



移动阅读

罗生虎,伍永平,解盘石,等.大倾角煤层走向长壁开采支架稳定性力学分析[J].煤炭学报,2019,44(9):2664-2672. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1248

LUO Shenghu, WU Yongping, XIE Panshi, et al. Mechanical analysis of support stability in longwall mining of steeply dipping seam[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2664-2672. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.1248

# 大倾角煤层走向长壁开采支架稳定性力学分析

罗生虎<sup>1,2</sup>, 伍永平<sup>2,3</sup>, 解盘石<sup>2,3</sup>, 王红伟<sup>2,3</sup>, 张浩<sup>2,3</sup>

(1. 西安科技大学 理学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:**大倾角煤层走向长壁工作面安全高效开采的关键是对围岩的有效控制,而围岩控制的难点在于“支架-围岩”系统的稳定性控制。在综合厘定与研究工作面“顶板-支架-底板”系统相互作用关系的基础上,采用理论分析方法,将底板假设为弹性地基,构建支架倾向力学模型,研究顶板载荷作用下支架的行为响应,并探讨采高、底板物理力学属性和架间作用等因素对支架稳定性的影响。结果显示,在大倾角煤层走向长壁开采中,工作面顶板在其自重及上覆岩层载荷作用下,沿着渐进于重力方向的曲线处于非连续运动状态中;受工作面顶板非连续运动影响,其对支架的作用载荷处于渐进累积过程,支架亦会随着顶板的运动而运动,且其运动幅度处于非连续渐进累积过程;支架稳定性随着顶板法向载荷的增大、顶板切向载荷的减小、顶板载荷偏载程度的减小、底板硬度的增大、采高的减小和支架侧护板千斤顶刚度的增大而增强;顶板法向载荷、底板地基系数、采高和支架侧护板千斤顶刚度仅能在一定程度上增大或减小支架的运动幅度,而顶板切向载荷和顶板载荷作用位置不仅能影响支架的运动幅度,亦会改变其运动方向,且较其它因素而言,其对支架稳定性影响较显著。严控工作面倾斜中上部区域顶板稳定并及时调整支架位态,以减小工作面顶板对支架的切向载荷和顶板载荷的偏载程度,是控制支架稳定的有效途径。

**关键词:**大倾角煤层; 支架; 稳定性; 长壁开采

中图分类号:TD823

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2019)09-2664-09

## Mechanical analysis of support stability in longwall mining of steeply dipping seam

LUO Shenghu<sup>1,2</sup>, WU Yongping<sup>2,3</sup>, XIE Panshi<sup>2,3</sup>, WANG Hongwei<sup>2,3</sup>, ZHANG Hao<sup>2,3</sup>

(1. College of Sciences, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The key of safe and high efficiency mining in the longwall mining of steeply dipping seam is the effective control of surrounding rock, and the difficult point in surrounding rock control lies in the stability control of “support-surrounding rock” system. Based on the comprehensive definition and research on the interaction relationship of “roof-support-floor” system in the working face, a mechanical model of support in inclined direction is established to model the behavior response of support under roof load. Besides the influence of mining height, the floor physical and me-

收稿日期:2018-09-18 修回日期:2019-02-21 责任编辑:常琛

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51634007);国家自然科学基金面上资助项目(51974227);陕西省教育厅专项科学研究发展计划资助项目(19JK0520)

作者简介:罗生虎(1983—),男,新疆哈密人,讲师,博士。Tel:029-85583136, E-mail:luoshh06@qq.com

通讯作者:伍永平(1962—),男,陕西汉中人,教授,博士。Tel:029-85583143, E-mail:wuyyp@xust.edu.cn

chanical properties and interaction between supports on the stability of supports are discussed. Results show that under the load of self weight and overlying strata, the roof of the working face is in a state of discontinuous motion in steeply dipping seam mining, and the motion direction is along the curve in the direction of gravity. As a result, the support will also move with the movement of the roof of working face, and the motion amplitude of support is in a discontinuous progressive accumulation process. The stability of the support increases with the increase of normal roof load, the decrease of the tangential roof load, the decrease of the partial roof loading degree, the increase of floor hardness, the decrease of the mining height and the increase of jack stiffness of side protecting plate of support. The normal load of roof, foundation coefficient of floor, the mining height and jack stiffness of side protecting plate of support can only increase or decrease the movement amplitude of the support to a certain extent. However, the tangential load of roof and the roof load location can not only affect the movement amplitude of the support, but also change the direction of its movement. Compared with other factors, it has a significant impact on the stability of the support. Therefore, there is an effective way to control the stability of the support by strictly controlling the stability of the roof in the middle and upper parts of the inclined working face and timely adjusting the position of the support, so as to reduce the tangential roof load and its eccentric degree.

**Key words:** steeply dipping seam; support; stability; longwall mining

大倾角煤层是指埋藏倾角为 $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 的煤层,是国内外采矿界公认的难采煤层,广泛分布于我国各大矿区,已探明储量为1 800亿~3 600亿t,产量约为1.5亿~3亿t,分别占全国煤炭储量和产量的10%~20%和5%~8%<sup>[1]</sup>。在大倾角煤层走向长壁开采中,支架的倾倒、下滑现象时有发生,对支架的稳定性控制是大倾角煤层安全、高效开采亟待解决的关键问题之一<sup>[2]</sup>。

在大倾角煤层开采中,受煤层倾角影响,围岩的变形、破坏和运移及所形成围岩结构的形态等均呈现出非对称特征<sup>[3-6]</sup>,支架在顶底板岩层、煤壁、矸石和相邻支架等因素影响下始终处于一个非均衡的复杂受力环境中,造成在大倾角煤层开采中对支架的稳定性控制异常复杂<sup>[2,7-8]</sup>。近年来,已有众多学者对大倾角煤层走向长壁开采中的围岩运移规律与支架受载特征<sup>[9-11]</sup>、架间推压及其累积效应<sup>[8,12-13]</sup>、“支架-围岩”系统耦合作用机理与失稳致灾机制<sup>[14-15]</sup>等方面展开了研究和探索,给出了支架稳定-失稳的判断准则和支架保持稳定临界工作阻力的计算方法,提出了液压支架防滑放倒的技术措施,并付诸实践,推动了大倾角煤层长壁开采支架稳定性控制理论与技术的不断进步。但已有关于支架稳定性控制的理论研究主要是在不考虑底板变形(将底板假设为刚体)的前提下,通过构建支架的稳定-失稳准则,确定支架临界倾倒、下滑状态下的工作阻力;而在实际工程中,受工作面顶板运动影响,即使支架的实际工作阻力远大于其临界失稳工作阻力,支架亦会随着工作面顶板的运动而运动<sup>[16]</sup>,造成架间作用明显,甚至诱发支架失稳,形成围岩灾变,而目前缺乏对该问题的深

入研究。

笔者在已有研究工作基础上,采用理论分析方法,在对工作面“支架-围岩”系统相互作用关系分析的基础上,将底板假设为弹性地基,构建支架沿倾向力学模型,系统研究顶板载荷作用下支架的行为响应,并探讨采高、底板物理力学性质和架间作用等因素对支架稳定性的影响,对解决大倾角煤层长壁开采中“支架-围岩”系统的动态稳定性控制具有一定的理论参考价值,且丰富了大倾角煤层开采理论体系。

## 1 “支架-围岩”相互作用关系

在大倾角煤层走向长壁开采中,工作面顶板是影响支架稳定-失稳的重要因素<sup>[2,8]</sup>。在煤层倾角影响下,顶板的变形、破断和运移不仅在工作面倾向具有明显的时序性和非对称性,在工作面走向亦呈现出异性<sup>[17]</sup>。沿工作面倾向自下而上,顶板垮落矸石与支架间距离逐渐增大,即支架与底板的接触线与顶板垮落矸石与底板的接触线之间形成夹角 $\beta$ (一般倾角煤层开采中二者平行),如图1所示,且随着煤层倾角和采高的增大,二者之间的夹角逐渐增大,采动矿山压力显现的不均衡性将更加明显。

在顶板垮落矸石非均匀充填效应影响下,工作面倾向下部区域采空区处于填实状态,顶板运移空间有限,“支架-围岩”系统较稳定;而工作面倾向中上部区域采空区充填不实或充填矸石离工作面较远,顶板运动的幅度和剧烈程度较大,顶板围岩结构稳定性差,工作面顶板与支架的接触方式及其对支架的施载特征复杂,支架偏载、空载和架间咬挤等现象明显,支架稳定性控制难度大,如图2所示。

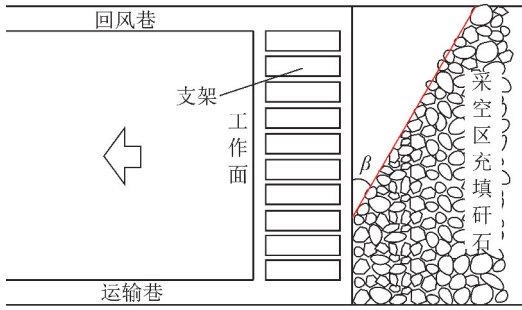


图 1 工作面与采空区充填特征

Fig. 1 Layout of working face and filling characteristics of goaf

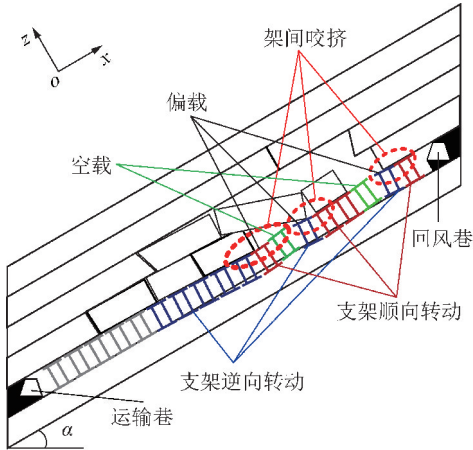


图 2 顶板与支架相互作用关系

Fig. 2 Interaction between roof and support

同时,工作面顶板在其自重及上覆岩层载荷作用下,始终处于“静止—运动—再静止—再运动……”的非连续运动状态中,其运动轨迹是一条渐进于重力方向的曲线<sup>[8,18]</sup>。当工作面顶板的运动状态发生改变时,其对支架作用载荷的大小、方向和作用点发生改变,支架随之产生行为响应。当支架位态发生改变时,其与底板的相互作用关系发生改变,底板对支架作用载荷的大小、方向和作用点亦随之改变,如图 3 所示。

可以看出,在大倾角煤层开采中,工作面“顶板—支架—底板”系统始终处于相互作用、相互制约的动态系统中,当顶板运动状态发生变化时,支架与顶底板间的相互作用关系随之改变。为此,这里将底板假设为弹性基地,建立如图 4 所示支架沿倾向力学模型,研究顶板载荷、采高和架间作用等因素对支架稳定性的影响。

图 4 中, $x$  轴沿工作面倾向向上, $z$  轴沿垂直煤层向上,支架逆向转动为正。 $a$  为支架宽度, $m$ ;  $b$  为支架高度, $m$ ;  $P_i$  为工作面顶板对支架的法向载荷,即支架工作阻力, $kN$ ;  $F_R$  为工作面顶板对支架的切向载荷,即支架与顶板间摩擦力,其取值介于  $-P_i\mu_1 \sim +P_i\mu_1$   $kN$ ;  $x_0$  为顶板载荷作用位置,其取值介于  $0 \sim$

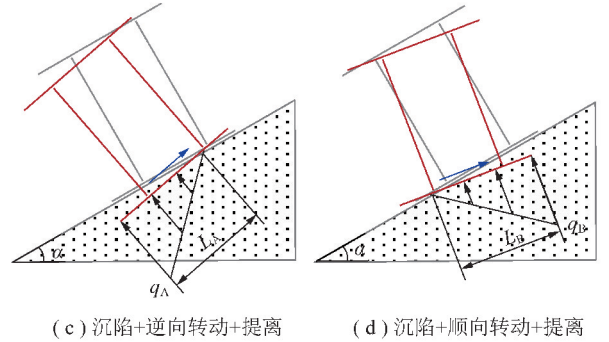
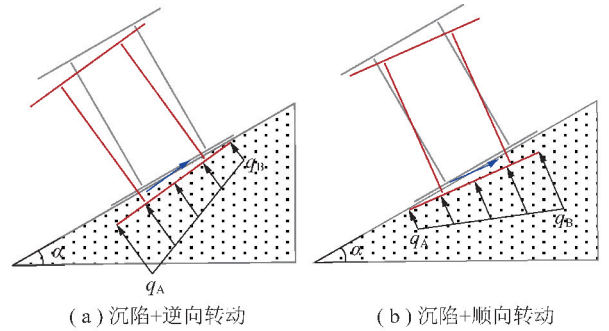


图 3 支架与底板相互作用关系

Fig. 3 Interaction between the support and floor

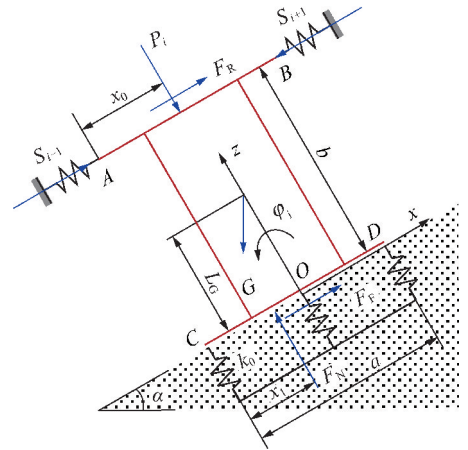


图 4 支架倾向力学模型

Fig. 4 Mechanical model of support in inclined direction

$a$   $m$ ;  $F_N$  为底板对支架的法向载荷,  $kN$ ;  $F_T$  为底板对支架的切向载荷, 即支架与底板间摩擦力, 其取值介于  $-(P_i + G\cos \alpha)\mu_2 \sim +(P_i + G\cos \alpha)\mu_2$   $kN$ ;  $x_1$  为底板载荷作用位置, 其取值介于  $0 \sim a$   $m$ ;  $S_{i-1}$  和  $S_{i+1}$  为相邻支架间作用载荷,  $kN$ ;  $\varphi_i$  为支架转角, ( $^\circ$ );  $G$  为支架重力,  $kN$ ;  $L_G$  为支架重心高度,  $m$ ;  $\mu_1$  和  $\mu_2$  为支架与顶底板间的摩擦因数。

## 2 支架稳定性力学分析

在大倾角煤层开采中,支架在倾向剖面内的基本运动形式为沉降、下滑和转动,支架以基本运动形式或基本运动形式的耦合形式进行位态调整,以适应外部载荷与约束的变化,直至进入新的平衡状态。



## 2.1 支架下滑力学分析

使支架产生下滑的力称为支架下滑力,力学模型如图4所示,支架下滑力 $F_H$ 可表示为

$$F_H = F_R + \Delta S - G \sin(\alpha - \varphi_i) \quad (1)$$

其中, $\Delta S_i = S_{i-1} - S_{i+1}$ 为相邻支架间作用力的合力,kN。当支架所受滑移力 $F_H$ 大于支架与底板间的最大静摩擦力 $F_{Fmax}$ 时,即

$$|F_H| > [P_i + G \cos(\alpha - \varphi_i)] \mu_2 \quad (2)$$

时,支架滑移。支架滑移过程中,沿滑移方向的合力逐渐趋向于0,直至达到新的平衡状态。在新平衡状态中,支架沿 $x$ 方向的平衡方程为

$$F_R + \Delta S - G \sin(\alpha - \varphi_i) + F_{Fmax} = 0 \quad (3)$$

## 2.2 支架转动、沉陷力学分析

当支架所受转动动力偶大于其抗转动动力偶时,支架转动;同时,当支架工作阻力增大时,支架亦进一步下沉。支架转动、沉陷过程中,支架沿 $z$ 方向合力及其合力偶逐渐趋向于0,直至达到新的静平衡状态。

(1) 转动+沉陷,支架无脱离。

当支架所受合力偶较小时,支架绕底座中点( $O$ 点)转动,且其底座倾斜上下边界无脱离。支架在该受载与约束状态下达到新平衡状态时,支架沿 $z$ 方向合力与合力偶为0,即

$$F_N - P_i - G \cos(\alpha - \varphi_i) = 0 \quad (4)$$

$$F_N \left( x_1 - \frac{a}{2} \right) - \Delta S_i b + L_C G \sin(\alpha - \varphi_i) -$$

$$F_R b + P \left( \frac{a}{2} - x_0 \right) = 0 \quad (5)$$

当支架无脱离转动时,底板对支架的法向载荷为梯形载荷,如图3(a)和3(b)所示,则支架在该新平衡状态下底板对其法向载荷的合力 $F_N$ 及其作用位置 $x_1$ 可表示为

$$F_N = \frac{q_C + q_D}{2} a \quad (6)$$

$$x_1 = \frac{a(q_C + 2q_D)}{3(q_C + q_D)} \quad (7)$$

式中, $q_C$ 和 $q_D$ 为常量,根据弹性地基理论<sup>[19]</sup>,可表示为

$$q_C = \left( -z_{i0} + \frac{a}{2} \sin \varphi_i \right) k_0 c \quad (8)$$

$$q_D = \left( -z_{i0} - \frac{a}{2} \sin \varphi_i \right) k_0 c \quad (9)$$

式中, $z_{i0}$ 为该新平衡状态下支架底座中点沿 $z$ 方向的位移,m; $c$ 为支架底座走向长度,m; $k_0$ 为底板地基系数,kN/m<sup>3</sup>。

在该新平衡状态下,支架与相邻支架间的作用

载荷 $S_{i-1}$ 和 $S_{i+1}$ 可表示为

$$S_{i-1} = \begin{cases} 0 & x_{i0} - \Delta x_{iA} \geq 0 \\ -K_S(x_{i0} - \Delta x_{iA}) & x_{i0} - \Delta x_{iA} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$S_{i+1} = \begin{cases} 0 & x_{i0} - \Delta x_{iB} \leq 0 \\ -K_S(x_{i0} - \Delta x_{iB}) & x_{i0} - \Delta x_{iB} > 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $K_S$ 为支架侧护板千斤顶刚度,kN/m; $x_{i0}$ 为该新平衡状态时支架底座中点沿 $x$ 方向的位移,m; $\Delta x_{iA}$ 和 $\Delta x_{iB}$ 为支架顶梁倾向上下边界由转动引起的位移,m。该新平衡状态下的 $\Delta x_{iA}$ 和 $\Delta x_{iB}$ 可表示为

$$\Delta x_{iA} = \Delta x_{iB} = 2l_1 \sin \left( \frac{\varphi_i}{2} \right) \cos \left( \frac{\varphi_i}{2} + \gamma_1 \right) \quad (12)$$

式中, $l_1$ 和 $\gamma_1$ 为常量,可表示为

$$l_1 = \sqrt{\frac{a^2}{4} + b^2} \quad (13)$$

$$\gamma_1 = \arctan \frac{a}{2b} \quad (14)$$

(2) 逆向转动+沉陷,支架底座倾向上侧脱离。

当支架所受合力偶较大、且沿逆时针方向时,支架绕其底座倾向下边界( $C$ 点)转动,支架底座倾向上边界( $D$ 点)脱离。支架在该受载与约束状态下达到新平衡状态时,支架沿 $z$ 方向合力与合力偶为0,即

$$F_N - P - G \cos(\alpha - \varphi_i) = 0 \quad (15)$$

$$F_N x_1 - \Delta S_i b + G \sin(\alpha - \varphi_i) L_C - G \cos(\alpha - \varphi_i) \frac{a}{2} - F_R b - P x_0 = 0 \quad (16)$$

当支架逆向转动且支架底座倾向上边界脱离时,底板对支架的法向载荷为三角形载荷,如图3(c)所示,则支架在该新平衡状态下底板对其法向载荷的合力 $F_N$ 及其作用位置 $x_1$ 可表示为

$$F_N = \frac{q_C l_C}{2} \quad (17)$$

$$x_1 = \frac{l_C}{3} \quad (18)$$

式中, $q_C$ 和 $l_C$ 为常量,根据弹性地基理论<sup>[19]</sup>,其可表示为

$$q_C = -z_{iC} k_0 c \quad (19)$$

$$l_C = -\frac{z_{iC}}{\sin \varphi_i} \quad (20)$$

式中, $z_{iC}$ 为该新平衡状态下支架底座倾向下边界沿 $z$ 方向的位移,m。

在该新平衡状态下,支架与相邻支架间的作用载荷 $S_{i-1}$ 和 $S_{i+1}$ 可表示为

$$S_{i-1} = \begin{cases} 0 & x_{iC} - \Delta x_{iA} \geq 0 \\ -K_S(x_{iC} - \Delta x_{iA}) & x_{iC} - \Delta x_{iA} < 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$S_{i+1} = \begin{cases} 0 & x_{iC} - \Delta x_{iB} \leq 0 \\ -K_S(x_{iC} - \Delta x_{iB}) & x_{iC} - \Delta x_{iB} > 0 \end{cases} \quad (22)$$

其中,  $x_{iC}$  为该新平衡状态下支架底座倾向下边界沿  $x$  方向的位移, m。在该新平衡状态下的  $\Delta x_{iA}$  和  $\Delta x_{iB}$  可表示为

$$\Delta x_{iA} = b \sin \varphi_i \quad (23)$$

$$\Delta x_{iB} = 2l_2 \sin\left(\frac{\varphi_i}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_i}{2} + \gamma_2\right) \quad (24)$$

式中,  $l_2$  和  $\gamma_2$  为常量, 可表示为

$$l_2 = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (25)$$

$$\gamma_2 = \arctan \frac{b}{a} \quad (26)$$

(3) 顺向转动+沉陷, 支架底座倾向下侧脱离。

当支架所受合力偶较大、且沿顺时针方向时, 支架绕其底座倾向上边界 ( $D$  点) 顺向转动, 支架底座倾向下边界 ( $C$  点) 脱离。支架在该受载与约束状态下达到新平衡状态时, 支架沿  $z$  方向合力与合力偶为 0, 即

$$F_N - P_i - G \cos(\alpha - \varphi_i) = 0 \quad (27)$$

$$-F_N(a - x_1) - \Delta S_i b + G \sin(\alpha - \varphi_i) L_C -$$

$$G \cos(\alpha - \varphi_i) \frac{a}{2} - F_R b - P(a - x_0) = 0 \quad (28)$$

当支架顺向转动且支架底座倾向下边界脱离时, 底板对支架的法向载荷亦为三角形载荷, 如图 3(d) 所示, 则支架在该新平衡状态下底板对其法向载荷的合力  $F_N$  及其作用位置  $x_1$  可表示为

$$F_N = \frac{q_D l_D}{2} \quad (29)$$

$$x_1 = a - \frac{l_D}{3} \quad (30)$$

式中,  $q_D$  和  $l_D$  为常量, 根据弹性地基理论<sup>[19]</sup>, 其可表示为

$$q_D = -z_{iD} k_0 c \quad (31)$$

$$l_D = \frac{z_{iD}}{\sin \varphi_i} \quad (32)$$

式中,  $z_{iD}$  为该新平衡状态下支架底座倾向上边界沿  $z$  方向的位移, m。

在该新平衡状态下, 支架与相邻支架间的作用载荷  $S_{i-1}$  和  $S_{i+1}$  可表示为

$$S_{i-1} = \begin{cases} 0 & x_{iD} + \Delta x_{iA} \geq 0 \\ -K_S(x_{iD} + \Delta x_{iA}) & x_{iD} + \Delta x_{iA} < 0 \end{cases} \quad (33)$$

$$S_{i+1} = \begin{cases} 0 & x_{iD} + \Delta x_{iB} \leq 0 \\ -K_S(x_{iD} + \Delta x_{iB}) & x_{iD} + \Delta x_{iB} > 0 \end{cases} \quad (34)$$

其中,  $x_{iD}$  为该新平衡状态下支架底座倾向上边界沿

$x$  方向的位移, m。在该新平衡状态下的  $\Delta x_{iA}$  和  $\Delta x_{iB}$  可表示为

$$\Delta x_{iA} = -2l_2 \sin\left(\frac{\varphi_i}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_i}{2} + \gamma_2\right) \quad (35)$$

$$\Delta x_{iB} = -b \sin \varphi_i \quad (36)$$

当支架位态调整后达到新平衡状态时, 根据式(3)~(5), 或(3), (15), (16), 或(3), (27), (28) 组成的非线性代数方程组, 可由蒙特卡洛方法数值求解得出支架在任意载荷与约束作用下的下滑量、下沉量和转角, 并可进一步得出架间作用力和支架下滑力等。

### 3 算例与分析

在以下算例分析中, 以长山子煤矿 1121 综放工作面为工程背景, 分析顶板法向载荷  $P_i$ 、顶板切向载荷  $F_R$ 、顶板载荷作用位置  $x_0$ 、底板地基系数  $k_0$ 、采高  $b$  和支架侧护板千斤顶刚度  $K_S$  对支架稳定性的影响。模型中所需参数的取值根据 1121 工作面的具体工况<sup>[20]</sup>和已有研究结果<sup>[1,19]</sup>选取, 其基本参数取值为:  $G = 175$  kN,  $L_C = b/2$  m,  $a = 1.6$  m,  $c = 3.0$  m,  $\mu_1 = \mu_2 = 0.3$ 。

#### 3.1 顶板法向载荷对支架稳定性影响

取  $F_R = -5\ 000\mu_1$  kN,  $x_0 = a/2$  m,  $k_0 = 50\ 000$  kN/m<sup>3</sup>,  $b = 2.6$  m,  $K_S = 1\ 000$  kN/m, 分析顶板法向载荷  $P_i$  对支架稳定性影响, 如图 5 所示。由图 5 可以看出:

(1) 支架转角  $\varphi_i$  与架间作用力  $\Delta S$  的大小均随着顶板法向载荷  $P_i$  的增大而减小, 且其减小的速率逐渐减小, 并趋向于 0。由文中关于架间作用力  $\Delta S$  的定义式可知, 当支架侧护板千斤顶刚度  $K_S$  保持不变时, 架间作用力  $\Delta S$  的大小与支架的转动幅度成正比, 二者随其它因素变化的规律一致。

(2) 支架下滑力  $F_H$  随着顶板法向载荷的增大而增大, 但其增大的速率亦逐渐减小。由文中关于支架下滑力  $F_H$  的定义式可知, 当顶板切向载荷  $F_R$  保持不变时, 支架下滑力  $F_H$  与架间作用力  $\Delta S$  负相关, 支架下滑力  $F_H$  随着架间作用力  $\Delta S$  的增大而减小, 反之亦然。

(3) 支架底座倾向下边界位移  $z_{iC}$  的大小随着顶板法向载荷的增大呈先减小后增大的趋势。这是因为当顶板法向载荷  $P_i$  增大时, 支架整体下沉, 支架底座倾向下边界位移量有增大趋势; 但由于支架转角  $\varphi_i$  减小, 相当于支架在原有位态上发生顺向转动, 受此影响, 支架底座倾向下边界位移量亦有减小趋势; 当顶板法向载荷  $P_i$  增大过程中, 支架底座倾向下边

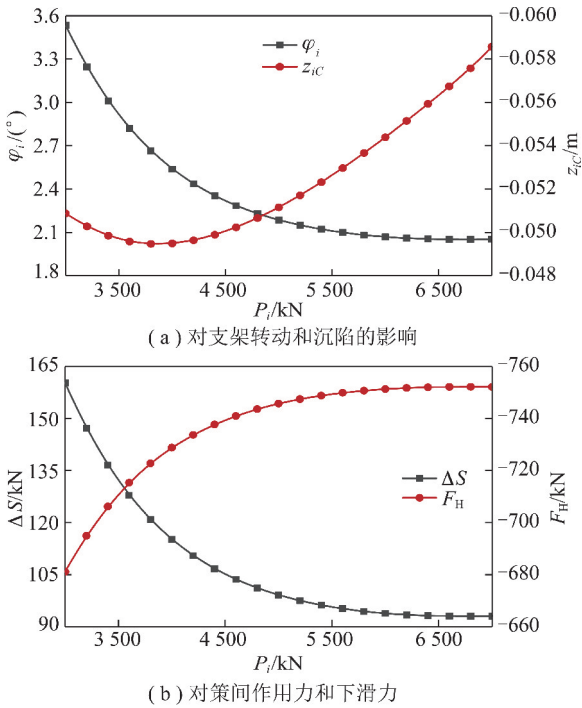


图5 顶板法向载荷对支架稳定性的影响

Fig. 5 Influence of normal load of roof on of support stability

界由转动引起位移的减小量大于由支架整体下沉引起位移的增大量时,支架底座倾向下边界位移量随着顶板法向载荷的增大而减小,反之则增大。由于支架转角  $\varphi_i$  减小的速率在逐渐减小,即由转动引起位移的减小量在逐渐减小,因此支架底座倾向下边界位移  $z_{ic}$  的大小随着顶板法向载荷  $P_i$  的增大呈先减小后增大的趋势。

(4)在顶板法向载荷  $P_i$  增大过程中,受顶板切向载荷  $F_R$  取值影响,支架保持逆向转动,且其运动模式由沉陷+逆向转动+倾向上侧提离演化为沉陷+逆向转动+无提离,支架的转动幅度逐渐减小,支架稳定性逐渐增强。

### 3.2 顶板切向载荷对支架稳定性影响

取  $P_i = 5\ 000\ \text{kN}$ ,  $x_0 = a/2\ \text{m}$ ,  $k_0 = 50\ 000\ \text{kN/m}^3$ ,  $b = 2.6\ \text{m}$ ,  $K_S = 1\ 000\ \text{kN/m}$ ,分析顶板倾向载荷  $F_R$  对支架稳定性影响,如图6所示。由图6可以看出:

(1)顶板切向载荷  $F_R$  对支架稳定性影响显著,在顶板切向载荷  $F_R$  增大过程中,支架转角  $\varphi_i$ 、支架底座倾向下边界位移  $z_{ic}$ 、架间作用力  $\Delta S$  和下滑力  $F_H$  的方向均发生改变,且其大小亦均随着顶板切向载荷  $F_R$  绝对值的增大而增大。

(2)当顶板切向载荷  $F_R$  由  $-P_i\mu_1$  演变到  $+P_i\mu_1\ \text{kN}$  时,支架的转动方向发生改变,且其转动方向和转动幅度与顶板切向载荷  $F_R$  密切相关,支架的运动模式由沉陷+逆向转动+倾向上侧提离→沉陷+转动+无提离→沉陷+顺向转动+倾向下侧提离,

支架失稳的可能性随着顶板切向载荷  $F_R$  绝对值的增大而增大。

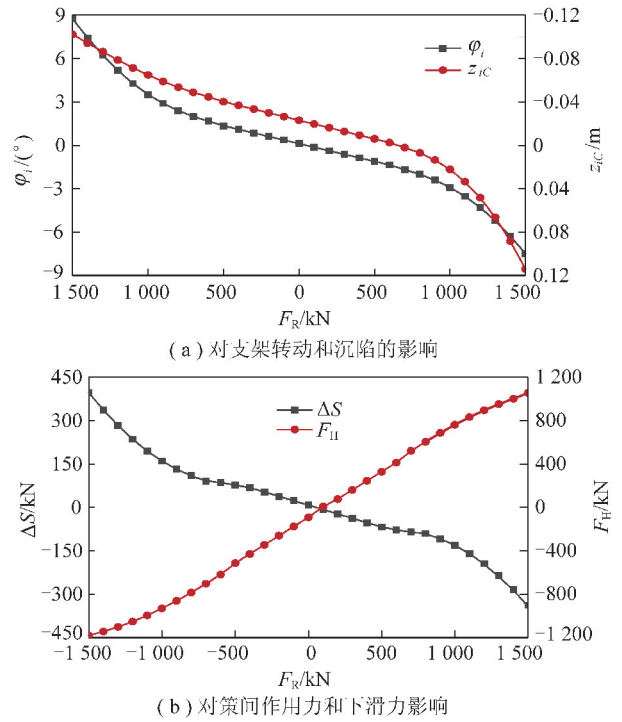


图6 顶板切向载荷对支架稳定性影响

Fig. 6 Influence of tangential load of roof on support stability

### 3.3 顶板载荷作用位置对支架稳定性影响

取  $P_i = 5\ 000\ \text{kN}$ ,  $F_R = -5\ 000\ \mu_1\ \text{kN}$ ,  $k_0 = 50\ 000\ \text{kN/m}^3$ ,  $b = 2.6\ \text{m}$ ,  $K_S = 1\ 000\ \text{kN/m}$ ,分析顶板载荷作用位置  $x_0$  对支架稳定性影响,如图7所示。由图7可以看出:

(1)随着顶板载荷作用位置  $x_0$  的增大,支架转角  $\varphi_i$ 、支架底座倾向下边界位移  $z_{ic}$  和架间作用力  $\Delta S$  的方向亦均发生改变,且其大小随着顶板载荷作用位置  $x_0$  的增大呈先减小后增大的趋势。这是因为,受顶板切向载荷  $F_R$  取值影响,其所形成力偶的方向沿逆时针方向,而支架法向载荷  $P_i$  所形成力偶的方向沿顺时针方向;当顶板载荷作用位置  $x_0$  较小时,支架法向载荷所形成力偶较小,顶板切向载荷  $F_R$  所形成力偶占控制地位,支架逆向转动,支架底座倾向下边界沉陷、上边界提离;随着顶板载荷作用位置  $x_0$  的增大,支架法向载荷  $P_i$  所形成力偶逐渐增大,支架转动幅度逐渐减小,并由逆向转动演化为顺向转动。

(2)支架下滑力  $F_H$  的方向保持不变,且其大小随着顶板载荷作用位置  $x_0$  的增大而增大。这是因为,在顶板载荷作用位置  $x_0$  增大过程中,支架转动幅度逐渐减小,由逆向转动演化为顺向转动,架间作用力  $\Delta S$  亦逐渐减小,并由正值演化为负值;同时,当顶板切向载荷保持不变时,下滑力  $F_H$  随着架间作用力

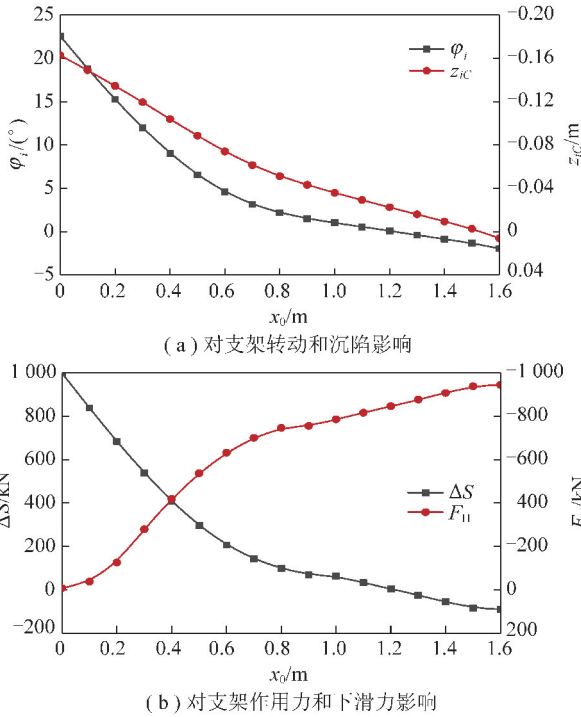


图 7 顶板载荷作用位置对支架稳定性的影响

Fig. 7 Influence of roof load location on support stability

$\Delta S$  的减小而增大,因此支架下滑力  $F_H$  随着顶板载荷作用位置  $x_0$  的增大而增大。

(3)随着顶板载荷作用位置  $x_0$  由 0 增大到  $a$  时,支架的转动方向发生改变,且其转动方向和转动幅度亦与顶板载荷作用位置  $x_0$  密切相关,支架的运动模式亦由沉陷+逆向转动+倾向上侧提离→沉陷+转动+无提离→沉陷+顺向转动+倾向下侧提离,支架失稳的可能性亦随着顶板载荷偏载程度的增大而增大。

3.4 底板物理力学性质对支架稳定性影响

取  $P_i = 5\ 000\ \text{kN}$ ,  $F_R = -5\ 000\mu_1\ \text{kN}$ ,  $x_0 = a/2\ \text{m}$ ,  $b = 2.6\ \text{m}$ ,  $K_S = 1\ 000\ \text{kN/m}$ ,分析底板地基系数  $k_0$  对支架稳定性影响,如图 8 所示。由图 8 可以看出:

(1)随着底板地基系数  $k_0$  的增大,支架的转动幅度及支架底座倾向下边界位移  $z_{ic}$  和架间作用力  $\Delta S$  的大小均逐渐减小,而支架下滑力  $F_H$  的大小逐渐增大,且其增大或减小的速率逐渐减小。

(2)在底板地基系数  $k_0$  增大过程中,支架始终保持为沉陷+逆向转动+倾向上侧提离的运动模式,支架的转动方向保持不变,转动幅度和架间作用力减小,支架稳定性增强。

3.5 采高对支架稳定性影响

取  $P_i = 5\ 000\ \text{kN}$ ,  $F_R = -5\ 000\mu_1\ \text{kN}$ ,  $x_0 = a/2\ \text{m}$ ,  $k_0 = 50\ 000\ \text{kN/m}^3$ ,  $K_S = 1\ 000\ \text{kN/m}$ ,分析采高  $b$  对支架稳定性影响,如图 9 所示。由图 9 可以看出:

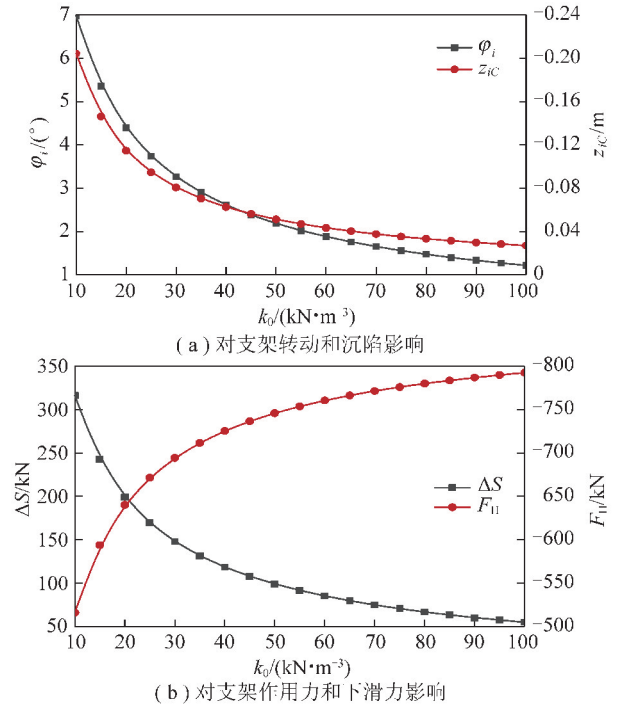


图 8 底板地基系数对支架稳定性的影响

Fig. 8 Influence of foundation coefficient of support stability

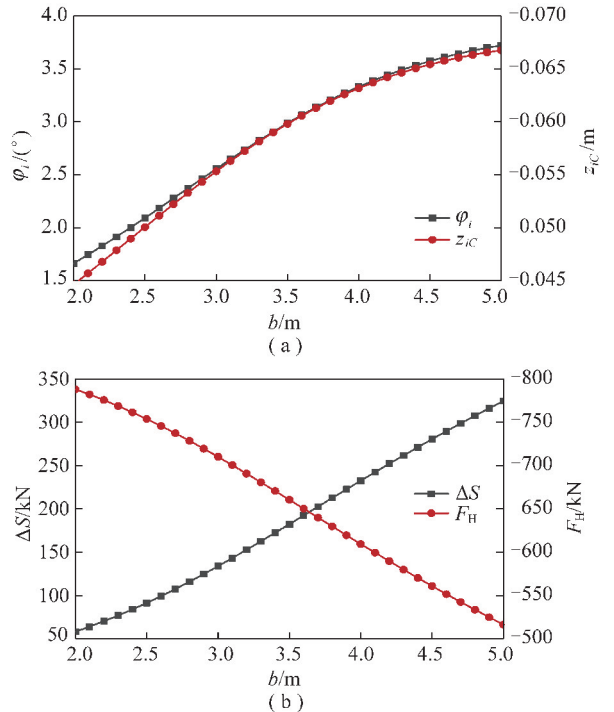


图 9 采高对支架稳定性的影响

Fig. 9 Influence of mining height on support stability

(1)随着采高  $b$  的增大,支架的转动幅度及支架底座倾向下边界位移  $z_{ic}$  和架间作用力  $\Delta S$  的大小均逐渐增大,而支架下滑力  $F_H$  的大小逐渐减小,且支架位移量和下沉量增大的速率逐渐减小。

(2)在采高  $b$  增大过程中,支架亦始终保持为沉陷+逆向转动+倾向上侧提离的运动模式,支架转动



方向保持不变,但由于转动幅度和架间作用力增大,支架倾倒失稳概率增大,架间作用将更加显著。

### 3.6 支架侧护板千斤顶刚度对支架稳定性影响

取  $P_i = 5\,000\text{ kN}$ ,  $F_R = -5\,000\mu_1\text{ kN}$ ,  $x_0 = a/2\text{ m}$ ,  $k_0 = 50\,000\text{ kN/m}^3$ ,  $b = 2.6\text{ m}$ , 分析侧护板千斤顶刚度  $K_S$  对支架稳定性影响,如图10所示。由图10可以看出:

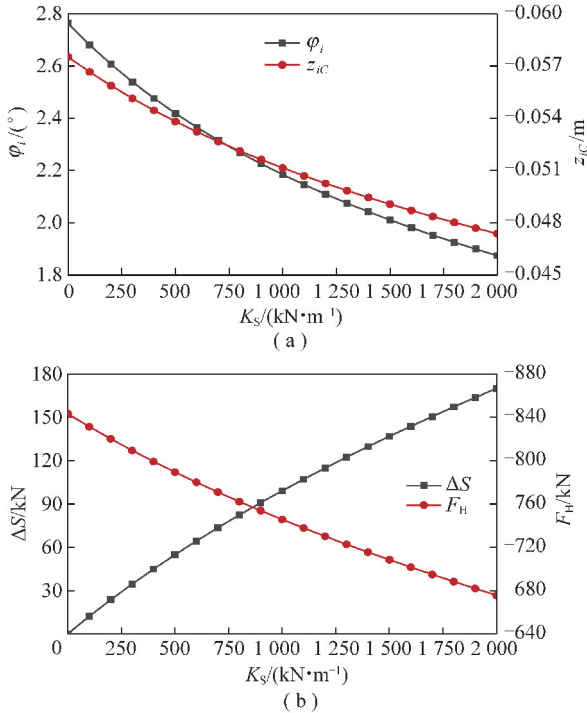


图10 侧护板千斤顶刚度对支架稳定性的影响

Fig. 10 Influence of jack stiffness of side protecting plate on rotation and subsidence of support

(1)随着支架侧护板千斤顶刚度  $K_S$  的增大,支架的转动幅度及支架底座倾向下边界位移  $z_{ic}$  和支架下滑力  $F_H$  的大小均逐渐减小,而架间作用力  $\Delta S$  的大小逐渐增大,且其增大或减小的速率逐渐减小。

(2)在支架侧护板千斤顶刚度  $K_S$  增大过程中,支架亦始终保持为沉陷+逆向转动+倾向上侧脱离的运动模式,支架转动方向保持不变,转动幅度逐渐减小,但架间作用力增大,支架倾倒失稳概率减小,架间推压、咬挤现象将更加显著。

综合上述分析可以看出:在大倾角煤层长壁开采中,受工作面顶板非连续运动影响,其对支架的作用载荷处于渐进累积过程;在顶板载荷作用下,支架的转动和沉陷必然发生,且其转动和沉陷的幅度亦处于渐进累积过程,架间作用力和支架下滑力逐渐增大。结合大倾角煤层长壁开采围岩运移规律可以得出,在大倾角煤层长壁开采中,应对工作面进行全时矿压监测,重点针对工作面倾向中上部区域采空区充填不实

或充填矸石离工作面较远、顶板运动幅度大、顶板结构稳定性差、支架受载与行为多变等特点,加强预警,一旦出现支架载荷骤变及支架位态不良等情况时,应立即采取措施加护工作面顶底板岩层,并及时调整支架位态。

## 4 结 论

(1)在大倾角煤层走向长壁开采中,工作面顶板在其自重及上覆岩层载荷作用下,沿着渐进于重力方向的曲线处于非连续运动状态中;受此影响,支架亦会随着工作面顶板的运动而运动,且其不会随着顶板法向载荷增大、采高的减小或支架顶梁侧护千斤顶刚度的增大等而消失。

(2)支架的转动幅度随着顶板法向载荷的减小、顶板切向载荷绝对值的增大、顶板载荷偏载程度的增大、底板地基系数的减小、采高的增大和支架侧护板千斤顶刚度的减小而增大。

(3)支架下沉量随着顶板法向载荷的增大、顶板切向载荷绝对值的增大、顶板载荷偏载程度的增大、底板地基系数的减小、采高的增大和支架侧护板千斤顶刚度的减小而增大。

(4)架间作用力随着顶板法向载荷的减小、顶板切向载荷绝对值的增大、顶板载荷偏载程度的增大、底板地基系数的减小、采高的增大和支架侧护板千斤顶刚度的增大而增大。

(5)支架下滑力随着顶板法向载荷的增大、顶板切向载荷绝对值的增大、顶板载荷作用位置的增大、底板地基系数的增大、采高的减小和支架侧护板千斤顶刚度  $K_S$  的减小而增大。

(6)较其它影响因素而言,顶板切向载荷和顶板载荷作用位置对支架稳定性的影响更加显著。因此,严控工作面倾斜中上部区域顶板稳定并及时调整支架位态,以减小工作面顶板对支架的切向载荷和顶板载荷的偏载程度,是控制支架稳定的有效途径。

## 参考文献 (References):

- [1] 伍永平, 负东风, 解盘石, 等. 大倾角煤层长壁综采理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [2] 伍永平, 刘孔智, 负东风, 等. 大倾角煤层安全高效开采技术研究进展 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1611-1618.  
WU Yongping, LIU Kongzhi, YUN Dongfeng, et al. Research progress on the safe and efficient mining technology of steeply dipping seam [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1611-1618.
- [3] 赵洪亮, 袁永, 张琳. 大倾角松软煤层综放面矿压规律及控制 [J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(3): 345-348.  
ZHAO Hongliang, YUAN Yong, ZHANG Lin. Strata behavior in fully mechanized top coal caving face of steep soft coal seams and



- its control [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(3):345-348.
- [4] 王金安,张基伟,高小明,等.大倾角厚煤层长壁综放开采基本顶破断模式及演化过程(I)—初次破断[J].煤炭学报,2015,40(6):1353-1360.  
WANG Jin'an, ZHANG Jiwei, GAO Xiaoming, et al. Fracture mode and evolution of main roof stratum above longwall fully mechanized top coal caving in steeply inclined thick coal seam (I)-initial fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6):1353-1360.
- [5] 罗生虎,伍永平,刘孔智,等.大倾角煤层长壁开采空间应力拱壳形态研究[J].煤炭学报,2016,41(12):2993-2998.  
LUO Shenghu, WU Yongping, LIU Kongzhi, et al. Study on the shape of the space stress arch shell in steeply dipping coal seam mining [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12):2993-2998.
- [6] LUO Yi. An improved influence function method for predicting subsidence caused by longwall mining operations in inclined coal seams [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(3):163-169.
- [7] 伍永平, 俞东风. 大倾角综采支架稳定性控制[J]. 采矿与安全工程学报, 1999, 16(3):82-85.  
WU Yongping, YUAN Dongfeng. Stability control of fully mechanized support in deeply inclined coal seam [J]. Ground Pressure and Strata Control, 1999, 16(3):82-85.
- [8] 王家臣,魏伟杰,张锦旺,等.急倾斜厚煤层走向长壁综放开采支架稳定性分析[J].煤炭学报,2017,42(11):2783-2791.  
WANG Jiachen, WEI Weijie, ZHANG Jinwang, et al. Stability analysis of support around the longwall top-coal caving mining in steeply thick coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(11):2783-2791.
- [9] 王红伟,伍永平,解盘石,等.大倾角变角度综放工作面顶板运移与支架稳定性分析[J].中国矿业大学学报,2017,46(3):507-513.  
WANG Hongwei, WU Yongping, XIE Panshi, et al. Research on strata movement and support stability of fully mechanized sublevel caving workface with variable angle in steeply dipping seam [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3):507-513.
- [10] 章之燕.大倾角综放液压支架稳定性动态分析和防倒防滑措施[J].煤炭学报,2007,32(7):705-709.  
ZHANG Zhiyan. Dynamic analysis on stability of hydraulic powered support in deep inclined fully mechanized wall and prevention slips measures [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7):705-709.
- [11] 石建军,师皓宇,包寿胜,等.大倾角综采工作面液压支架参数设计及其与围岩关系[J].煤炭学报,2012,37(S2):313-318.  
SHI Jianjun, SHI Haoyu, BAO Shousheng, et al. The hydraulic support parameter design in lean coal seam and numerical simulation about the relation hydraulic support and surround rock [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2):313-318.
- [12] WANG Jin'an, JIAO Junling. Criteria of support stability in mining of steeply inclined thick coal seam [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 82(2):22-35.
- [13] 俞东风,刘柱,程文东,等.大倾角厚煤层综放支架侧护板载荷监测研究[J].煤炭科学技术,2016,44(9):145-149.  
YUN Dongfeng, LIU Zhu, CHENG Wendong, et al. Study on loading monitoring of side guard plate powered support of fully-mechanized top coal caving mining in high inclined thick seam [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(9):145-149.
- [14] WU Yongping, XIE Panshi, YUN Dongfeng, et al. Theory and practice of fully mechanized longwall mining in steeply dipping coal seams [J]. Mining Engineering, 2013, 65(1):35-41.
- [15] 伍永平.大倾角煤层开采“顶板-支护-底板”系统的动力学方程[J].煤炭学报,2004,30(5):685-689.  
WU Yongping. Dynamic equation of system “Roof (R) - Support (S) - Floor (F)” in steeply dipping seam mining [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 30(5):685-689.
- [16] 罗生虎,伍永平,解盘石,等.大倾角大采高综采工作面支架受载与失稳特征分析[J].煤炭学报,2018,43(12):3320-3328.  
LUO Shenghu, WU Yongping, XIE Panshi, et al. Load and instability characteristics of support in large mining height fully-mechanized face in steeply dipping seam [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12):3320-3328.
- [17] 罗生虎,伍永平,刘孔智,等.大倾角大采高综采工作面煤壁非对称受载失稳特征[J].煤炭学报,2018,43(7):1829-1836.  
LUO Shenghu, WU Yongping, LIU Kongzhi, et al. Asymmetric load and instability characteristics of coal wall at large mining height fully mechanized face in steeply dipping seam [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7):1829-1836.
- [18] 章之燕.大倾角综放液压支架稳定性动态分析和防倒防滑措施[J].煤炭学报,2007,32(7):705-709.  
ZHANG Zhiyan. Dynamic analysis on stability of hydraulic powered support in deep inclined fully mechanized wall and prevention slips measures [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7):705-709.
- [19] 龙驭球.弹性基地梁的计算[M].北京:人民教育出版社,1986.
- [20] 伍永平,李方立,王红伟,等.松软顶底板大倾角煤层长壁综放开采研究报告[R].西安:西安科技大学,2011.