

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0453

充填开采下顶板-间柱支撑体系的突变失稳分析

刘轩廷^{1,2}, 陈从新^{1,2}, 刘秀敏^{1,2}, 夏开宗^{1,2}, 张褚强³, 王田龙^{1,2}, 王 月^{1,2}

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

摘 要: 对于采用充填法开采的金属矿山, 在实际开采过程中往往会形成顶板-间柱支撑体系。为了保证矿山的安全生产, 探究充填开采下顶板-间柱支撑体系的破坏机制具有重要意义。在考虑了充填体对间柱侧压作用的基础上, 建立了充填开采下顶板-间柱支撑体系的力学模型, 在此基础上应用突变理论探究了充填体作用下支撑体系的破坏机制, 分析了充填前后支撑体系的结构参数对于采场稳定性的影响。研究表明: 在岩体力学性质一定的情况下, 充填开采下的顶板-间柱支撑体系的稳定性由采场结构参数(顶板厚度、采场跨度、间柱宽度、间柱高度)和上覆荷载、充填体侧压作用共同控制; 充填体的加入会降低支撑体系的刚度比, 进而提高采场的稳定性; 在对支撑体系的结构参数进行优化时, 当采场处于未充填状态时, 优化顺序应为顶板厚度、采场跨度、间柱宽度、间柱高度; 当采场处于充填状态时, 优化顺序应为顶板厚度、间柱宽度、采场跨度、间柱高度。将理论推导与数值模拟相结合应用在工程实例上, 验证了理论推导的正确性。

关 键 词: 采矿工程; 充填; 突变理论; 顶板; 间柱; 采场稳定性

中图分类号: TD313

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 09-2461-11

Analysis of catastrophic instability of roof-rib pillar support system under backfill mining

LIU Xuan-ting^{1,2}, CHEN Cong-xin^{1,2}, LIU Xiu-min^{1,2}, XIA Kai-zong^{1,2},
ZHANG Chu-qiang³, WANG Tian-long^{1,2}, WANG Yue^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China)

Abstract: A roof-rib pillar support system is often formed in the metal mines that applied to the backfill mining method. In order to ensure the safe mining, it is of great significance to explore the failure mechanism of the roof-rib pillar support system under backfill mining. On the basis of considering the side pressure effect of the backfill on the rib pillar, a mechanical model of the roof-rib pillar support system under backfill mining was established. Furthermore, the catastrophe theory was used to explore the failure mechanism of the supporting system under the action of the filling body, and the influence of the structural parameters of the support system before and after filling on the stability of the stope was analyzed. The research results show that under the condition of certain mechanical properties of the rock mass, the stability of the roof-rib pillar support system under backfill mining is controlled by the stope structure parameters (roof thickness, stope span, rib pillar width, rib pillar height), the overburden load and the side pressure of the backfill. The addition of the filling body will reduce the stiffness ratio of the support system, thereby improving the stability of the stope. When the stope is at an unfilled state, the optimization sequence of the structural parameters of the support system should be roof thickness, stope span, rib pillar width and rib pillar height. When the stope is at the state of filling, the optimization sequence should be roof thickness, rib pillar width, stope span, and rib pillar height. The combination of theoretical derivation and numerical simulation is applied in the supporting project to verify the correctness of theoretical derivation.

Keywords: mining engineering; filling; catastrophe theory; roof; rib pillar; stope stability

收稿日期: 2021-03-31

修回日期: 2021-05-14

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (No.42002292)。

This work was supported by the Young Scholar Fund of National Natural Science Foundation of China(42002292).

第一作者简介: 刘轩廷, 男, 1995 年生, 博士研究生, 主要从事地表岩层移动和地下采矿稳定性等方面的研究工作。E-mail: liuxuanting18@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 夏开宗, 男, 1988 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事地下采矿稳定性和边坡稳定性等方面的研究。E-mail: kzxia@whrsm.ac.cn

1 引言

充填采矿法在提高回采率及采场稳定性、控制地表沉降等方面具有不可替代的优势,近些年来充填采矿法在金属矿山的应用比例越来越大^[1]。对于采用充填采矿法的金属矿山,在实际生产过程中会形成顶板-间柱支撑体系。对于特定的金属矿山,其岩体力学性质是固定的,支撑体系的稳定性主要取决于采场的结构参数。大多数金属矿山常使用经验公式对采场结构参数进行优化^[2],但经常会出现选取的参数不满足生产要求的情况。所选参数过于保守会导致降低回采率,影响矿山的经济效益;反之,则会导致采场的失稳破坏,影响采场安全生产。因此,开展充填开采下顶板-间柱支撑体系失稳破坏机制研究,对实现此类金属矿山的安全高效开采具有重要意义。

诸多国内外学者对此类金属矿山采场稳定性方面做了大量研究。谢学斌等^[3]研究了胶结充填体弹性系数和其不接顶高度对于采场稳定性的影响;徐文彬等^[4]采用 Voronoi 图法建立了不规则采场稳定性的评估方法;Verma 等^[5]运用经验公式法和数值模拟对高窄煤柱-顶板支撑体系进行了分析;王晓军等^[6]利用非线性回归与数值模拟结合的研究方法,建立了组合因素影响下阶段临界厚度的数学预测公式。由此可见,许多学者针对顶板-间柱支撑体系的稳定性问题做了大量的研究工作,但大部分仍停留在定性分析和理想弹性力学上。

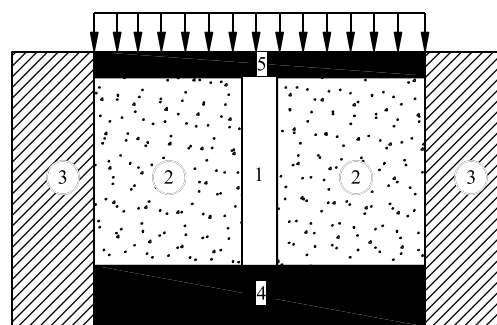
考虑到顶板-间柱支撑体系的失稳破坏是一个复杂的非线性问题,陈庆发^[7]、赵延林^[8]等尝试应用突变理论研究采场稳定性并取得了良好的应用效果。夏开宗等^[9]应用突变理论对石膏矿的护顶层-矿柱支撑体系进行了破坏分析,并在此基础上考虑了相对湿度对于采场稳定性的影响。任红岗等^[10]构建了充填开采下顶板-矿柱支撑体系的三维力学模型,综合运用突变和蠕变理论,从能量转化角度阐明采空区群失稳破坏机制。徐恒等^[11]在分析充填采矿的顶板结构形成及破坏机制的基础上,应用尖点突变理论分析采场失稳的力学机制。齐宽^[12]基于 FISH 语言对能量依据在 FLAC^{3D} 中进行了二次开发,采用强度折减与尖点突变相结合的方法对充填采矿支撑体系的安全系数进行了验算。徐晓冬等^[13]以能量演化特征为切入点,基于尖点突变理论构建了充填体失稳预警模型。

对于采用充填法开采的金属矿山,为了提高采

场的稳定性往往会对采空区进行及时充填。Zhu^[14]、Kostecki^[15]等发现充填体的侧压作用能够提高相邻间柱的强度,进而提高采场的稳定性。受此启发,本文建立了充填体作用下顶板-间柱支撑体系的力学简化模型。在此基础上,构建了考虑充填体侧压作用下顶板-间柱支撑体系的尖点突变模型。利用该模型探究了充填开采下顶板-间柱支撑体系的破坏机制,并将成果应用于我国东北某金属矿山。

2 力学模型

在采用充填采矿法的金属矿山中,需预留顶板用来承载上覆荷载。当矿体跨度较大时,通常会在采场中间部分留设间柱来减小采场跨度。在实际开采过程中,为了提高采场的稳定性会对采空区及时充填,在此情况下便形成如图 1 所示的充填开采下的顶板-间柱支撑体系。



1—间柱; 2—充填体; 3—围岩; 4—底板; 5—顶板

图 1 支撑体系示意图

Fig.1 Schematic diagram of support system

地下采场稳定性的分析是一个复杂的力学问题,在反映研究问题的力学本质的情况下,做出如下简化:采场在走向上的长度远大于其垂直走向方向的宽度,将复杂的三维力学问题转化为二维平面问题;考虑围岩对顶板有着良好的约束作用,将顶板简化为两端固定、抗弯强度为 EI 的弹性岩梁;将上覆荷载 q 简化为均布荷载;将间柱对顶板的作用可以看成集中力 F ;由于间柱的位移值远远大于采场底板的位移值,因此假设采场底板是刚性的。充填体的加入能够对间柱施加侧压力,进而改善间柱的应力状态,从而提高间柱的强度,使间柱在支撑体系中起主要承载作用。因此本文仅考虑处于充填体侧压作用下的间柱对于顶板的支撑作用,这与宋卫东等^[16]的试验模型相一致。综上所述,建立充填体作用下顶板-间柱支撑体系的力学模型如图 2 所示。

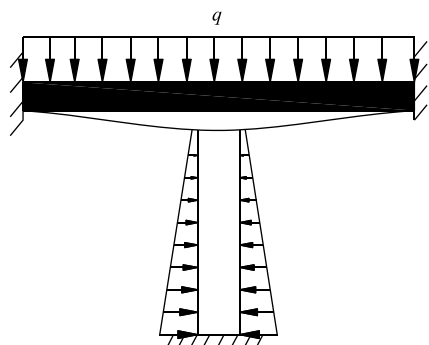


图2 支撑体系的力学简化模型

Fig.2 Simplified mechanical model of support system

3 充填体作用下间柱的应力-应变关系

依据损伤力学, Weibull 分布在描述间柱的应力-应变关系具有较强的适用性^[17], 其表达式如下:

$$\sigma = E_0 \varepsilon \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: σ 为间柱的应力; E_0 为间柱的初始弹性模量; ε 为间柱的压缩应变; ε_0 为间柱的平均应变; m 为 Weibull 分布的形态参数。

Donovan 等^[18]在考虑采空区的接触面粗糙程度和采空区的卸荷变形对充填体挤压的基础上, 提出充填体对间柱的侧压力 σ_h 的大小满足下式:

$$\sigma_h = \gamma h K_p + 2c \sqrt{K_p} + q_0 K_p \quad (2)$$

式中: γ 为充填体的重度; h 为充填体的高度; K_p 为土压力系数, 可依据表 1 进行修正; c 为充填体内聚力; q_0 为作用于充填体的荷载。

表1 土压力系数修正

Table 1 Earth pressure coefficient correction

充填体内摩擦角/(°)	25	30	35	40	45
土压力系数	4.29	6.42	10.2	17.3	33.5

间柱的破坏是一个整体性失稳问题。为简化分析, 将表 2 中的参数代入式 (1) 中可估算充填体对间柱侧压作用的等效侧压力约为 5 MPa。图 3 为取自依托工程现场并加工好的标准间柱试件。为获取间柱在充填体侧压作用下的应力-应变曲线, 采用图 4 所示的 INSTRON-1346 刚性电液伺服试验机以等效侧压力 (5 MPa) 为围压值对间柱试件进行三轴试验来模拟充填体的加入对间柱应力-应变关系的影响。图 5(a)和 5(b)所示为不同围压状态下间柱试件的应力-应变试验和拟合曲线, 其分别代表着

间柱处于未充填状态和充填状态下的力学特征。由图 5 可见: Weibull 分布能够较好地描述间柱试件处于非充填状态和充填状态下的应力-应变关系; 等效侧压力的加入改变了间柱的受力状态, 间柱试件的峰值强度、峰值应变的大小明显提高, 间柱试件的峰后曲线由脆性向延性过渡。许多学者通过进行现场监测^[19]以及模型试验^[20]也验证了上述现象, 这证明了采用施加等效侧压力来模拟充填体对间柱本构关系的影响具有一定的合理性。

表2 充填体的力学参数及采场高度

Table 2 Mechanical parameters of filling body and the height of stope

类别	密度/(kg · m ⁻³)	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	采场高度/m
充填体	1 970	0.24	31	—
采场参数	—	—	—	80



图3 间柱试样

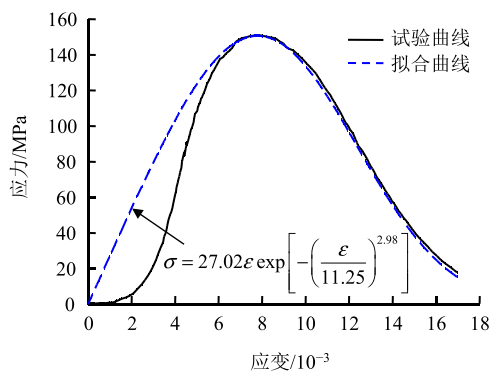
Fig.3 Rib pillar samples



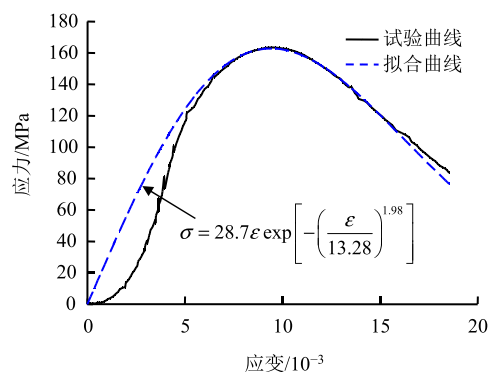
图4 刚性电液伺服试验机

Fig.4 Rigid electro-hydraulic servo testing machine

充填体加入后, 初始弹性模量 E_0 从 27.02 MPa 增加到 28.70 MPa; 平均应变 ε_0 从 11.25×10^{-3} 增加到 13.28×10^{-3} ; 形态参数 m 从 2.98 减小至 1.98。充



(a) 不施加等效围压, 未充填状态



(b) 施加等效围压, 充填状态

图 5 不同围压值下间柱试件的应力-应变试验和拟合曲线

Fig.5 Stress-strain test and fitting curves of rib-pillar specimens under different confining pressures

填前后初始弹性模量 E_0 基本保持不变, 充填体的侧压作用主要影响平均应变 ε_0 和形态参数 m , 因此可用下式来表示充填体作用下的间柱的本构关系:

$$\sigma = E_0 \varepsilon \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon}{k_1 \varepsilon_0} \right)^{k_2 m} \right] \quad (3)$$

式中: k_1 和 k_2 分别为充填体的加入对于间柱平均应变 ε_0 和形态参数 m 的作用系数。当间柱处于未充填状态时, k_1 和 k_2 均等于 1。充填体的侧压作用会导致 k_1 增大、 k_2 减小。

在顶板和隔离矿柱走向方向上取 1 个单位, 则间柱宽度为 B 、间柱高度为 H 柱充填状态下的荷载-变形关系为

$$F = \sigma A = \frac{E_0 B}{H} u \exp \left[- \left(\frac{u}{k_1 u_0} \right)^{k_2 m} \right] = \lambda u \exp \left[- \left(\frac{u}{k_1 u_0} \right)^{k_2 m} \right] \quad (4)$$

式中: A 为间柱横截面的面积; $\lambda = E_0 B/H$, 为间柱

的初始刚度; u 为充填状态下间柱的压缩位移; u_0 为充填状态下峰值荷载所对应的压缩位移。

4 岩梁的挠曲线方程

基于前述建立的力学简化模型, 可将顶板看成两端固定、中部受间柱支撑力 F 的弹性岩梁。考虑到充填体的刚度较低, 因此忽略充填体的加入对于顶板下沉的影响。设顶板在上覆荷载和间柱支撑力作用下, 间柱的压缩位移 u 和顶板在中点处的挠度相等 (见图 6)。采用结构力学中的位移法可求解出在上覆荷载和间柱支撑力共同作用下梁端的弯矩 M_{AB} (规定弯矩使梁横截面上侧受压为正) 和剪力 Q_{AB} 为^[21]

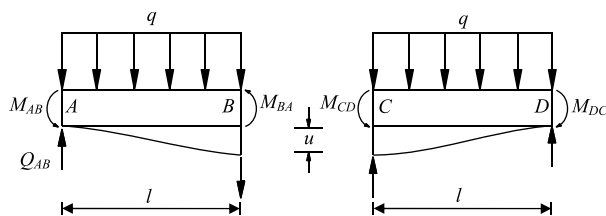


图 6 梁两端的弯矩和反力

Fig.6 Bending moment and reaction at the end of beam

$$\left. \begin{aligned} M_{AB} &= -\frac{ql^2}{12} - \frac{6EI}{l^2}u \\ Q_{AB} &= \frac{ql}{2} + \frac{12EI}{l^3}u \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: E 为岩梁的弹性模量; I 为岩梁的惯性矩; l 为采场跨度。

考虑到所研究的问题具有对称性, 因此可以选择一半进行分析。以点 A 为原点, 由式 (5) 可求解出 AB 段的弯矩 $M(x)$ 方程为

$$M(x) = M_{AB} + Q_{AB}x - \frac{qx^2}{2} = -\frac{qx^2}{2} + \left(\frac{ql}{2} + \frac{12EI}{l^3}u \right)x - \left(\frac{ql^2}{12} + \frac{6EI}{l^2}u \right) \quad (6)$$

将式 (6) 代入挠曲线微分方程, 可得

$$EIw'' = \frac{qx^2}{2} - \left(\frac{ql}{2} + \frac{12EI}{l^3}u \right)x + \left(\frac{ql^2}{12} + \frac{6EI}{l^2}u \right) \quad (7)$$

式中: w'' 为挠曲线微分方程的二阶导数; x 为与 A 的距离。

对式 (7) 进行积分运算, 即可得到 AB 段的挠曲线方程 w 为

$$w = \frac{qx^4}{24EI} - \left(\frac{ql}{2EI} + \frac{12u}{l^3} \right) \frac{x^3}{6} + \left(\frac{ql^2}{12EI} + \frac{6u}{l^2} \right) \frac{x^2}{2} \quad (8)$$

5 尖点突变模型及失稳分析

5.1 支撑体系的势能函数

支撑体系在上覆荷载的作用下, 顶板会发生挠曲变形进而产生弯曲变形能 U_s ; 间柱上端因受到顶板下沉的作用而产生压缩位移, 从而产生压缩变形能 U_p , 充填体对间柱的侧压作用会抑制间柱内的微裂隙产生及能量耗散, 进而影响压缩变量能的大小。顶板弯曲变形能 U_s 和压缩变形能 U_p 的能量来源于上覆荷载 q 所作的外力功 W 。基于能量原理, 支撑体系的总势能 Π 由顶板弯曲变形能 U_s 、间柱压缩变形能 U_p 以及外力功 W 三部分组成:

$$\Pi = U_s - W + U_p \quad (9)$$

顶板的弯曲变形能 U_s 为

$$\begin{aligned} U_s = EI \int_0^l [w''(x)]^2 dx = EI \int_0^l & \left[\frac{q^2 x^4}{4} - \left(\frac{q^2 l}{2} + \frac{12EIq}{l^3} u \right) x^3 + \right. \\ & \left. \left(\frac{q^2 l^2}{3} + \frac{18EIq}{l^2} u + \frac{144E^2 l^2}{l^6} u^2 \right) x^2 + \left(\frac{q^2 l^3}{12} + \frac{8EIq}{l^2} u + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{144E^2 l^2}{l^5} u^2 \right) x + \left(\frac{q^2 l^4}{144} + EIqu + \frac{36E^2 l^2}{l^4} u^2 \right) \right] dx = \\ & \frac{q^2 l^5}{720EI} + \frac{12EI}{l^3} u^2 \end{aligned} \quad (10)$$

支撑体系的外力功为

$$W = 2 \int_0^l q w(x) dx = q l u + \frac{q^2 l^5}{360EI} \quad (11)$$

间柱的压缩变形能为

$$U_p = \int_0^u F du = \int_0^u \lambda u \exp \left[- \left(\frac{u}{k_1 u_0} \right)^{k_2 m} \right] du \quad (12)$$

联立式 (9) ~ (12), 即可求出充填体作用下支撑体系的总势能为

$$\begin{aligned} \Pi = \frac{12EI}{l^3} u^2 + \int_0^u \lambda u \exp \left[- \left(\frac{u}{k_1 u_0} \right)^{k_2 m} \right] du - \\ q l u - \frac{q^2 l^5}{720EI} \end{aligned} \quad (13)$$

5.2 支撑体系的尖点突变模型

以压缩位移 u 为自变量对总势能 Π 求解一阶

导数, 令 $\Pi' = 0$, 可得平衡曲面方程为

$$\Pi' = \frac{24EI}{l^3} u + \lambda u \exp \left[- \left(\frac{u}{k_1 u_0} \right)^{k_2 m} \right] - q l = 0 \quad (14)$$

式 (14) 代表着充填体作用下的间柱-顶板支撑体系的平衡方程。依据平衡曲面的光滑性质, 尖点突变模型在尖点处需要满足 $\Pi''' = 0$, 即

$$\begin{aligned} \Pi''' = \frac{-\lambda k_2 m}{u_0} \exp \left[- \left(\frac{u}{k_1 u_0} \right)^{k_2 m} \right] \left(\frac{u}{k_1 u_0} \right)^{k_2 m - 1} \cdot \\ \left[1 - k_2 m \left(\frac{u}{k_1 u_0} \right)^{k_2 m} + k_2 m \right] = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

由式 (15) 可知, 在尖点处满足:

$$u = u_1 = k_1 u_0 \left(\frac{1 + k_2 m}{k_2 m} \right)^{\frac{1}{k_2 m}} \quad (16)$$

式中: u_1 为尖点处间柱的压缩位移量。

将平衡曲面方程式 (14) 在尖点处进行泰勒展开, 做变量代换, 可以得到以 X 为变量, a 、 b 为控制参数的尖点突变标准形式的平衡曲面方程:

$$\left. \begin{aligned} X^3 + aX + b &= 0 \\ a &= \frac{6}{k_1 (k_2 m + 1)^2} (\eta - 1) \\ b &= \frac{6}{k_1 k_2 m (k_2 m + 1)^2} (1 + k_2 m \eta - \xi) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} X &= \left(\frac{u - u_1}{u_1} \right) \\ \eta &= \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{24EI}{l^3 \lambda k_2 m \exp \left(- \frac{k_2 m + 1}{k_2 m} \right)} \\ \xi &= \frac{q l}{\lambda u_1 \exp \left(- \frac{k_2 m + 1}{k_2 m} \right)} \\ \eta_1 &= \frac{24EI}{l^3} \\ \eta_2 &= \lambda k_2 m \exp \left(- \frac{k_2 m + 1}{k_2 m} \right) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

图7所示为采用折叠翼的平衡曲面来描述的尖点突变模型。由图可见: 三维坐标分别为控制参数 (a , b) 和状态变量; 当控制参数 (a , b) 沿 BB' 方向连

续变化时, 状态变量 X 连续变化, 支撑体系不发生突变; 当控制参数 (a, b) 沿 AA' 方向连续变化时, 当靠近折叠翼边缘时, 状态变量 X 突然增大, 支撑体系发生失稳破坏。

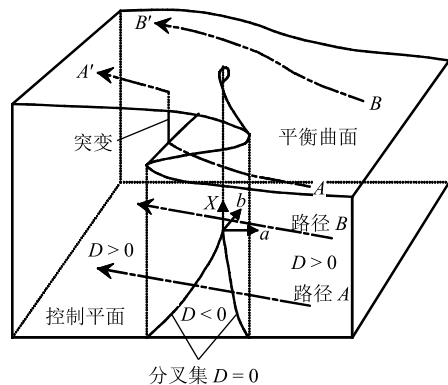


图 7 尖点突变模型的平衡面

Fig.7 Equilibrium surface of cusp-catastrophe model

以 X 为变量, 对标准形式的平衡曲面方程进行求导, 可得到支撑系统的临界状态方程为

$$3X^2 + a = 0 \quad (19)$$

联立式 (16)、(17) 可得到支撑体系的分叉集 D 的方程, 即平衡曲面的折痕在 $a-b$ 平面上的投影为

$$D = 4\beta^3 (\eta - 1)^3 + 27 \frac{\beta^2}{(k_2 m)^2} (1 + k_2 m \eta - \xi)^2 = 0 \quad (20)$$

其中:

$$\beta = \frac{6}{k_1 (k_2 m + 1)^2} \quad (21)$$

5.3 支撑体系失稳机制

依据图 7 可知, 只有当控制变量 $a < 0$ 时, 系统的平衡点才有可能跨越分叉集。依据式 (17) 可推出支撑失稳的必要条件为

$$\eta = \frac{24EI}{l^3 \lambda k_2 m \exp\left(-\frac{k_2 m + 1}{k_2 m}\right)} \leq 1 \quad (22)$$

由式 (22) 可知: 充填开采下的顶板-间柱支撑体系发生失稳破坏的必要条件由采场跨度 l 、顶板厚度 d 、顶板的弹性模量 E 、间柱的初始刚度 λ 、充填体作用系数 k_2 共同控制, 而与其他外部因素无关; 顶板的弹性模量 E 越大, 顶板厚度 d 越大, 采场跨度 l 越小, 间柱的初始刚度 λ 越小, 支撑体系的刚度比 η 就越大, 支撑体系越稳定; 采场及时充

填后, 充填体对间柱的侧压作用导致充填体作用系数 k_2 减小, 进而提高支撑体系的刚度比 η , 从而提高了支撑体系的稳定性。

当支撑体系满足 $D = 0$ 时, 式 (17) 存在 3 个实数根, 其中, 2 个稳定状态, 1 个失稳状态, 此时控制参数 (a, b) 跨越分叉集时一定会发生突变。因此, $D = 0$ 是支撑体系失稳的充分条件。当控制参数 (a, b) 跨越右支时 ($b > 0$), 但此时支撑体系的状态参数 X 没有突变。在采场支撑体系失稳时, 其变形表现为突然增大, 对应于控制参数 (a, b) 跨越分叉集右支的情况 ($b < 0$), 即

$$b = \frac{6}{k_1 k_2 m (k_2 m + 1)^2} (1 + k_2 m \eta - \xi) < 0 \quad (23)$$

综上所述, 支撑体系失稳的充要条件可以归纳为

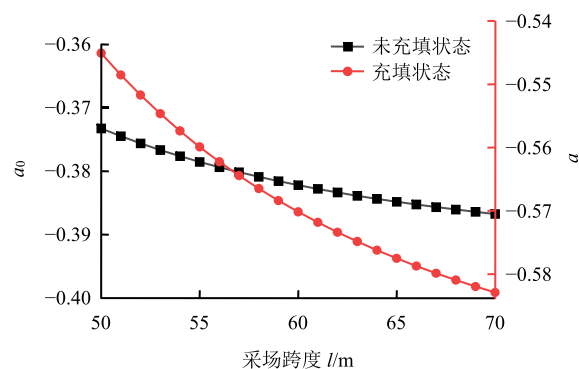
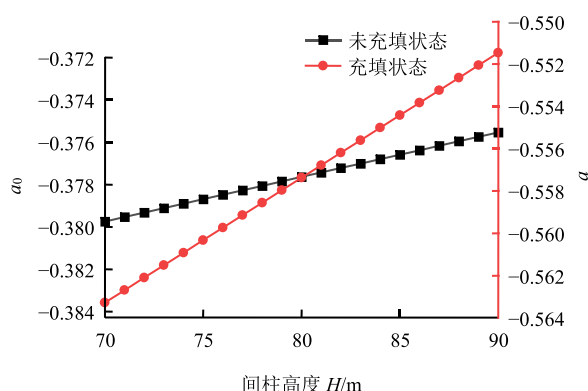
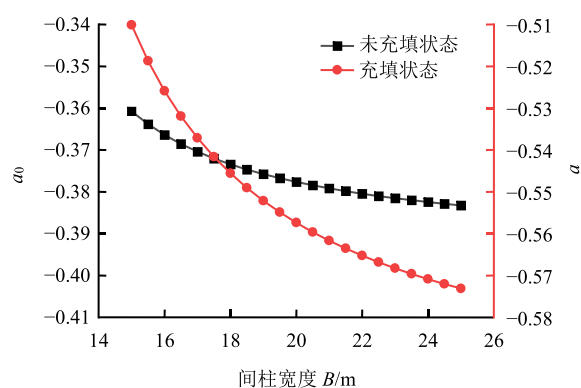
$$\left. \begin{aligned} D &= 4\beta^3 (\eta - 1)^3 + 27 \frac{\beta^2}{(k_2 m)^2} (1 + k_2 m \eta - \xi)^2 = 0 \\ b &= \frac{6}{k_1 k_2 m (K_2 m + 1)^2} (1 + k_2 m \eta - \xi) < 0 \\ \eta &\leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

由式 (24) 可知: 在岩体力学参数一定的情况下, 充填体作用下的间柱-顶板支撑体系的稳定性受采场结构参数、上覆荷载 q 以及充填体的作用系数 k_1 和 k_2 共同控制。其中, 采场结构参数包括采场跨度 l 、间柱高度 H 、间柱宽度 B 、顶板厚度 d 。

5.4 采场结构参数对采场稳定性的影响

对于特定的矿山其岩体的力学参数和外部荷载是确定的, 所以采场稳定性主要取决于采场的结构参数。参考依托工程的材料参数, 以采场跨度 l (50~70 m, 间距为 1 m)、间柱高度 H (70~90 m, 间距为 1 m)、间柱宽度 B (15~25 m, 间距为 0.5 m)、顶板厚度 d (8~12 m, 间距为 0.2 m) 为自变量, 分析控制参数处于未充填状态 (a_0, b_0) 和充填状态下 (a, b) 的大小变化情况。受限于篇幅限制, 仅展示采场参数对于 a_0, a 的影响。图 8 为以采场跨度 l 为自变量, a_0, a 为因变量的关系曲线; 图 9 为以间柱高度 H 为自变量, a_0, a 为因变量的关系曲线; 图 10 为以间柱宽度 B 为自变量, a_0, a 为因变量的关系曲线; 图 11 为以顶板厚度 d 为自变量, a_0, a 为因变量的关系曲线。

从图 8~11 可以看出, 充填体的加入会影响采场结构参数与控制参数之间的变化规律。为分析不同状态下采场结构参数对采场稳定性的影响, 参考

图8 采场跨度与 a_0 、 a 的关系Fig.8 Relationships between stope span and a_0 , a 图9 间柱高度与 a_0 、 a 的关系Fig.9 Relationships between rib pillar height and a_0 , a 图10 间柱宽度与 a_0 、 a 的关系Fig.10 Relationships between rib pillar width and a_0 , a

夏开宗等^[22]在边坡问题中所采用的方法, 分别对充填和充填状态下采场结构参数对于间柱-顶板支撑体系稳定性的影响进行了敏感性分析。图12和图13为敏感度分析结果, 由图12和图13可见: 非充填状态下, 采场跨度、顶板厚度、间柱高度、间柱宽度的敏感度系数分别为2.03、2.77、0.89、1.79; 充填状态下, 采场跨度、顶板厚度、间柱高度、间柱宽度的敏感度系数分别为3.84、5.34、1.68、4.19。

采用同种方法求解 b_0 、 b 的敏感性, 得出的结论具有一致性。

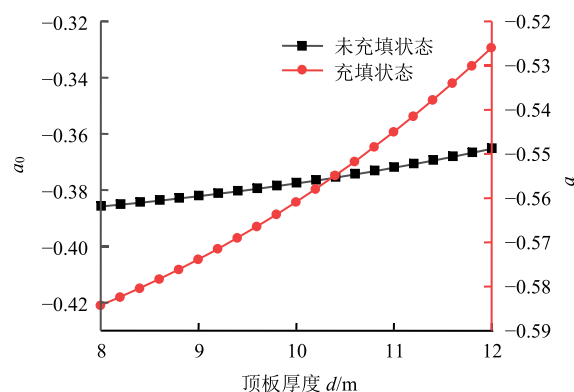
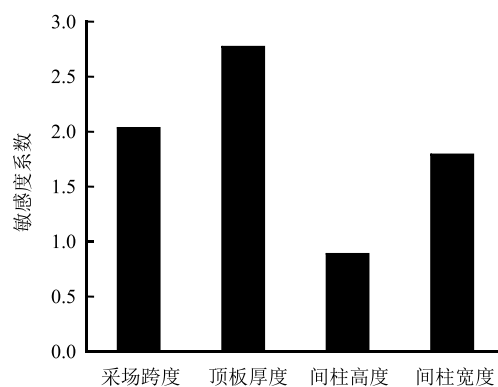
图11 顶板厚度与 a_0 、 a 的关系Fig.11 Relationships between roof thickness and a_0 , a 

图12 非充填状态敏感度系数柱状图

Fig.12 Histogram of sensitivity coefficient at the unfilled state

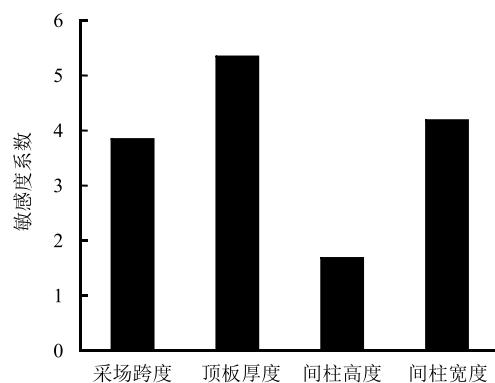


图13 充填状态敏感度系数柱状图

Fig.13 Histogram of sensitivity coefficient at the filled state

综上所述, 当顶板-间柱支撑体系处于未充填状态时, 采场参数中对于顶板-间柱支撑体系稳定性起主要控制作用的依次为顶板厚度、采场跨度、间柱宽度、间柱高度。徐晓鼎等^[23]研究采场结构参数对非充填采场稳定性的影响, 得出的结论与本研

究一致,验证了本研究具有一定的可靠性。当顶板-间柱支撑体系处于充填状态时,采场参数中对于顶板-间柱支撑体系稳定性起主要控制作用的依次为顶板厚度、间柱宽度、采场跨度、间柱高度。造成上述现象的主要原因是充填体的加入改变了间柱的受力状态,提高了间柱的承载能力,使间柱的宽度在控制采场稳定性方面起着更重要的作用。在充填采场结构参数优化过程中,可以参照上述分析结果进行优化。

6 工程应用

6.1 项目背景

依托工程位于我国东北某金属矿山,矿区地貌属丘陵山地地形,总体地势东高西低。矿区内地层主要为太古界鞍山群樱桃园变质岩组、下元古界辽河群浪子山变质岩组及新生界第四系冲坡积层。鞍山群樱桃园变质岩组为区内含矿地层,矿体赋存于绿泥石英片岩中。区内主要为断裂构造,大部分被

第四系覆盖,构造迹象不明显。矿区临界高新区,拟采用的采矿方法为充填采矿法,开采中段沿矿体走向设置盘曲,盘曲内划分两步回采矿块,一步采、二步采间隔布置,垂直矿体走向的相邻矿块间留设宽度为 20 m 的间柱,一步回采结束后立即进行胶结充填,随后再进行二步回采并用尾砂充填。采场的材料参数见表 3。当矿井开采至-860 m 中段时,为了支撑-780 m 中段以上的充填体以及部分垮落带岩石的自重,需在-780 m 中段预留一定厚度的顶板,此时采场形成了顶板-间柱支撑体系。若支撑体系发生大范围失稳破坏,将严重影响-860 m 水平的安全生产。

6.2 理论分析

为合理确定-860 m 中段开采时所需的顶板厚度 d ,以顶板厚度 d 为自变量(8~12 m,间距为 0.2 m),依据式(24)探究非充填状态下和充填状态下顶板厚度 d 对于支撑体系稳定性的影响,其结果见表 4。

表 3 采场的材料参数
Table 3 Material parameters of stope

E /GPa	E_0 /GPa	μ	采场跨度 l /m	间柱高度 H /m	间柱宽度 B /m	上覆岩层密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	充填体密度 $\rho_0/(kg \cdot m^{-3})$	开采深度 Z /m
24	27	0.21	60	80	20	2 700	1 970	860

表 4 顶板厚度与支撑体系稳定性的关系
Table 4 Relationships between roof thickness and stability of support system

顶板厚度 d/m	充填状态				非充填状态			
	刚度比 η	控制参数 b	D	状态	刚度比 η_0	控制参数 b_0	D_0	状态
8.0	0.040 3	-0.182 8	0.104 9	失稳	0.021 8	-0.102 4	0.056 8	失稳
8.2	0.043 4	-0.181 0	0.094 1	失稳	0.023 4	-0.101 8	0.054 3	失稳
8.4	0.046 7	-0.179 0	0.082 9	失稳	0.025 2	-0.101 1	0.051 8	失稳
8.6	0.050 1	-0.176 9	0.071 3	失稳	0.027 0	-0.100 3	0.049 1	失稳
8.8	0.053 7	-0.174 7	0.059 3	失稳	0.029 0	-0.099 6	0.046 4	失稳
9.0	0.057 4	-0.172 4	0.047 0	失稳	0.031 0	-0.098 8	0.043 5	失稳
9.2	0.061 3	-0.170 1	0.034 3	失稳	0.033 1	-0.098 0	0.040 5	失稳
9.4	0.065 4	-0.167 6	0.021 4	失稳	0.035 3	-0.097 1	0.037 5	失稳
9.6	0.069 7	-0.165 0	0.008 1	失稳	0.037 6	-0.096 2	0.034 3	失稳
9.8	0.074 1	-0.162 3	-0.005 5	稳定	0.040 0	-0.095 3	0.031 0	失稳
10.0	0.078 8	-0.159 4	-0.019 3	稳定	0.042 5	-0.094 3	0.027 7	失稳
10.2	0.083 6	-0.156 5	-0.033 3	稳定	0.045 1	-0.093 2	0.024 2	失稳
10.4	0.088 6	-0.153 5	-0.047 5	稳定	0.047 8	-0.092 2	0.020 7	失稳
10.6	0.093 8	-0.150 3	-0.061 8	稳定	0.050 6	-0.091 1	0.017 1	失稳
10.8	0.099 2	-0.147 0	-0.076 3	稳定	0.053 5	-0.089 9	0.013 4	失稳
11.0	0.104 8	-0.143 6	-0.090 9	稳定	0.056 6	-0.088 8	0.009 6	失稳
11.2	0.110 6	-0.140 0	-0.105 5	稳定	0.059 7	-0.087 5	0.005 8	失稳
11.4	0.116 7	-0.136 4	-0.120 0	稳定	0.063 0	-0.086 2	0.001 9	失稳
11.6	0.122 9	-0.132 6	-0.134 6	稳定	0.066 3	-0.084 9	-0.002 1	稳定
11.8	0.129 4	-0.128 6	-0.148 9	稳定	0.069 8	-0.083 5	-0.006 1	稳定
12.0	0.136 1	-0.124 5	-0.163 2	稳定	0.073 4	-0.082 1	-0.010 2	稳定

注: η_0 、 D_0 指未充填状态的控制参数和支撑体系的交叉集。

由表4可知：在其他参数一定的情况下，支撑体系的刚度比随着顶板厚度 d 的减小而减小，支撑体系更容易失稳；在非充填状态下，顶板厚度 d 从11.6 m减小至11.4 m时， D_0 的值从-0.002 1变成0.001 9，意味着控制参数(a_0 , b_0)跨越分叉集。此时，支撑体系满足式(24)中失稳的充要条件，支撑体系发生失稳破坏。同理，在充填状态下，顶板厚度 d 从9.8 m减小至9.6 m时，支撑发生失稳破坏。与非充填状态相比，充填体的加入能够显著减小顶板的临界失稳厚度(15.5%)，进而提高了回采率。考虑到依托工程拟采用充填采矿法且在实际生产过程中要求做到及时充填，因此可将支撑体系顶板的临界失稳厚度取值为9.8 m。

6.3 数值模拟验证

考虑到矿区地质条件和矿体赋存条件十分复杂，因此采用数值模拟软件FLAC^{3D}验证理论分析结果。依据矿区地质调查剖面图对岩性相近的岩体进行合并简化，化简后存在铁矿石、碳质千枚岩、绿泥千枚岩、绿泥石英片岩及片麻状花岗岩等6种岩体。根据现场地质调查及室内岩石力学试验，结合工程岩体分级初步确定岩体的力学强度指标（见表5）。

表5 岩体的物理力学参数

Table 5 Physical and mechanical parameters of rock mass

类别	密度 /(kg·m ⁻³)	变形模 量/GPa	泊松 比	内聚力 /MPa	摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa
断层 F1	2 020	0.50	0.38	0.07	22.00	0.09
片麻状花岗岩	2 800	18.00	0.23	1.70	44.00	1.44
碳质千枚岩	2 780	12.00	0.27	1.20	39.28	1.14
绿泥石英片岩	2 790	17.00	0.24	1.60	42.98	1.39
铁矿石	3 410	30.00	0.21	2.00	47.07	1.57
绿泥千枚岩	2 770	10.00	0.29	1.00	39.95	0.93
充填体	1 970	0.36	0.28	0.24	31.00	0.33

建立矿区的三维数值计算模型如图14所示。为了消除边界效应的影响，模型空间尺寸为3 400.0 m×2 071.2 m×420.0 m（长×宽×高），共划分920 012个单元。赋予模型摩尔-库仑本构，并仅考虑在自重应力场条件下采场的失稳破坏行为。为获取真实的-860 m中段开挖前采场的应力场和位移场，模拟步骤严格遵循实际开采顺序并立即回填，且每一步都计算至平衡状态。

采矿活动会引起围岩的变形和位移，采场失稳往往伴随着顶板的冒落现象，对于顶板-间柱支撑体系，间柱起着主要的支撑作用，间柱发生破坏意味着支撑体系发生结构性失稳。图15为间柱中心点

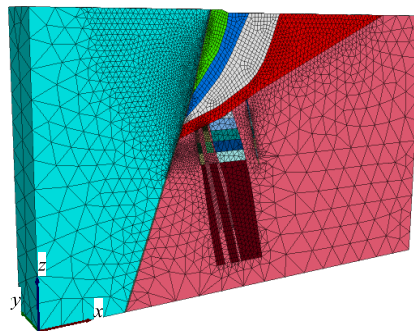


图14 三维数值计算模型

Fig.14 Three-dimensional numerical calculation model

位移 D_c 与顶板厚度 d 的关系。由图15可见：间柱中心点位移 D_c 随着采场顶板厚度 d 的减少而增加。当采场顶板厚度由12.5 m减小至9.0 m时，间柱中心点位移 D_c 缓慢增加；当采场顶板厚度 d 从9.0 m减小至8.5 m时，间柱中心点位移 D_c 急剧增加，增加量为7.09 cm，为 $d=9.0$ m时间柱中心点位移值的177.75%，此时间柱处于不稳定状态，顶板-间柱支撑体系发生结构性失稳。综上分析，当对采场进行及时充填后，采场顶板的临界失稳厚度为9.0 m，这与之前的理论分析的临界失稳厚度9.8 m吻合度较好，数值模拟结果验证了理论推导的正确性。

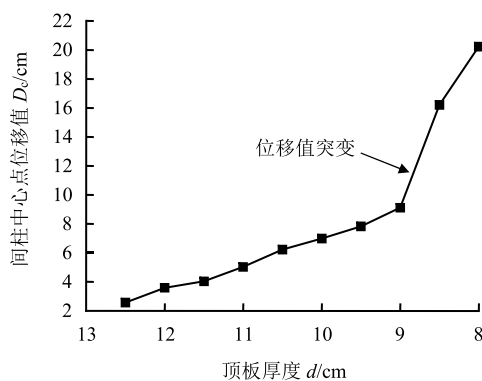


图15 D_c 与顶板厚度的关系

Fig.15 Relationship between roof thickness and D_c

7 结 论

本文针对充填开采下顶板-间柱支撑体系的破坏特征，采用Weibull分布来描述充填体作用下间柱的应力-应变关系曲线，在建立力学简化模型的基础上采用突变理论对支撑体系的破坏机制进行分析，并对影响支撑体系稳定性的采场结构参数进行了敏感度分析，进而得出如下结论：

(1) 在岩体力学参数一定的情况下，充填开采下的间柱-顶板支撑体系的稳定性受采场结构参数

(顶板厚度、采场跨度、间柱宽度、间柱高度)、上覆荷载以及充填体的侧压作用共同控制, 充填体的加入会降低支撑体系的刚度比, 进而提高采场的稳定性。

(2) 在对顶板-间柱支撑体系的稳定性进行调控时, 当采场处于未充填状态, 应按照顶板厚度、采场跨度、间柱宽度、间柱高度的顺序进行优化; 当采场处于充填状态, 应按照顶板厚度、间柱宽度、采场跨度、间柱高度的顺序进行优化。对于充填采场, 间柱宽度在控制采场稳定性方面起着更重要的作用。

(3) 将理论推导应用在依托工程上, 最终选取顶板的厚度为 9.8 m。利用数值模拟验证理论计算结果, 结果表明: 如果对采场进行及时充填, 顶板的临界失稳厚度为 9.0 m。数值模拟的结果与理论计算结果吻合度较好, 验证了理论推导的正确性。

参考文献

- [1] 李夕兵, 刘冰. 硬岩矿山充填开采现状评述与探索[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(4): 492-502.
LI Xi-bing, LIU Bing. Review and exploration on the current situation of filling mining in hard rock mines[J]. **Gold Science and Technology**, 2018, 26(4): 492-502.
- [2] 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 Wu-tuan, ZHANG Hai-lei, WANG Cheng-cai, et al. Analysis of safety technology factor of advanced mining in Lijiagou mine area[J]. **Metal Mine**, 2015(3): 169-172.
- [3] 谢学斌, 李建坤, 董宪久, 等. 胶结充填体-顶板系统稳定性研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4183-4190.
XIE Xue-bin, LI Jian-kun, DONG Xian-jiu, et al. Research on stability of cemented backfill-roof system[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(11): 4183-4190.
- [4] 徐文彬, 宋卫东, 曹帅, 等. 地下矿山采场群稳定性分析及其控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(4): 658-664.
XU Wen-bin, SONG Wei-dong, CAO Shuai, et al. Stopes stability in underground mine and its control technique[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2015, 32(4): 658-664.
- [5] VERMA C P, PORATHUR J L, THOTE N R, et al. Empirical approaches for design of web pillars in highwall mining: review and analysis[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2014, 32(2): 587-599.
- [6] 王晓军, 冯萧, 赵奎, 等. 多因素组合影响阶段矿柱上采顶板临界厚度研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3505-3512.
WANG Xiao-jun, FENG Xiao, ZHAO Kui, et al. Study of critical thickness of roof of level pillar stoping under multifactor influence[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(12): 3505-3512.
- [7] 陈庆发, 古德生, 周科平, 等. 对称协同开采人工矿柱失稳的突变理论分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(6): 2338-2342.
CHEN Qing-fa, GU De-sheng, ZHOU Ke-ping, et al. Analysis of catastrophe theory for artificial pillar instability in symmetric synergistic mining[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2012, 43(6): 2338-2342.
- [8] 赵延林, 吴启红, 王卫军, 等. 基于突变理论的采空区重叠顶板稳定性强度折减法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1424-1434.
ZHAO Yan-lin, WU Qi-hong, WANG Wei-jun, et al. Strength reduction method to study stability of goaf overlapping roof based on catastrophe theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(7): 1424-1434.
- [9] 夏开宗, 陈从新, 宋许根, 等. 相对湿度作用下的石膏矿顶板突变破坏机制分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 589-597.
XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, SONG Xu-gen, et al. Analysis of the mechanism of catastrophic failure of gypsum mine top under relative humidity[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 589-597.
- [10] 任红岗, 汪旭光, 谭卓英, 等. 采空区群蠕变突变三维力学模型构建及稳定性精确预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(12): 3114-3126.
REN Hong-gang, WANG Xu-guang, TAN Zhuo-ying, et al. Construction of three-dimensional mechanical model for creep and catastrophe of goaf group and accurate prediction of its stability[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2019, 50(12): 3114-3126.
- [11] 徐恒, 王贻明, 吴爱祥, 等. 基于尖点突变理论的充填

- 体下采空区安全顶板厚度计算模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 579-586.
- XU Heng, WANG Yi-ming, WU Ai-xiang, et al. A computational model of safe thickness of roof under filling body based on cusp catastrophe theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(3): 579-586.
- [12] 齐宽. 永平铜矿全尾砂胶结充填材料性能与采场围岩稳定性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- QI Kuan. Study on performance of cemented backfill materials with unclassified tailings and stability of stope surrounding rock in Yongping copper mine[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [13] 徐晓冬, 孙光华, 姚旭龙, 等. 基于能量耗散与释放的充填体失稳尖点突变预警模型[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 3003-3012.
- XU Xiao-dong, SUN Guang-hua, YAO Xu-long, et al. A cusp catastrophe warning model for instability of backfill based on energy dissipation and release[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(9): 3003-3012.
- [14] ZHU X J, GUO G L, FANG Q. Coupled discrete element-finite difference method for analyzing subsidence control in fully mechanized solid backfilling mining[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2016, 75(8): 1-12.
- [15] KOSTECKI T, SPEARING A J S. Influence of backfill on coal pillar strength and floor bearing capacity in weak floor conditions in the Illinois Basin[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2015, 76: 55-67.
- [16] 宋卫东, 任海锋, 曹帅. 侧限压缩条件下充填体与岩柱相互作用机理[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 49-55.
- SONG Wei-dong, REN Hai-feng, CAO Shuai. Interaction mechanism between backfill and rock pillar under confined compression condition[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2016, 45(1): 49-55.
- [17] 曹瑞琅, 贺少辉, 韦京, 等. 基于残余强度修正的岩石损伤软化统计本构模型研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1652-1667.
- CAO Rui-lang, HE Shao-hui, WEI Jing, et al. Study of modified statistical damage softening constitutive model for rock considering residual strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(6): 1652-1667.
- [18] DONOVAN J G, KARFAKIS M G. Design of backfilled thin-seam coal pillars using earth pressure theory[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2004, 22(4): 627-642.
- [19] TESARIK D R, SEYMOUR J B, YANSKE T R. Longterm stability of a backfilled room-and-pillar test section at the Buick mine, Missouri[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46: 1182-1196.
- [20] 谭玉叶, 余昕, 宋卫东, 等. 充填体与围岩组合承压作用机理试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5): 1071-1076.
- TAN Yu-ye, YU Xin, SONG Wei-dong, et al. Experimental study on combined pressure-bearing mechanism of filling body and surrounding rock[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2018, 35(5): 1071-1076.
- [21] 龙驭球, 包世华. 结构力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 277-284.
- LONG Yu-qiu, BAO Shi-hua. Structural mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 277-284.
- [22] 夏开宗, 陈从新, 鲁祖德, 等. 软硬岩互层边坡稳定性的敏感性因素分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(4): 729-733.
- XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, LU Zu-de, et al. Analysis of sensitivity factors to stability of inter-beddings of soft and hard rock slope[J]. **Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)**, 2013, 37(4): 729-733.
- [23] 徐晓鼎, 周跃进, 庞顺. 石膏矿老采空区塑性支撑系统的突变失稳分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2548-2555.
- XU Xiao-ding, ZHOU Yue-jin, PANG Shun. Analysis of catastrophic instability of plastic supporting system in old goaf of gypsum mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(11): 2548-2555.