



# 矿业科学学报

## JOURNAL OF MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY

### 基于尖点突变理论的采场矿柱稳定性分析

文小松, 王沉, 黄欣欣, 龙绍亮, 李程

Stability of mining pillars in stopes based on cusp catastrophe theory

引用本文:

文小松, 王沉, 黄欣欣, 等. 基于尖点突变理论的采场矿柱稳定性分析[J]. *矿业科学学报*, 2024, 9(6): 897-908.

WEN Xiaosong, WANG Chen, HUANG Xinxin, et al. Stability of mining pillars in stopes based on cusp catastrophe theory[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2024, 9(6): 897-908.

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. 矽石浆体充填空间特征研究与工程实践

引用本文: 古文哲, 杨宝贵, 朱磊, 等. 矽石浆体充填空间特征研究与工程实践[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(3): 409-418.

#### 2. 中间主应力影响下含瓦斯复合煤岩体变形渗流及能量演化特征研究

引用本文: 王凯, 赵恩彪, 郭阳阳, 等. 中间主应力影响下含瓦斯复合煤岩体变形渗流及能量演化特征研究[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(1): 74-82.

#### 3. 基于RSM-BBD的自然煤矽石骨料透水混凝土配比优化研究

引用本文: 刘艳, 周梅, 张凯, 等. 基于RSM-BBD的自然煤矽石骨料透水混凝土配比优化研究[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(5): 565-576.

#### 4. 随钻岩性识别技术研究进展

引用本文: 岳中文, 岳小磊, 杨仁树, 等. 随钻岩性识别技术研究进展[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(4): 389-402.

#### 5. 基于地质统计学反演的透明化矿山岩性建模参数研究及应用

引用本文: 陈柏平, 崔凡, 刘波, 等. 基于地质统计学反演的透明化矿山岩性建模参数研究及应用[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(4): 427-436.

文小松,王沉,黄欣欣,等. 基于尖点突变理论的采场矿柱稳定性分析[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(6): 897-908. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024926

WEN Xiaosong, WANG Chen, HUANG Xinxin, et al. Stability of mining pillars in stopes based on cusp catastrophe theory[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2024, 9(6): 897-908. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024926

## 基于尖点突变理论的采场矿柱稳定性分析

文小松,王沉,黄欣欣,龙绍亮,李程

贵州大学矿业学院, 贵州贵阳 550025

**摘要:**在开采埋藏较深的矿床时,往往需要留设一定宽度的永久矿柱来保证采场的稳定性,因此科学合理地设计矿柱宽度至关重要。以贵州某磷矿为研究对象,运用 Hoek-Brown 强度准则与矿柱面积承载理论推导了房柱法开采时采场矿柱安全系数表达式;在分析矿柱承载机理的基础上,利用矿柱尖点突变理论建立方形矿柱失稳突变模型,得到方形矿柱失稳的充要条件,并通过数值模拟和现场试验进行验证分析。结果表明:矿山安全矿柱宽度应大于 5.8 m,安全系数不小于 1.5,在数值模拟验证和实际生产中,取矿柱宽度为 6 m;当矿柱宽度设计为 6 m 时,采场矿柱最大沉降位移为 14.75 mm,最大应力为 3.88 MPa,均在矿柱稳定可控范围之内;数值模拟结果与现场监测结果基本吻合,且矿柱表面未发生明显破损和开裂现象。

**关键词:**磷矿;矿柱稳定性;矿柱宽度;面积承载理论;尖点突变理论

中图分类号:TD 879

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2024)06-0897-12

## Stability of mining pillars in stopes based on cusp catastrophe theory

WEN Xiaosong, WANG Chen, HUANG Xinxin, LONG Shaoliang, LI Cheng

School of Mining, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025, China

**Abstract:** When exploiting deep-buried ore deposits, it is necessary to leave permanent pillars with certain width to ensure the stability of the mining area. Therefore, the reasonable design of pillar width is vital to its safety. Taking a phosphate mine in Guizhou as an example, this study derives an expression for the safety factor of pillars in mines using the filling method based on the Hoek-Brown strength criterion and pillar area load-bearing theory. Specifically, we analyzed the load-bearing mechanism of the pillars and established a square pillar instability model using the cusp catastrophe theory to obtain the necessary and sufficient conditions for the instability of square pillars. Results indicate that the width of the mine safety pillar should exceed 5.8 m in width, and the safety factor should not be less than 1.5. In the numerical simulation verification and actual production, the pillar width is set at 6 m. When the width of the pillar is designed to be 6 m, the maximum settlement displacement of the stope pillar is 14.75 mm, and the maximum stress is 3.88 MPa, which are within the stable and controllable range of the pillar. The numerical simulation results are basically consistent with the field monitoring results, and there is no obvious damage and cracking on the surface of the pillar. It shows that the cusp catastrophe theory is proved to be valid in explaining the mechanical mechanism of the instability of the

收稿日期:2024-06-05 修回日期:2024-08-29

基金项目:国家自然科学基金(52174072, 52364010)

作者简介:文小松(1997—),男,贵州铜仁人,硕士研究生,主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究工作, E-mail: 1906903988@qq.com

通信作者:王沉(1989—),男,安徽淮北人,博士,教授,主要从事矿山压力与岩层控制、矿业系统工程等方面的研究工作。E-mail:

cwang@gzu.edu.cn

pillar structure in mined-out areas, and its feasibility is validated in the stability analysis and parameter design of the pillars.

**Key words:** phosphate mine; pillar stability; pillar width; area load-bearing theory; cusp catastrophe theory

随着矿产资源需求量的增加及采矿技术的发展,深部开采成为未来矿山发展的主要趋势<sup>[1-2]</sup>。房柱法开采时常留设一定的矿柱,作为一种支撑体系以确保采矿作业的安全<sup>[3]</sup>。支撑体系的稳定性主要取决于采场结构参数,大多数非煤矿山常使用经验公式对采场结构参数进行优化<sup>[4]</sup>,但经常会出现选取的参数不能满足生产要求或导致采场失稳破坏等情况。另外,由于深部开采相对浅部开采后原岩应力水平会逐渐升高,岩体动力破坏频次和强度均有所上升,冲击地压现象更为突出<sup>[5]</sup>。浅部采场设计公式通常是假定地层变形较小,而深部采场则需要考虑更为复杂和严重的沉降及变形作用,因此需要更为准确的采场稳定性分析方法<sup>[6]</sup>。

从力学角度看,矿柱发生失稳破坏主要是由于荷载超过矿柱承载极限,岩体内部结构产生连续发育的塑性区和滑移面<sup>[7]</sup>。从能量汇聚和分散角度看,采场围岩在开挖扰动过程中,内部逐渐积累了变形能和势能,一旦达到围岩所能承受的极限,即便是微小的外界干扰,也可能触发采场的稳定性丧失<sup>[8]</sup>。当外部作用力超过矿柱的最大承载强度时,极易发生破损和断裂破坏,最终导致采场稳定性受损<sup>[9-10]</sup>。此外,矿柱稳定性与采场的深度、矿房宽度、岩性等因素密切相关,通过构建矿柱力学模型求取矿柱安全系数,是评价矿柱失稳时充要条件的一种有效途径<sup>[11]</sup>。许多采场矿柱失稳破坏的相关研究主要采用力学试验、理论分析、现场监测及数值模拟等方法,对采场矿柱失稳变形破坏特征及变形机理进行了大量研究<sup>[12-13]</sup>。在矿柱设计和稳定性评价方面,赵国彦等<sup>[14]</sup>基于矿柱强度理论和荷载理论分析,认为矿柱合理宽度设计是矿柱承载强度的主要因素之一;罗斌玉等<sup>[15]</sup>、王炳文等<sup>[16]</sup>、吴迪等<sup>[17]</sup>分别构建矿柱结构体承载力学模型,采用安全系数法对矿柱稳定性进行了评价,分析了不同倾角和跨度比下矿柱失稳破坏模式;彭斌等<sup>[18]</sup>基于矿柱荷载、应力分布和自身强度等计算方法,得出了条形矿柱的安全系数,并采用反分析法对矿柱的稳定性进行了分析;史秀志等<sup>[19]</sup>基于条形矿柱的力学承载机理,采用突变理论推导了条形矿柱失稳的必要条件,对矿柱最优宽度为5 m时矿柱稳定性进行了分析;赵兴东<sup>[20]</sup>采用极限跨度

法、经验公式和极限平衡法,提出了合理的隔离矿柱宽度设计方案,并采用FLAC验算深部开采隔离矿柱稳定性;徐斌等<sup>[13]</sup>基于矿柱两侧约束条件的差异性,建立了矿柱应力分布的力学模型,得到了应力集中系数、临时支护强度、埋深等因素对矿柱极限承载宽度的影响规律;姜立春等<sup>[11]</sup>针对矿柱压缩、剪切破坏形式,提出了一种适用于综合荷载残矿开采条件下矿柱安全系数的计算方法,并探讨覆岩压力、崩落物质及爆破震动等荷载因素对矿柱稳定性的作用。在矿柱稳定性影响因素方面,尹升华等<sup>[21]</sup>得出了矿柱失稳破坏不仅受开挖扰动的影响,还受采场结构参数的影响,主要包括矿柱尺寸、矿房尺寸、开采深度和回采顺序;陈顺满等<sup>[6]</sup>基于普氏理论和Bieniawski矿柱强度理论,推导了矩形矿柱的安全系数表达式,并分析了各影响因素之间的敏感性。在矿柱失稳破坏方面,刘轩廷等<sup>[22]</sup>建立了矿柱失稳的尖点突变模型,得到了矿柱失稳的力学条件与判据;GAO等<sup>[23]</sup>对矿柱失稳破坏特征和变形机理进行了综合分析,从力学强度和破坏形式两个方面探讨,得出了矿柱失稳形式主要为剪切破坏、扭曲破坏和劈裂破坏;卢宏建等<sup>[24]</sup>基于二维相似物理模拟试验,揭示了多次开挖扰动下矿柱破裂失稳演化规律,认为矿柱在水平和垂直相邻矿房开挖过程中会发生多重叠加损伤;王在泉等<sup>[25]</sup>根据矿柱常发生剪切破坏的特点,引入了矿柱抗剪安全系数的概念,并探讨了数值模拟分析中判断矿柱失稳的标准。

上述研究主要聚焦于矿柱的稳定性分析与评价,在深部开采矿柱设计中,对矿柱合理宽度的留设大多根据以往的经验公式进行设计,忽略了矿柱失稳破坏机理、承载机理和稳定性影响因素对采场稳定性影响程度。矿柱宽度设计过小,会影响采场稳定性;矿柱宽度设计过大,造成资源浪费。为了提高采场矿柱的稳定性和减少资源浪费,需要从矿柱承载强度、失稳机理和变形破坏特征等方面对矿柱稳定性进行综合分析。因此,以贵州某磷矿为研究对象,在分析矿柱承载机理的基础上利用矿柱突变理论建立矿柱失稳突变模型,得到矿柱失稳的充要条件,并通过数值模拟和现场实验进行验证分析。

### 1 工程背景

实验区域位于贵州某矿区Ⅲ号矿体南段1 020~1 050 m 标高内矿体。该矿山采用房柱法进行开采,开采深度已达 350 m 以上,平均倾角 16°,属于缓倾斜矿体。矿房宽度 12 m,矿柱宽度 4.5 m,矿柱平均高度 4.80 m,为规则的矩形矿柱。矿体走向长度 2.30 km,平均厚度 4.80 m。对于矿体厚度在 5 m 以上,采场进路按 75 m×75 m 的结构布置矩形矿块,采场内除了留设 4 m 宽的连续矿柱以外,还需在空区内留设尺寸 4.5 m×4.8 m、间距 10 m 的点柱,作为永久矿柱维护采场稳定性。根据矿柱现场监测结果,采场内多数矿柱发生不同程度的失稳破坏。随着矿房的矿体回采完毕后,采场暴露面积随开挖步增加而逐渐增大,且采场空区上覆岩层重力完全由采场内留设的点柱来承载,加上邻近矿房开挖扰动,采场内大部分矿柱出现不同程度的开裂和破碎现象,在主裂隙的周围发育着 2~3 条次生裂隙和大面积的破碎范围。采场矿柱稳定性问题不断凸显,矿柱形状由原来的规则矩形矿柱变为不规则的矿柱,已无法满足矿山实际生产需求。因此,需要对试验采场矿柱的合理宽度进一步设计

和进行稳定性分析,才能确保采场的安全。

### 2 矿柱稳定性分析

#### 2.1 采场矿柱承载机理分析

根据普氏拱理论,作用在顶板-矿柱构成的支撑系统上的荷载等于拱内岩体自重。假设矿柱宽度  $W_p$ ,矿房宽度  $W_0$ ,塑性区宽度  $d$ ,弹性区宽度  $W_p - 2d$ ,采场高度  $h$ ,矿柱间距相等,矿柱数量  $N$ ,构建矿柱的力学机理分析模型如图 1 所示。基于矿柱面积承载原理,围岩应力重新分布平衡后会形成一个拱形塑性区,半径记为  $R_p$ 。运用普氏拱理论并通过卡斯特奈方程,可以得到顶板上方塑性区的半径  $R_p$  [26]:

$$R_p = R_0 \left[ \frac{(p_0 + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{c \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (1)$$

$$p_0 = \gamma H \quad (2)$$

式中,  $R_0$  为开挖半径, m;  $\sigma_0$  为开挖处的垂直自重应力, MPa;  $c$  为岩石黏聚力, 取值 1.8 MPa [6];  $\gamma$  为矿岩容重, 取值 27 kN/m<sup>3</sup>;  $H$  为开采深度, 取值 350 m;  $\varphi$  为岩石内摩擦角, (°)。

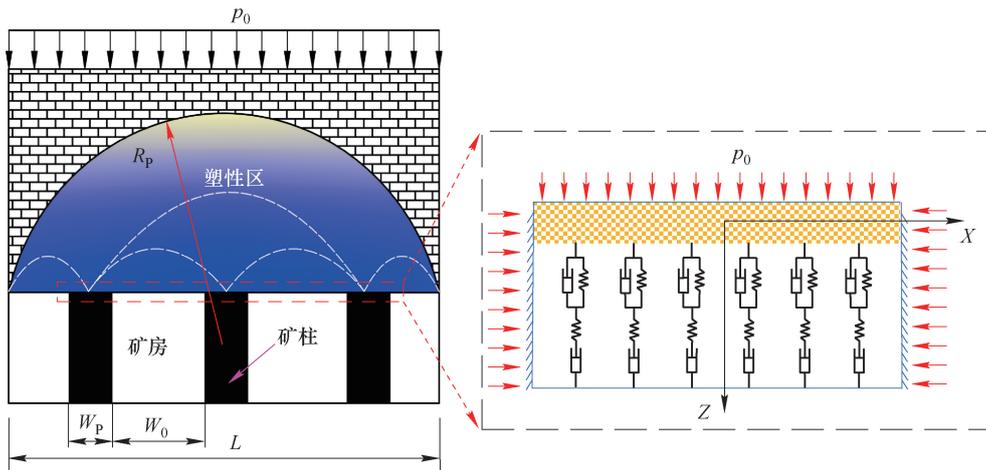


图 1 矿柱承载机理分析模型

Fig. 1 Analytic model of pillar load-bearing mechanism

在矿柱承载强度计算中, Bieniawski 矿柱强度公式应用较为广泛 [27]:

$$S_p = \sigma_c \left( 0.64 + 0.36 \frac{W_p}{h} \right)^\alpha \quad (3)$$

式中,  $\sigma_c$  为矿柱的平均抗压强度, 根据文献 [27], 取值 30 MPa;  $\alpha$  为常数, 当矿柱的宽高比小于 5

时,  $\alpha = 1.0$ ; 若宽高比大于 5 时,  $\alpha = 1.4$ 。通过对实验采场矿柱现场调研分析, 发现矿柱宽高比普遍小于 5, 因此  $\alpha$  取值 1.0。

基于普氏拱理论和面积承载理论得到的矿柱应力  $\sigma_p$  和 Bieniawski 矿柱强度公式得到的矿柱强度  $S_p$ , 可推导出房柱式开采方形矿柱的安全系数  $K$  [6]:

$$K = \frac{S_p}{\sigma_p} = \frac{\sigma_c(0.64 + 0.36 \times \frac{W_p}{h})W_p^2}{(W_0 + W_p)^2 \gamma R_0 \left[ \frac{(\gamma H + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{c \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}}} \quad (4)$$

2.2 矿柱失稳的尖点突变理论分析

岩石是一种天然材料,由于成岩条件、矿物成分的不同会存在许多原始缺陷,在外力作用下进一步发展,而使岩石的性能不断劣化<sup>[2]</sup>。柱状屈服区的本构关系曲线与弹性区的不同,前者可以表示为<sup>[8]</sup>

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D) \quad (5)$$

式中,  $E$  为初始弹性模量, GPa;  $\varepsilon$  为应变矢量;  $D$  为岩石中的缺陷呈泊松分布时损伤变量, 取值  $0 \sim 1$ <sup>[8]</sup>。其中:

$$D = 1 - \exp\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}}\right)^2\right] \quad (6)$$

式中,  $\varepsilon_{\max}$  为应力峰值点所对应的压缩位移与矿柱高度的比值。

在塑性区内, 上覆荷载  $P_s$  与矿柱变形量  $u$  之间的关系可以表示为

$$P_s = \frac{2Ed}{h} u \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u}{u_0}\right)^2\right] \quad (7)$$

式中,  $u_0$  为峰值荷载对应的变形值;  $d$  为塑性区宽度, m。

在弹性区内, 上覆荷载  $P_E$  与矿柱变形量  $u$  之间的关系可以表示为

$$P_E = \frac{E(W_p - 2d)}{h} u \quad (8)$$

根据上述分析, 屈服区的应变能  $U_s$  和弹性区的弹性势能  $U_E$  分别可以表示为

$$U_s = \frac{2Ed}{h} \int_0^u u e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u}{u_0}\right)^2} du \quad (9)$$

$$U_E = \frac{E(W_p - 2d)}{h} \int_0^u u du \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{2Ed}{h} \sqrt{3} u_0 e^{-\frac{3}{2}} + \frac{E(W_p - 2d)}{h} \sqrt{3} u_0 - \gamma H \left(1 + \frac{W_0}{W_p}\right) + \left(-\frac{2Ed}{h} 2e^{-\frac{3}{2}}\right) + \\ & \frac{E(W_p - 2d)}{h} (u - u_1) + \frac{8Ed}{hu_0^2} 2e^{-\frac{3}{2}} (u - u_1)^3 = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

为了简化式(17)的计算, 引入无量纲状态变量  $x$  和控制变量  $m, n$ :

$$x = \frac{u - u_1}{u_1} \quad (18)$$

$$m = -\frac{u_0^2}{2} + \frac{e^{\frac{3}{2}}(W_p - 2d)}{8\gamma} u_0^2 \quad (19)$$

上覆岩层的重力势能  $W_L$  可以表示为

$$W_L = \gamma H \left(1 + \frac{W_0}{W_p}\right) u \quad (11)$$

根据顶板和矿柱的力学模型, 得出矿柱总势能  $\Pi$  函数表达式为

$$\Pi = U_E + U_s - W_L \quad (12)$$

将式(9) ~ 式(11)代入式(12), 得到势函数的完整表达式:

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{2Ed}{h} \int_0^u u e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u}{u_0}\right)^2} du + \\ & \frac{E(W_p - 2d)}{h} \int_0^u u du + \gamma H \left(1 + \frac{W_0}{W_p}\right) u \end{aligned} \quad (13)$$

取矿柱的压缩量  $u$  为状态变量, 根据尖点突变理论, 由  $\Pi' = 0$  得到平衡曲面  $\Pi$  的方程:

$$\begin{aligned} \Pi' = & \frac{2Ed}{h} u e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u}{u_0}\right)^2} + \frac{E(W_p - 2d)}{h} u - \\ & \gamma H \left(1 + \frac{W_0}{W_p}\right) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

根据平衡曲面的光滑性质, 可以得到尖点的方程表达式:

$$\Pi'' = \frac{2Ed}{h} \left(-\frac{u}{u_0} - \frac{2u}{u_0^2} + \frac{u^3}{u_0^4}\right) e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u}{u_0}\right)^2} = 0 \quad (15)$$

由式(15)可得到尖点:  $u = u_1 = \sqrt{3} u_0$ 。为了得到式(14)的标准形式, 将其在尖点处进行泰勒级数展开, 并截取至3次项<sup>[28]</sup>:

$$\Pi^{(4)} = \frac{2Ed}{h} \left(-\frac{3}{u_0^2} + \frac{6u_0^2}{u_0^4} + \frac{u^4}{u_0^6}\right) e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{u}{u_0}\right)^2} \quad (16)$$

因此, 可以得到平衡面  $\Pi'$  方程在  $u = u_1 = \sqrt{3} u_0$  点的泰勒公式的3次展开式:

$$\begin{aligned} n = & \left[ \frac{\sqrt{3}}{4} + \frac{\sqrt{3} e^{\frac{3}{2}}(W_p - 2d)}{8d} \right] u_0^2 - \\ & \frac{e^{\frac{3}{2}} \gamma H (W_p + W_0) h}{8W_p E d} u_0^2 \end{aligned} \quad (20)$$

可得到尖点突变理论标准形式的平衡曲面(图2)方程:

$$x^3 + mx + n = 0 \quad (21)$$

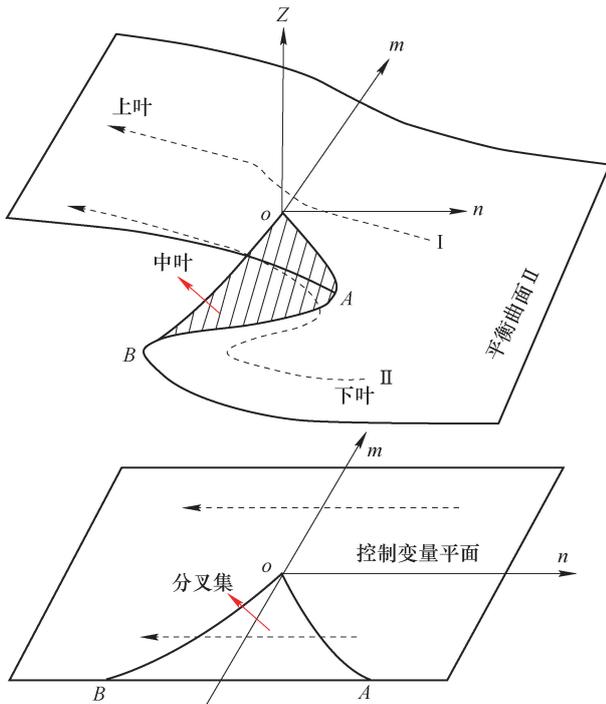


图2 系统平衡曲面和控制变量平面  
Fig.2 System equilibrium surface and control variable plane

求解式(21)和拐点方程  $3x^2 + m = 0$ , 再求解  $x$ , 可以得到控制方程。平衡表面的折痕在  $mon$  平面上的投影称为系统的分叉集, 其控制方程可表示为<sup>[8]</sup>

$$\Delta = 4m^3 + 27n^2 = 0 \quad (22)$$

$$m = u_0^2 \left( k - \frac{1}{2} \right) \quad (23)$$

$$n = u_0^3 \left( \sqrt{3}k + \frac{\sqrt{3}}{4} \right) - lu_0^2 \quad (24)$$

$$\begin{cases} k = \frac{e^{\frac{3}{2}}(W_p - 2d)}{8d} \\ l = \frac{e^{\frac{3}{2}}\gamma H(W_p + W_0)h}{8W_p E d} \end{cases} \quad (25)$$

则式(22)可表示为

$$\Delta = 4u_0^6 \left( k - \frac{1}{2} \right)^3 + 27 \left[ u_0^3 \left( \sqrt{3}k + \frac{\sqrt{3}}{4} \right) - lu_0^2 \right]^2 = 0 \quad (26)$$

当判别式  $\Delta > 0$  时, 式(21)仅有一个实数解, 代表1个稳定的平衡状态, 矿柱变形连续且稳定<sup>[29]</sup>。当  $\Delta < 0$  时, 有3个实数解, 对应3个平衡状态, 表明控制点已越过临界点, 矿柱处于不稳定状态。当  $\Delta = 0$  时, 同样存在3个实数解; 其中2个为稳定状

态, 1个为不稳定状态。这意味着当控制点集  $(m, n)$  跨越分枝点集  $B$  的边界时, 系统状态会发生突变, 从1个分支跳转到另1个分支。

基于上述分析, 为了保证矿柱的稳定性, 平衡曲面方程  $\Delta$  必须大于0, 即

$$\Delta = 4u_0^6 \left( k - \frac{1}{2} \right)^3 + 27 \left[ u_0^3 \left( \sqrt{3}k + \frac{\sqrt{3}}{4} \right) - lu_0^2 \right]^2 > 0 \quad (27)$$

由于式(27)中的第2项大于0, 因此平衡曲面方程  $\Delta > 0$ , 也就是  $k > 1/2$ , 得到矿柱失稳破坏的充要条件为

$$W_p > (4e^{-\frac{3}{2}} + 2)d \quad (28)$$

矿体开挖时, 围岩的应力状态发生相应变化, 地震波的速度也随之发生变化, 因此采用地震波测试仪, 测量了矿柱中不同深度钻孔处地震波的速度, 从而确定了塑性区的宽度。矿柱塑性区发育宽度为1~3 m, 因此  $d$  取值2.0, 代入式(28)中得到矿柱宽度大于5.8 m ( $W_p > 5.8$ )。另外, 根据 Lunder 经验公式所确定的矿柱安全系数为1.5, 综上所述, 对于实验采场的矿柱稳定性的两个标准为

$$\begin{cases} W_p > 5.8 \\ K = \frac{S_p}{\sigma_p} > 1.5 \end{cases} \quad (29)$$

### 3 数值模拟验证

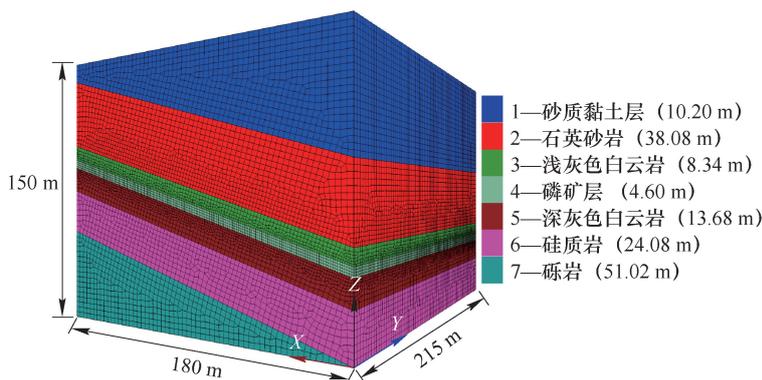
#### 3.1 数值计算模型建立

##### 3.1.1 计算模型及范围

为了校核理论计算结果, 针对贵州某磷矿矿区开采条件及开采时对矿柱的影响范围, 为了模拟结果更接近于矿山现场实际开采情况, 提高模拟试验的可靠性, 将实验采场仍选择在开采标高为1020~1050 m 内的矿体, 实验采场结构参数与原采场结构参数完全一致, 矿房之间采用连续回采的开采顺序, 矿房矿体采出后, 采场内预留规则的点柱。根据实验采场矿柱留设情况和开采方式, 采用数值模拟软件 FLAC<sup>3D</sup> 建立矿体开挖模型, 模型长×宽×高为215 m×180 m×150 m, 如图3所示。根据理论推导, 在模型中将矿柱宽度设计为6 m, 矿柱高度、矿房宽度和矿柱间距与矿山实际留设情况相同, 模型沿矿体走向设置5排矿柱, 矿柱编号依次为1~5, 矿房编号依次为I~VI。模型开挖方式与矿山实际开采一致, 即各矿房之间依序进行模拟开挖, 先开挖矿房I, 后开挖矿房II, 依次类推, 将每一个矿房开挖后记为1个开挖步骤。同时, 在建模过程中, 对模

型进行随机节理裂隙网格划分;划分单元时,遵循照顾应力集中部位的原则,在采场矿体四周划分较为

细密的单元,而其余岩层区域划分为较为稀疏的单元。初始模型单元总数 295 800,节点总数 532 954。



(a) 模型尺寸及矿层分布



(b) 矿房矿柱布置示意图

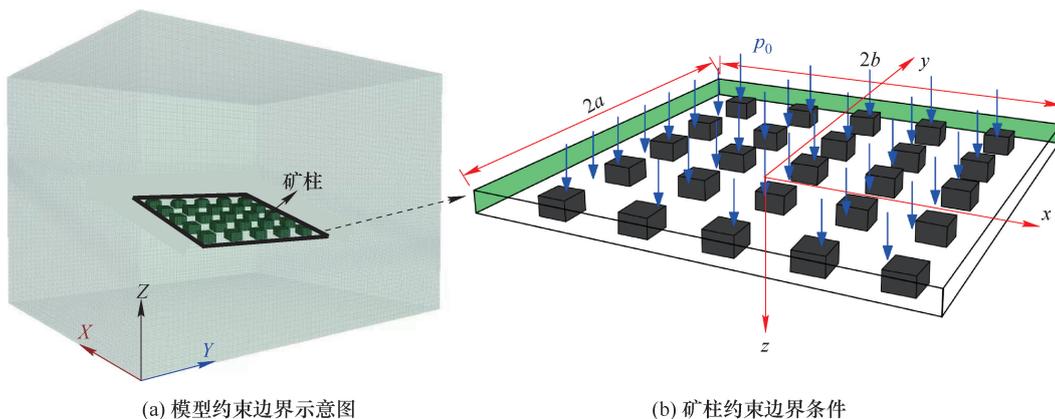
图3 房柱式开采模型数值模拟示意图

Fig. 3 Schematic of numerical simulation model for room-and-pillar mining

3.1.2 约束边界条件

对侧面设置刚性约束,底部限制其竖向移动,模型上部施加覆岩层的自重应力,如图4所示。将顶部设置为不受任何约束的自由边界条件,根据矿山开采实际情况在模型顶部施加垂直荷载;将模

型底部设置为固定约束边界条件,在模型四周施加一定的初始位移。在模拟开挖的初始阶段,仅考虑顶板-矿柱系统的自重应力,然后,根据矿区试验采场地应力实测结果与变化规律在模型的边界处进行施加。



(a) 模型约束边界示意图

(b) 矿柱约束边界条件

图4 模型边界约束条件示意图

Fig. 4 Model boundary constraint condition

3.1.3 岩体计算参数获取

通过岩石取芯及室内试验,获得石英砂岩、白云岩等7组矿岩的物理力学参数。受矿柱周围环境及矿体、岩体内部节理裂隙等因素的影响,矿柱的强度会有所下降,导致矿柱整体抗压

强度要远远低于原岩的抗压强度。为了使试验结果具有更好的普适性,利用广义 Hoek-Brown 破坏准则对矿岩室内力学参数进行折减用于数值模拟结果见表1,折减系数一般为 0.5~0.85<sup>[30]</sup>。

表 1 数值模拟力学参数  
Table 1 Mechanical parameters in numerical simulation

岩性	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	泊松比	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)
砂质黏土层	45.68	24.32	4.65	0.17	18.63	32.12
石英砂岩	78.41	35.43	5.34	0.23	18.60	59.35
浅灰色白云岩	47.50	32.54	11.59	0.16	14.69	57.14
磷矿层	29.99	49.12	12.73	0.21	28.70	36.00
深灰色白云岩	55.62	38.06	10.61	0.13	16.80	58.73
硅质岩	63.71	45.72	11.79	0.15	18.62	63.48
砾岩	88.62	52.49	14.37	0.10	25.94	44.25

3.2 数值模拟结果分析

3.2.1 非均匀变形作用下采场位移分布

为监测采场非均匀变形情况,在距离矿房上方 4 m 的顶板处设定了监测线及监测点。为了减少

模拟试验数据误差,共设置 5 条监测线,可分别监测各矿房开挖后采场应力变化和位移运移规律,模型开挖监测方案如图 5 所示。

矿房 I 至 VI 开挖后采场顶板位移变化特征如

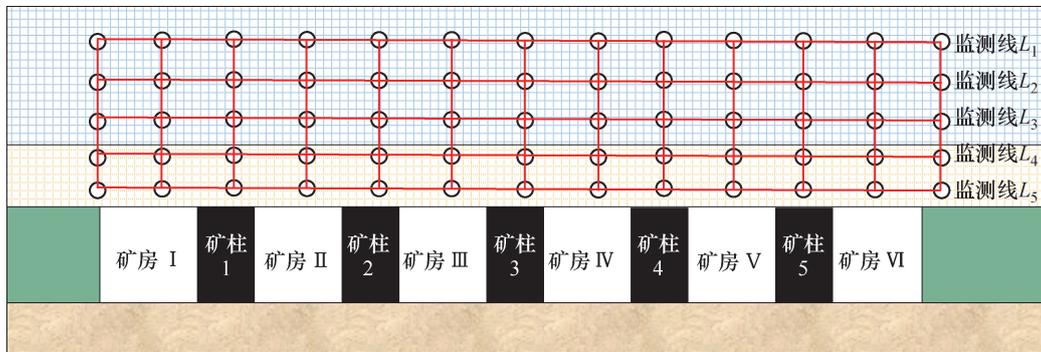


图 5 模型开挖监测方案

Fig. 5 Monitoring scheme of model excavation

图 6 所示。图中  $Y=0$  对应于第 1 个矿房开挖位置,随着 6 个矿房开挖后,顶板位移下沉量逐渐增加;采场两端边界矿柱上方的顶板位移下沉量相对较小,总体趋于稳定。矿房 I 开挖后,顶板的垂直位移约为 9.86 mm;相邻矿房 II 开挖后,顶板位移增加到 12.21 mm;至矿房 VI 开挖时,矿房 II、III、IV 和 V 上方的顶板位移下沉量最大,如图 6(a) 所示。顶板下沉导致边界矿柱上方围岩水平移动,如图 6(b) 所示。矿房 I 开挖后,顶板中心的水平位移为 0,顶板的水平位移沿着顶板中心呈对称分布;矿房 II 开挖后,在矿房 I、II 之间留下 1 个间隔矿柱 1,用于支撑采场,矿房 I 的水平位移在开挖后为  $-1.60 \sim -1.48$  mm;矿房 II 开挖后,顶板左侧远离矿柱的水平位移减小为  $-1.10 \sim -0.60$  mm,顶板右侧远离矿柱的水平位移减小为  $0.90 \sim 1.10$  mm;随

着矿房 III、IV、V 和 VI 依次开挖,水平位移逐渐趋于稳定。结合现场监测位移沉降变化,数值模拟结果与现场监测结果差异不大,且在矿柱稳定性范围之内。

3.2.2 非均匀变形作用下矿柱应力分布

上覆岩层在重力和蠕变作用下不断移动,模型中心的矿柱首先受力,然后出现应力集中,应力转移到采矿区域的边界。在此过程中,采场应力主要集中在采场中心的矿柱上且受力均匀;而采场边界矿柱的承载应力远低于采场中心的矿柱,最大垂直应力也主要集中在采场中部,从采空区中心到边界出现不均匀变形。相对于采空区中心的矿柱,采空区两侧和边界中部的矿柱受力不均匀,受到偏心荷载。为了更好地观察矿柱在覆岩变形下应力分布特征,对其中 1 排矿柱进行变形实验,如图 7 所示。

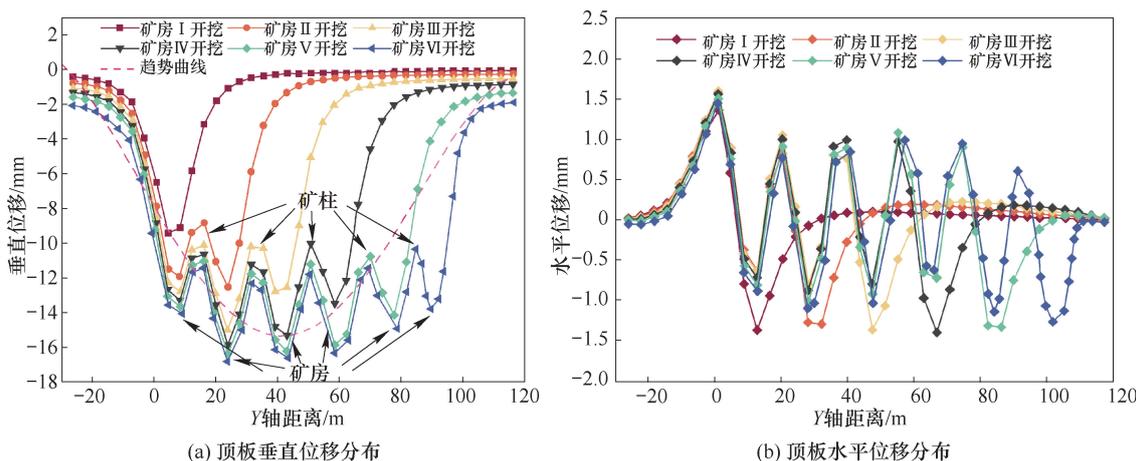


图6 矿房 I ~ VI回采期间顶板位移曲线

Fig. 6 Movement curves of roof displacement during mining of mining rooms I ~ VI

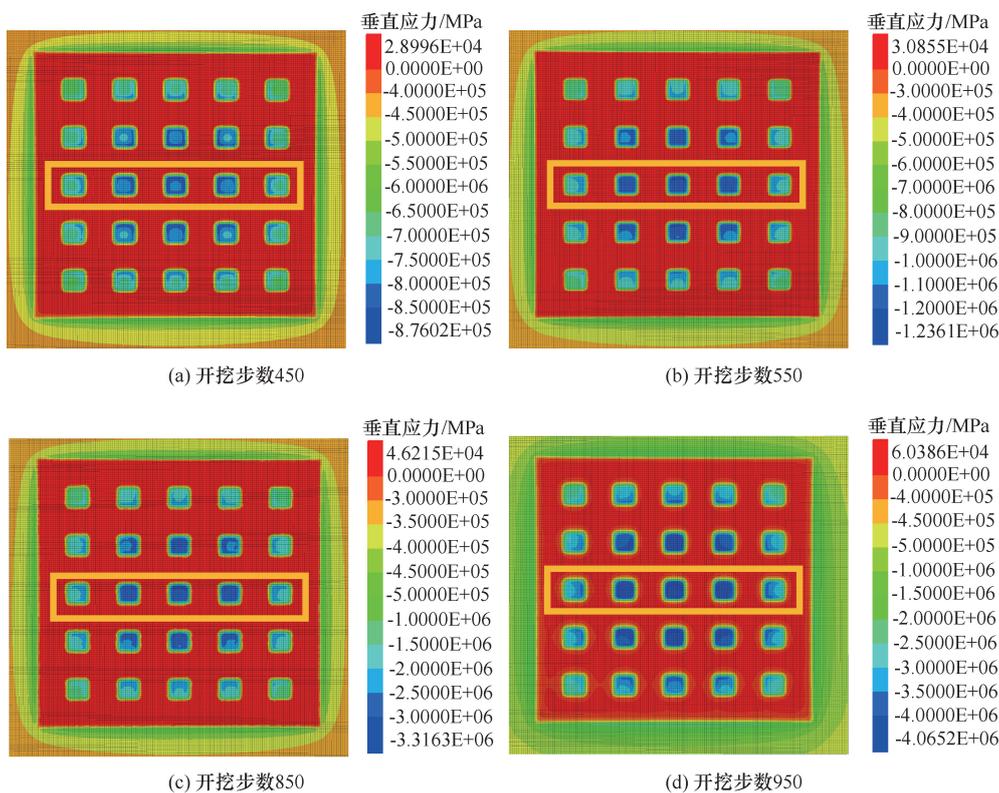


图7 非均匀变形下矿柱应力分布示例

Fig. 7 Example of pillar stress distribution under non-uniform deformation

相对于采空区中心的矿柱,采空区两侧和边界中部的矿柱受力不均匀,随着采矿活动不断向前推进,应力主要集中在采场中间的矿柱上,最大值 4.07 MPa,如图 8 所示。此外,矿柱上的应力与上覆岩层的不断移动明显不一致,尤其是采空区两侧的矿柱应力在 Y 轴方向上的分布明显不均匀。作用力及作用点各不相同,表明确实发生了偏心加载。

为了验证采场中间矿柱与边界处矿柱在非均匀变形作用下的变形差异,选取采场中间 3 号矿柱

与边界处 5 号矿柱的矿柱应力及塑性区范围进行对比分析。随着采矿的推进,矿柱应力逐渐增加的同时塑性区范围也发生不同程度的变化,如图 9 所示。矿柱受到剪切作用,始终处于高应力集中区,表面局部变形;矿柱在采矿过程中始终承受着压力,使其产生较大侧向压力和变形;矿柱上的剪应力为 1.58 MPa,远低于剪应力阈值 3.51 MPa。这表明矿柱未受损,分析结果与现场实际情况一致。

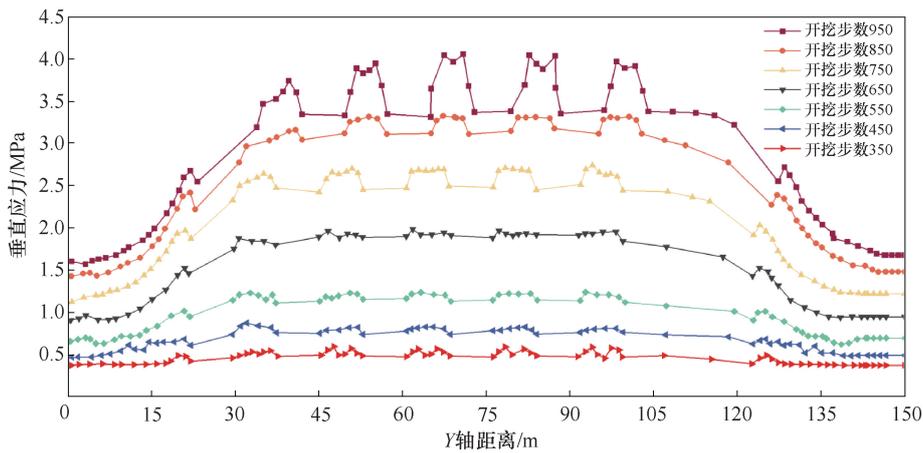


图8 不均匀变形过程中矿柱应力分布变化

Fig. 8 Variations in the stress distribution of ore pillars during non-uniform deformation

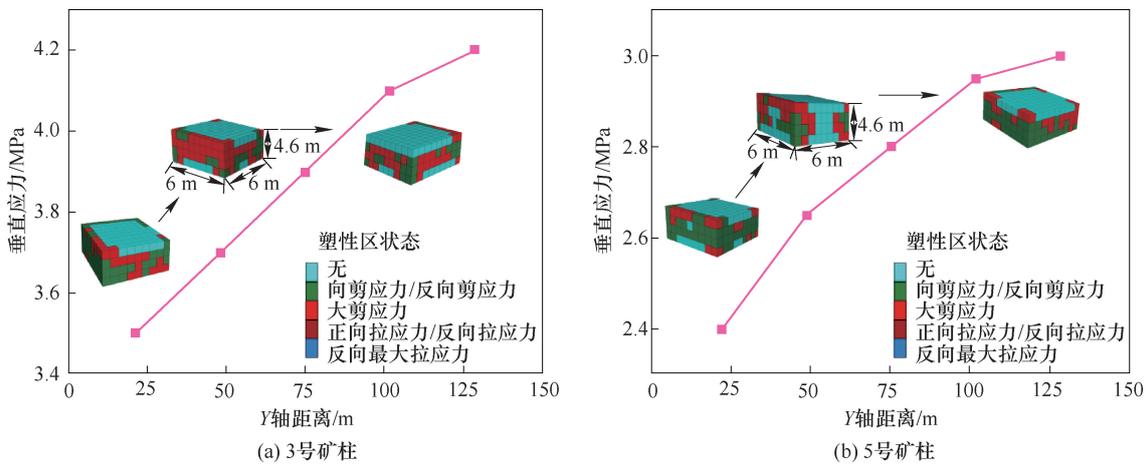


图9 非均匀变形条件下矿柱塑性区分布

Fig. 9 Distribution of the plastic zone in pillars under non-uniform deformation conditions

### 4 现场工业性应用

根据磷矿生产经验,结合理论计算和数值模拟结果,在实验采场 1 020~1 050 m 中段矿体回采过程中设计采场矿柱宽度值 6 m。在采场内矿柱 1~5 的中部位置安装位移、应力监测设备,位移监测采用位移监测仪 YHW300,应力变化监测采用油枕应力计 HCZ-2。现场监测结果如图 10 所示,可以看出,当矿柱宽度为 6 m 时,在阶段矿体回采过程中,矿柱位移沉降并不明显,最大位移 14.75 mm,最大应力 3.88 MPa,均集中在采场中部的矿柱上。同时,经过现场观测,随着矿房 I~VI 矿体回采后,矿柱表面没有发生明显的剥落、开裂和破裂现象。现场实测结果与模拟结果基本吻合,说明矿柱可靠性良好,证明了理论计算结果符合现场实际要求。

### 5 结论

针对房柱法开采时矿柱宽度对采场稳定性的影响特征,根据普氏拱理论、矿柱面积承载机理和尖点突变理论建立矿柱失稳力学模型,对房柱法开采时采场矿柱稳定性进行综合分析,得到了矿柱发生失稳时的充要条件,并通过现场试验进行了合理验证。

(1) 构建了包含塑性区的采场顶板-矿柱支撑系统的简化力学模型。基于尖点突变理论,分析了房柱法开采时采场矿柱破坏失稳的破坏机制,得到了尖点处的标准平衡曲面方程及系统的分叉集方程;推导出试验采场矿柱失稳破坏的充要条件为矿柱宽度  $W_p$  须大于 5.8 m,安全系数  $K$  不小于 1.5。

(2) 根据模拟结果确定矿柱宽度取 6 m。此时,6 个矿房依次开挖完毕后,采场最大主应力 4.07 MPa,主要集中于采场中部的矿柱;矿柱的最

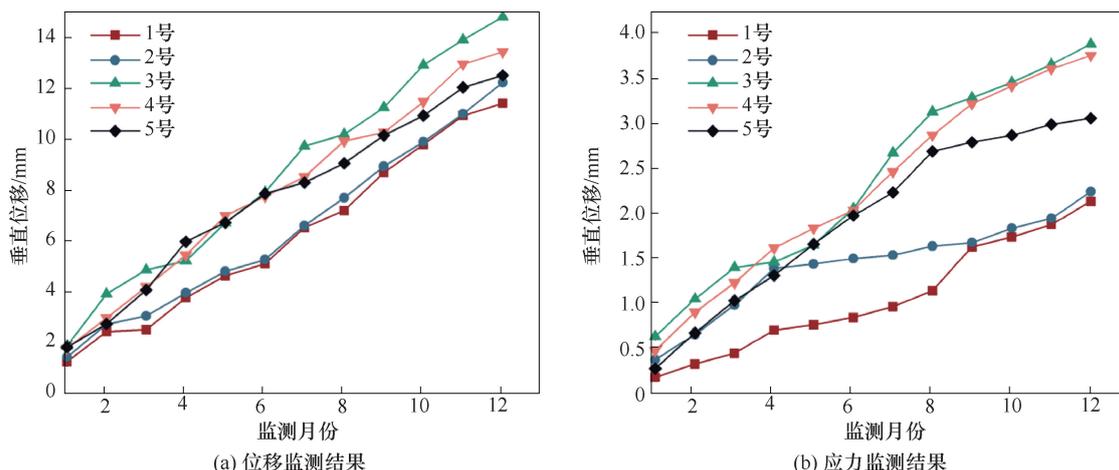


图10 矿柱宽度6 m时变形监测结果

Fig. 10 Deformation monitoring results with pillar width of 6 m

大剪应力 1.58 MPa, 远低于剪应力阈值; 采场中心区域具有最大的垂直位移, 最大垂直位移量 15.80 mm, 最大水平位移量 1.21 mm, 在矿柱稳定性范围之内。

(3) 监测结果表明, 当矿柱宽度设计 6 m 时, 在阶段矿体回采过程中, 矿柱位移沉降并不明显, 最大位移值 14.75 mm, 最大应力 3.88 MPa, 均集中在采场中部矿柱上, 数值模拟结果与现场监测结果基本吻合。经过现场观测, 随着 6 个矿房矿体回采后, 矿柱表面没有发生明显的剥落、开裂和破裂现象, 说明通过本文方法对矿柱合理宽度的计算结果在实际应用中存在可靠性。

## 参考文献

- [1] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.  
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2161-2178.
- [2] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.  
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [3] 周子龙, 陈璐, 赵源, 等. 双矿柱体系变形破坏及承载特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 420-428.  
ZHOU Zilong, CHEN Lu, ZHAO Yuan, et al. Experimental study on failure mechanism and bearing characteristic of double-pillar system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(2): 420-428.
- [4] 刘武团, 张海磊, 王成财, 等. 李家沟矿区超前开采安全技术要素分析[J]. 金属矿山, 2015(3): 169-172.  
LIU Wutuan, ZHANG Hailei, WANG Chengcai, et al. Analysis of safety technology factor of advanced mining in lijiaogou mine area [J]. Metal Mine, 2015(3): 169-172.
- [5] 韩华焯, 严鹏, 罗笙, 等. 基于能量理论的深埋矿山矿柱尺寸设计方法[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(3): 130-138.  
HAN Huaye, YAN Peng, LUO Sheng, et al. Pillar size design method for deep mine based on energy theory [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(3): 130-138.
- [6] 陈顺满, 吴爱祥, 王贻明, 等. 深部回采矿柱稳定性影响因素分析及其在应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2018, 49(8): 2050-2057.  
CHEN Shunman, WU Aixiang, WANG Yiming, et al. Analysis of influencing factors of pillar stability and its application in deep mining [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2018, 49(8): 2050-2057.
- [7] 朱德仁. 岩石工程破坏准则[J]. 煤炭学报, 1994, 19(1): 15-20.  
ZHU Deren. Rock project failure criterion [J]. Journal of China Coal Society, 1994, (1): 15-20.
- [8] 张钦礼, 曹小刚, 王艳利, 等. 基于尖点突变模型的

- 采场顶板-矿柱稳定性分析[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(10): 52-57.
- ZHANG Qinli, CAO Xiaogang, WANG Yanli, et al. Stability analysis of stope roof-pillar based on cusp catastrophe model[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(10): 52-57.
- [9] 胡建华, 阮德修, 周科平, 等. 基于空区结构效应的残矿开采作业环境安全辨识与协同利用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(3): 1122-1130.
- HU Jianhua, RUAN Dexiu, ZHOU Keping, et al. Identification and synergic use of operating environment safety based on structure effect of goafs in residual mining[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(3): 1122-1130.
- [10] 李夕兵, 李地元, 郭雷, 等. 动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 922-928.
- LI Xibing, LI Di Yuan, GUO Lei, et al. Study on mechanical response of highly-stressed pillars in deep mining under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 922-928.
- [11] 姜立春, 王玉丹. 复杂荷载作用下残采矿柱综合安全系数[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2018, 49(6): 1511-1518.
- JIANG Lichun, WANG Yudan. Comprehensive safety factor of residual mining pillar under complex loads[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2018, 49(6): 1511-1518.
- [12] 马强英, 王薪荣, 杨宇江, 等. 矿柱偏心承载特性与失稳破坏机制[J]. 有色金属工程, 2024, 14(1): 100-107.
- MA Qiangying, WANG Xinrong, YANG Yujiang, et al. Eccentric bearing performance and failure mechanism of pillar[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(1): 100-107.
- [13] 徐斌, 李永亮, 路彬, 等. 胶结充填采场顶板承载特性及煤柱稳定性分析[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(2): 200-209.
- XU Bin, LI Yongliang, LU Bin, et al. Analysis of roof bearing characteristics and coal pillar stability of cemented backfill field[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(2): 200-209.
- [14] 赵国彦, 周礼, 李金跃, 等. 房柱法矿柱合理尺寸设计及矿块结构参数优选[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(11): 3943-3948.
- ZHAO Guoyan, ZHOU Li, LI Jinyue, et al. Reasonable pillar size design and nugget structural parameters optimization in room-and-pillar mining[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(11): 3943-3948.
- [15] 罗斌玉, 叶义成, 曹中, 等. 基于 Mohr-Coulomb 准则的缓倾斜层状矿床矿柱强度估算及倾角效应[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1940-1946, 1956.
- LUO Binyu, YE Yicheng, CAO Zhong, et al. Estimation of pillar strength and effect of inclination under gently inclined layered deposits based on Mohr-Coulomb criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1940-1946, 1956.
- [16] 王炳文, 徐鹏, 张浩, 等. 九仗沟金矿采场岩体稳定性分析及参数优化[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(6): 561-567.
- WANG Bingwen, XU Peng, ZHANG Hao, et al. Stability analysis and parameter optimization on the rock mass in Jiuzhanggou gold mine[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(6): 561-567.
- [17] 吴迪, 邓腾飞, 孙光华. 阶段空场嗣后充填采场稳定性分析: 模型及试验研究[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(3): 260-267.
- WU Di, DENG Tengfei, SUN Guanghua. Stability analysis of stage open stope with delayed backfill: modelling and experimental studies[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(3): 260-267.
- [18] 彭斌, 陈才贤, 杨军伟. 石膏矿矿柱稳定性分析及试验研究[J]. 采矿技术, 2011, 11(2): 18-21.
- PENG Bin, CHEN Caixian, YANG Junwei. Stability analysis and experimental study of gypsum mine pillar[J]. Mining Technology, 2011, 11(2): 18-21.
- [19] 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.
- [20] 赵兴东. 谦比希矿深部开采隔离矿柱稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 2616-2622.
- ZHAO Xingdong. Stability analysis of insulating pillar of excavation of Chambishi copper mine in depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2616-2622.

- [21] 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(S1): 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(S1):48-52.
- [22] 刘轩廷,陈从新,刘秀敏,等. 充填开采下顶板-间柱支撑体系的突变失稳分析[J]. 岩土力学,2021,42(9): 2461-2471.  
LIU Xuanting, CHEN Congxin, LIU Xiumin, et al. Analysis of catastrophic instability of roof-rib pillar support system under backfill mining[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(9): 2461-2471.
- [23] GAO W, GE M M. Stability of a coal pillar for strip mining based on an elastic-plastic analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016,87: 23-28.
- [24] 卢宏建,梁鹏,甘德清,等. 动态扰动下硬岩矿柱破裂失稳演化特征试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2017,36(S2): 3713-3722.  
LU Hongjian, LIANG Peng, GAN Deqing, et al. Damage evolution characteristic of hard-rock pillars under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(S2): 3713-3722.
- [25] 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 Huaifeng. Numerical calculation method for shear safety coefficient of mine pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2010,27(2): 277-280.
- [26] 苏学贵,宋选民,原鸿鹄,等. 受上覆采空区影响的巷道群稳定性控制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016,33(3): 415-422.  
SU Xuegui, SONG Xuanmin, YUAN Honghu, et al. Stability control of the roadway group under the influence of overlying goaf[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2016,33(3): 415-422.
- [27] BIENIAWSKI Z T. Design investigations for rock Caverns in South Africa[M]. Storage in Excavated Rock Caverns: Rockstore 77. Amsterdam: Elsevier, 1978: 657-662.
- [28] 夏开宗,陈从新,刘秀敏,等. 基于突变理论的石膏矿矿柱-护顶层支撑体系的破坏分析[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(S2):3837-3845.  
XIA Kaizong, CHEN Congxin, LIU Xiumin, et al. Study of the failure of pillar-roof system in gypsum mines based on catastrophe theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 ( S2 ): 3837-3845.
- [29] 过江,冯永菲. 深部回采矿柱失稳的尖点突变理论分析及宽度优化[J]. 中国安全生产科学技术, 2017,13(7): 111-116.  
GUO Jiang, FENG Yongfei. Cusp catastrophe theory analysis and width optimization on instability of pillar in deep mining[J]. Journal of Safety Science and Technology,2017,13(7): 111-116.
- [30] 叶海旺,龙贵川,王其洲,等. 层状倾斜矿体矿柱稳定性特征及矿房参数优化[J]. 金属矿山,2021(5): 25-35.  
YE Haiwang, LONG Guichuan, WANG Qizhou, et al. Stability characteristics of the ore-pillars of layered inclined orebody and optimization of mine room parameters[J]. Metal Mine,2021(5): 25-35.

(责任编辑:张彩艳)