49
4	0.66	0.67

4　结论

(1) 基于简支梁进路结构力学模型,对比分析了进路预留顶板厚度为 1.5 m 和 2 m,进路宽度为 3～5 m 的进路结构参数下采场稳定性情况,综合考虑上述两种因素和工程经济性,优选进路结构参数为:预留顶板厚度为 2 m,进路宽度为 4 m。

(2) 基于数值分析结果,并结合采场结构力学理论对比分析可得,两种方法得到结果基本吻合,在方案 3(进路宽度为 3.5 m,进路高度为 4 m)的理论计算中,采场顶板受到的最大拉应力为 0.37 MPa,安全系数为 1.86。采用数值模拟分析得出方案 3 的最大拉应力为 0.49 MPa,且采场位移量较小,采场顶板基本未发生塑性破坏。因此,上述方法可为矿山确定经济、安全的采场结构参数提供参考。

(3) 针对地下开采矿山的复杂环境,采用简支梁理论分析和数值模拟相结合的方法,可准确得出水平矿柱回采过程中的荷载变化规律,判定采场结构参数变化对采场稳定性的影响,为类似矿山工程实际开采时采场结构参数优选提供可靠依据。

参考文献(References):

[1] 王雨萌,关凯,朱万成,等.基于现场监测与数值模拟结合的采动诱发围岩失稳与地表沉降研究[J].东北大学学报(自然科学版),2024,45(2):234-243.
WANG Yumeng, GUAN Kai, ZHU Wancheng, et al. Mining-induced surrounding rock instability and surface subsidence based on combination of in-situ monitoring and numerical modelling[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2024,45(2):234-243.

[2] 史秀志,柯武阳,苟永刚,等.大跨度采场上部硐室条形矿柱尺寸优化研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(6):1084-1093.
SHI Xiuzhi, KE Wuyang, GOU Yonggang, et al. Optimization of strip pillar size in upper chamber of long span stope[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020,37(6):1084-1093.

[3] 关守安,李皓,金长宇,等.粗榆金矿地下开采覆岩运移规律数值模拟[J].东北大学学报(自然科学版),2020,41(3):402-407.

GUAN Shouan, LI Hao, JIN Changyu, et al. Numerical simulation on overlying strata movement law in underground mining of Cuyu Gold Mine[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2020,41(3):402-407.

[4] 朱斌,张柏春,李晓辉,等.东塘子铅锌矿矿柱回采方案研究及应用[J].矿业研究与开发,2022,42(6):5-8.
ZHU Bin, ZHANG Baichun, LI Xiaohui, et al. Study and application of pillar recovery scheme in Dongtangzi lead-zinc mine[J]. Mining Research and Development, 2022,42(6):5-8.

[5] LI Y, REN Y Q, LEI X H, et al. Numerical modeling and onsite detection analysis of upward mining feasibility of residual coal from multi-gobs in close-multiple coal seams [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2023, 40(4): 1153-1169.

[6] 陈祉颖,刘志祥,李夕兵,等.残矿矿柱回采方案数值模拟与优化研究[J].中南大学学报(自然科学版),2023,54(6):2150-2161.
CHEN Zhiying, LIU Zhixiang, LI Xibing, et al. Numerical simulation and optimization of recovery scheme for residual ore pillars[J].Journal of Central South University (Science and Technology),2023,54(6):2150-2161.

[7] 冯帆,孟宪伟,李鹏杰,等.下向进路分层无分段巷道充填法采场间柱回采技术研究[J].矿业研究与开发,2023,43(2):1-4.
FENG Fang, MENG Xianwei, LI Pengjie, et al. Technical research on the recovery of rib pillar in the stope of downward drift layered and non-segmented roadway filling method[J].Mining Research and Development,2023,43(2):1-4.

[8] 周玉成,刘立顺,万串串.下向进路充填采矿法人工假顶优化研究与应用[J].矿业研究与开发,2023,43(3):53-58.
ZHOU Yucheng, LIU Lishun, WAN Chuanchuan. Research and application of artificial false roof optimization in downward drift filling mining method [J]. Mining Research and Development,2023,43(3):53-58.

[9] JIAN H, CHEN A F, LI X L, et al. A case study of pillar extraction techniques based on strip-filling and second-mining method [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10:1051245.

[10] JIAO H Z, YANG W B, SHEN H M, et al. Study on multi-layer filling treatment of extra-large goaf and its underground application[J].Materials,2022,15(16):5680.

[11] LI X S, SONG J.Ground pressure under mining ore bodies of different angles based on physical simulation[J].Shock and Vibration,2021:1-14.

[12] KONURIN A I, SHCHUKIN S A, NEVEROV S A. Extraction of ore reserves from undermined protective pillar under open pit bottom[J].IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2020,523(1):012007.

[13] 王晓军,郭鹏,黄惟盛,等.多因素组合影响下向进路充填顶板稳定性计算[J].岩土力学,2022,43(12):3453-3462.
WANG Xiaojun, GUO Peng, HUANG Weisheng, et al. Stability calculation of backfill roof in downward roadway under multifactor influence[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022,43(12):3453-3462.

[14] 吴浩,马丹,左宇军,等.大断面六角形进路围岩应力解析与数值验证[J].采矿与安全工程学报,2022,39(5):951-960.
WU Hao, MA Dan, ZUO Yujun, et al. Analytical solution and numerical verification of surrounding rock stress in large-section hexagonal route[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2022,39(5):951-960.

[15] 李嘉峰,刘长武,谢辉,等.破碎覆岩回采巷道临界宽度研究[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(增刊2):75-79.
LI Jiafeng, LIU Changwu, XIE Hui, et al. Research on roadway critical width of crushing overburden[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),2016,48 (Suppl.2):75-79.

[16] 王俊,乔登攀,李广涛,等.基于厚板理论下向进路充填假顶强度模型及应用[J].煤炭学报,2023,48(增刊1):28-36.
WANG Jun, QIAO Dengpan, LI Guangtao, et al. Strength model and its application of downward drift filling roof based on thick plate theory[J]. Journal of China Coal Society, 2023,48(Suppl.1):28-36.

[17] 李小松,李夕兵,龚永超,等.大跨度充填体假顶力学模型及稳定性分析[J].矿冶工程,2018,38(6):23-28+38.
LI Xiaosong, LI Xibing, GONG Yongchao, et al. Mechanical model and stability analysis for long-span artificial roof with backfill[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2018,38(6):23-28+38.

[18] 冯帆,黄万朋,郭忠平,等.浅埋下向单一进路巷道胶结充填顶板稳定性分析[J].采矿与安全工程学报,2016,33(6):1089-1095.
FENG Fan, HUANG Wanpeng, GUO Zhongping, et al. Stability analysis of cemented filling roof under the condition of shallow downward single route type of roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(6): 1089-1095.

[19] 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, XIA 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.

[20] 李兴权,韩立军,孟庆彬,等.下向分层进路充填采矿法中预留阶段顶柱力学行为分析[J].矿冶工程,2018,38(1):25-29.
LI Xingquan, HAN Lijun, MENG Qingbin, et al. Mechanical behavior of preset cap pillar in underhand cut and fill mining[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018,38(1):25-29.

[21] 刘光清,曾鹏,赵奎,等.复杂采空区群下残矿资源回采数值模拟研究[J].矿业研究与开发,2020,40(10):8-14.
LIU Guangqing, ZENG Peng, ZHAO Kui, et al. Numerical simulation of residual ore resources mining under complex goaf group[J]. Mining Research and Development,2020,40(10):8-14.

[22] 姜立春,李金柱.倾斜矿体采空区非对称顶板-矿柱结构体协同承载机理[J].中国有色金属学报,2024,34(1):329-343.
JIANG Lichun, LI Jinzhu. Synergistic bearing mechanism of asymmetric roof-pillar structure body in goaf of inclined orebody[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024,34(1):329-343.

[23] 蔡鑫,黄涯帅,周子龙,等.基于矿柱失稳风险分析的采空区关键矿柱重定义与辨识[J].岩石力学与工程学报,2024,43(1):216-225.
CAI Xin, HUANG Yashuai, ZHOU Zilong, et al. Redefinition and identification of critical pillars in goaf based on the risk analysis of pillar instability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2024,43(1):216-225.

[24] 陈璐,余茜,罗容,等.柱式采空区矿柱失稳诱导边坡滑塌机制研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(5):148-163.
CHEN Lu, YUqian, LUO Rong, et al. Study on slope failure mechanism induced by pillar instability above room and pillar goaf[J]. Journal of Mining And Strata Control Engineering,2024,6(5):148-163.

[25] 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, XIA 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.

[26] 徐芝纶.弹性力学(上册)[M].4版.北京:高等教育出版社,2006.
XU Zhilun. Elasticity: volume 1[M]. 4th edition. Beijing: Higher Education Press,2006.