



移动扫码阅读

张 浩,伍永平,解盘石.大倾角大采高采场塑性区分布及主控因素分析[J].煤炭科学技术,2023,51(9):55-64.  
ZHANG Hao, WU Yongping, XIE Panshi. Plastic zone distribution and main controlling factors analysis of large mining height face in steeply dipping coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 55-64.

## 大倾角大采高采场塑性区分布及主控因素分析

张 浩<sup>1,2</sup>, 伍永平<sup>1,2</sup>, 解盘石<sup>1,2</sup>

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

**摘 要:**大倾角大采高工作面煤壁临空高度大,自由运移空间广,自稳平衡性差,煤壁在工作面内并非独体,其会与围岩及支架等介体组成承载结构,且采动行为间密切联动,倾角效应极易促使煤壁所处应力环境异化,诱使其响应行为复杂化,增加煤壁及围岩稳定性控制难度,制约工作面安全高效生产。为解决大倾角大采高工作面煤壁稳定性控制难题,综合采用理论分析、数值计算法进行研究。研究得出大倾角煤层大采高工作面塑性区内应力呈指数曲线状递增,煤壁邻域存在非对称拱状残余应力影响区,塑性区广度分区异化,广度由大到小依次为上部、中部、下部,分布形态呈梯级拱状,塑性区内煤体会重复性承压,并会随塑性区扩展增强;采高增大,煤壁邻域残余支承压压力降低,煤壁前方煤体承压强度、位移幅度及受扰动范围均会增加;倾角效应下煤壁应力及运移分区式发展,其中,应力由大到小依次为下部、上部、中部,位移由大到小依次为中部、上部、下部,此外,伪斜布置下工作面倾角会诱使煤壁失稳模式转换,伪斜角大时,工作面倾角小,支承压力压缩分力作用增强,主要发生外凸片落式破坏,反之,则为采动应力及煤体自重倾向分力耦合性侧压下滑移失稳。综合分析可知,倾角及采高耦合作用下煤壁采动性状区域异化,且由于工作面中部、上部应力卸荷、运移量均较大,故此两域应为大倾角大采高工作面煤壁失稳重点防控区。

**关键词:**大倾角;大采高;三维模型;煤壁稳定性;塑性区

中图分类号:TD323

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2023)09-0055-10

### Plastic zone distribution and main controlling factors analysis of large mining height face in steeply dipping coal seam

ZHANG Hao<sup>1,2</sup>, WU Yongping<sup>1,2</sup>, XIE Panshi<sup>1,2</sup>

(1. School of Mineral Engineering, 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 710054, China)

**Abstract:** Coal wall of large mining height face in steeply dipping coal seam has large free height, wide free movement space and poor self-stabilization balance, coal wall is not an isolated body in the face, it can form a load-bearing structure with the surrounding rock, supports and other mediators, and the mining behavior is closely linked. The dip angle effect can easily promote the dissimilation of the coal wall bearing environment, complicate its response behavior, increase the difficulty of coal wall and surrounding rock stability control, and restrict the safe and efficient production of the face. In order to solve the problem of coal wall stability control of large mining height face in steeply dipping coal seam, theoretical analysis and numerical calculation are comprehensively used for research. The stress in the plastic zone of large mining height face in steeply dipping coal seam increases exponentially, there is an asymmetric arch residual stress influence zone in the vicinity of the coal wall, the plastic zone breadth is dissimilated in different regions, and the width from large to small is the upper, middle and lower part, and the distribution pattern is in the shape of stepped arch, coal in the plastic zone bears repeated pressure, and will be enhanced with the expansion of plastic zone. As the mining height increases, the residual abutment pressure near the coal wall decreases, the compressive strength, displacement value and disturbed range of the coal in front of the coal wall will increase. The stress and transport of the coal wall under the dip angle effect develop in a zonal manner, in which the stress distribution is lower > upper > middle,

收稿日期:2022-12-15 责任编辑:朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0949

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52104147, 51774230)

作者简介:张 浩(1990—),男,陕西汉中,助理工程师,硕士研究生。E-mail: 645115474@qq.com

while for the displacement is middle > upper > lower. In addition, the working face inclination under the oblique angle will lead to the transformation of the coal wall instability mode, when the oblique angle is large, the dip angle of face is small, the compression component of abutment pressure is enhanced, and the external convex spalling mainly occurs. On the contrary, it's the sliding instability under the coupling of mining stress and self weight. The comprehensive analysis shows that the coal wall mining behavior is regionally heterogeneous under the coupling effect of dip angle and mining height, and because the stress unloading and migration in the middle and upper part of the face are larger, therefore the two regions should be the key prevention and control areas for coal wall instability of large mining height face in steeply dipping panel.

**Key words:** steeply dipping; large mining height; three-dimensional model; coal wall stability; plasticity area

## 0 引言

大倾角煤层在西部矿井赋存广泛,受煤层倾角等多元因素影响,此类工作面机械化产效普遍较低,围岩控制难度大,因此,大倾角厚煤层多采用综放开采方式,但此种开采方式多会因放煤量不充分造成资源浪费,而该类煤层多为稀缺性优质煤种,采用大采高综采可克服上述缺陷<sup>[1]</sup>,对此,诸如2130矿、花山矿等有该类煤层的矿井进行了大采高技术实践,产效虽明显提升,但仍存在煤壁片帮频繁等技术缺陷,2130矿大倾角大采高工作面观测期间煤壁片帮几乎每班次均会发生,且片帮范围广,严重制约了大倾角煤层大采高工作面高效化生产。

大倾角大采高工作面围岩稳定是其安全、高效化生产的基础,而这其中的关键是要保证“R-S-F”系统动态稳定<sup>[2]</sup>,此类条件承压系统又是以不同形式多维化存在,且彼此之间联动制约,煤壁作为承载结构成分,其一旦失稳,又会诱发支架失稳等动力灾害,可见,煤壁稳定性状态对促进大倾角煤层大采高开采十分关键。为解决此类煤层开采难题,诸多学者进行了大量研究,文献[3]提出了大倾角工作面支架-围岩承载系统控制模式,文献[4]得出大倾角大采高工作面围岩运移规律及与支架协同性作用关系,文献[5-7]分别用边坡稳定性理论(结合概率分析法)、压杆理论、Mises准则理论分析得出大采高工作面煤壁片帮影响因素、形式等,文献[8-9]采用数值计算、理论分析法明确了大采高工作面塑性区分布、应力演化等规律,文献[10-11]基于实测结果建立煤壁片帮力学模型,并提出失稳判断模式,文献[12]揭示了夹矸层与大采高工作面煤壁失稳关系,文献[13]建立了极软煤层煤壁力学模型,文献[14]揭示了大倾角近距煤层群低位大采高工作面煤壁片帮机理,文献[15-17]确定了大倾角大采高工作面煤壁承载、运移特征,片帮形成机理及致灾机制,文献[18]采用相似材料实验得出大采高复合煤壁片帮形成机制,文献[19-20]得出多层开采、大倾角等条件下大采高软

煤灾变机理及控制措施,王红伟等<sup>[21]</sup>揭示出倾角效应下大倾角大采高工作面煤壁承压力学行为演变规律,文献[22]利用压杆理论分析出大倾角大采高煤壁片帮机理,文献[23]基于层次分析法、云理论构建出大倾角煤壁稳定性评价云模型。文献表明,大倾角大采高工作面支架与围岩关系研究多聚焦于支架与顶板结构互相作用,对于煤壁失稳灾变方面的研究虽建立了各种煤壁片帮力学模型,但大都基于特定开采条件,适用局限性仍较大,且多是针对开采倾角较小的煤层,大倾角大采高条件下煤壁研究主要集中于片帮机理、控制技术方面,文献量较少,故大倾角大采高工作面煤壁稳定性控制仍需进一步研究。综合采用理论分析、数值计算方法,研究大倾角大采高工作面塑性区分布规律,确定煤壁稳定性主控影响因素类型及其作用效能,从而为此类煤层开采提供科学依据。

## 1 工程背景及模型构建

### 1.1 工作面生产技术条件

25221工作面开采标高为+2 047~+2 120 m,煤层平均厚度5.77 m,普氏系数 $f=0.3\sim 0.5$ ,煤层倾角 $36^\circ\sim 46^\circ$ ,平均 $44^\circ$ 。工作面直接顶为灰白色含砾粗砂岩,厚度2.32 m,基本顶由含砾中砂岩等组成,厚度16.59 m,抗压强度62.56 MPa,直接底为炭质泥岩,厚度2.46 m,抗压强度11.02 MPa,基本底为粉砂岩、粗砂岩,厚度17.06 m,抗压强度79.04 MPa。工作面采用走向长壁综合机械化采煤方法,机采高度3.5~4.8 m,顶板采用全部垮落法管理,属于典型的大倾角大采高工作面。煤层综合柱状如图1所示。

### 1.2 数值模型及参数

基于开采条件建立大倾角大采高工作面数值计算模型(图2),采用Brick单元构建煤岩体,采用大变形应变模式及Mohr-Coulomb本构模拟计算。模型底部、前后及侧部分别进行固定,模型侧部留设47 m边界,前后侧留设20 m边界。煤岩力学参数见表1。

煤岩柱状	厚度/m	岩性描述
	16.59	中砂岩, 灰白色, 以石英为主, 抗风化能力强层面发育
	2.32	灰白色含砾粗砂岩
	3.58~9.77	煤层上部含 0~2 层夹矸, 为灰黑色粉砂岩, 中部含 3 层 0.4~0.5 m 夹矸, 底部厚为 0.6 m 煤泥
	5.77	
	2.46	炭质泥岩, 局部粉砂岩, 灰黑色, 薄层状, 夹杂煤线, 易碎
	17.06	粗砂岩, 灰白色, 以石英为主, 夹薄层状砂岩、砾岩, 微密坚硬

图 1 煤层柱状

Fig.1 Coal seam histogram

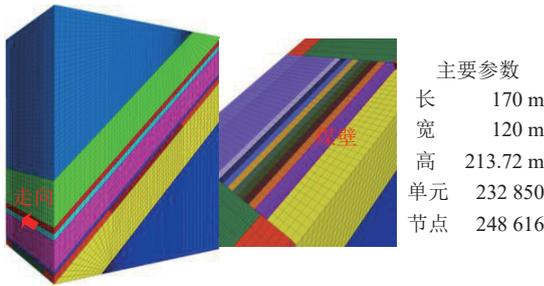


图 2 数值模型

Fig.2 Numerical model

表 1 煤岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of coal and rock

岩性	弹性模量/ GPa	泊松比	抗拉强度/ MPa	黏聚力/ MPa
炭质泥岩	2	0.35	1.1	0.8
5号煤	1	0.30	0.8	0.6
灰白色含砾粗砂岩	2	0.26	1.1	0.8
灰白色中砂岩	1.2	0.31	0.9	1.0
灰黑色粉砂岩	14	0.24	2.0	1.8

## 2 大倾角大采高工作面塑性区分布

### 2.1 塑性区应力分布

大倾角煤层大采高工作面煤层开采形成大范围采空区, 围岩所处原始三维应力平衡态遭到破坏, 覆岩进而向采空区内运移, 顶压在此过程中随之迁移, 硬顶具有强传载性, 使得顶压经岩梁向工作面前方煤体转移形成超前支承压力, 而支承压力传播过程中最先会在煤壁邻域内集聚, 促使煤体变形塑性化,

并在煤壁前方一定范围形成塑性变形区, 且塑性区分布广度会随工作面推移不同程度扩展(图 3)。由于塑性变形具有不可恢复性, 煤体形变量会持续累积, 因而塑性区影响下煤壁邻域内煤体将会始终处于预裂态, 承压性能转变, 超前支承压力叠加性作用, 极易诱使近煤壁煤体破断而结构离散后致灾。

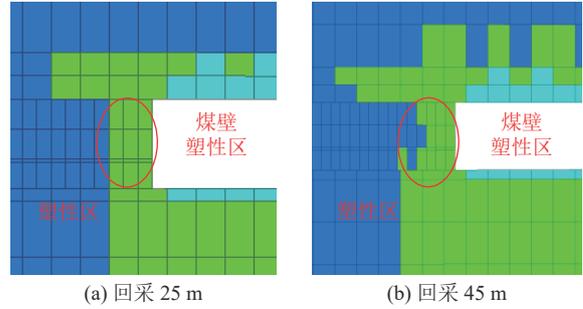


图 3 大倾角大采高工作面走向塑性区演变

Fig.3 Evolution of strike plastic zone of large mining height face in steeply dipping coal seam

大倾角大采高工作面前方煤体塑性区内承压仍为三维态, 因此, 可沿工作面倾向某处取微元体构建煤壁三维力学模型(图 4), 长为 1, 厚为  $dx$ (走向), 高为  $M$ (采高), 三维承压分别为  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ ,  $x$  方向由于煤体不同程度破坏, 会导致应力不规则分布, 故厚度  $dx$  影响不容忽视, 距煤壁  $dx$  处应力为  $\sigma_x+dx$ , 上下、左右两侧应力变化量忽略, 倾角效应下, 竖直应力  $\sigma_z$ , 围岩应力  $\sigma_y$  会分解成  $\sigma'_z$ 、 $\sigma'_y$ , 从而对煤体形成压缩作用, 小块体与顶底板、煤体的摩擦力分别为  $\tau'_z$ 、 $\tau'_y$ , 煤层倾角为  $\alpha$ , 将小块体旋转  $\alpha$  角, 并力学分解简化(图 4b)。

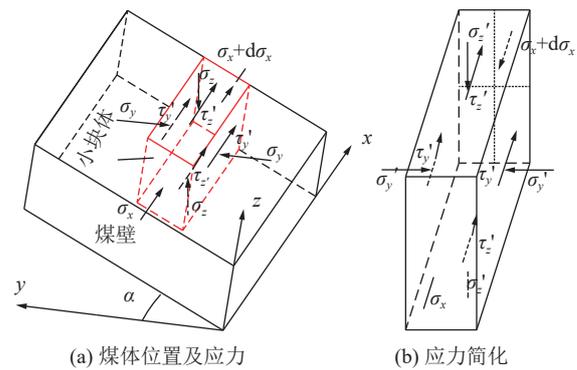


图 4 煤体应力分析模型

Fig.4 Coal stress analysis model

应力计算式如下:

$$\begin{cases} \sigma'_z = \sigma_z \cos \alpha \\ \tau'_z = c + f \sigma'_z, f = \tan \varphi \\ \sigma'_x + d\sigma_x = \sigma_x + d\sigma_x, \sigma_x = \sigma_x \\ \sigma'_y = \sigma_y \cos \alpha \\ \tau'_y = c' + f' \sigma'_y, f' = \tan \varphi' \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $c$ 、 $c'$  分别为煤体与顶底板、煤体接触面的黏聚力;  $f$ 、 $f'$  分别为煤体与顶底板、煤体接触面的摩擦系数;  $\varphi$ 、 $\varphi'$  分别为煤体与顶底板、煤体接触面的内摩擦角;  $\sigma'_z$ 、 $\sigma'_y$  分别为  $\sigma_z$ 、 $\sigma_y$  垂直所在面分力。

基于  $x$  方向应力平衡可得:

$$M\sigma_x - (\sigma_x + d\sigma_x)M + 2\tau'_z dx + 2\tau'_y dx M = 0 \quad (2)$$

煤体采出后煤壁临空侧水平应力  $\sigma_x$  释放, 导致(顶板)垂直应力  $\sigma'_z$  远大于  $\sigma_x$ , 因此可得:

$$\sigma_z = \frac{1}{\cos\alpha} \left\{ \frac{(1+3\lambda) [k(a-1)(2f+Mf') - (1-3\lambda)^2(c+Mc')] }{f(1-9\lambda^2) + (1-3\lambda)Mf'} \times \left( 1 - e^{-\frac{2x[f(1+3\lambda)+Mf']}{(1-3\lambda)M}} \right) + \frac{1+3\lambda}{(1-3\lambda)} pe^{-\frac{2x[f(1+3\lambda)+Mf']}{(1-3\lambda)M}} + \frac{2(a-1)k}{1-3\lambda} \right\} \quad (5)$$

大倾角大采高工作面走向上顶板岩层会形成梯次卸压区(图 5), 应力仅维持在较低水平, 强度约为 0.1~0.5 MPa, 这是由覆岩大幅运移后应力充分释放所造成的, 而覆岩运移又会形成顶板压力, 并超前煤壁形成支承压力  $\sigma_z$  扰动区, 顶板运移卸压量与顶压强度正向相关, 即顶板大尺度运移时, 岩层内集中压载可获充分释放, 覆岩受扰动范围扩展, 且该范围内岩层大幅离散化, 致使顶压强度显著提升, 而顶压又与  $\sigma_z$  密切相关, 则  $\sigma_z$  作用强度随之增加, 此类工作面亦具有周期性来压现象, 进而  $\sigma_z$  会在来压期间急剧增加, 迫使煤壁邻域内煤体处于严重性临界失稳态。

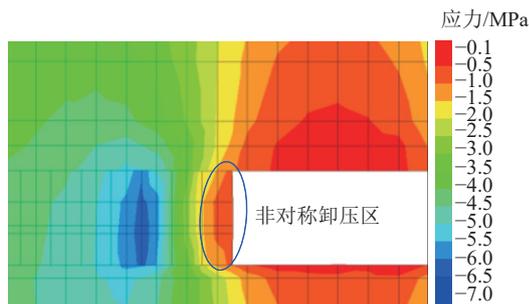


图 5 煤壁前方应力分布

Fig.5 Stress distribution in front of rib

由式(5)可知, 超前支承压力在塑性区内分布形式呈指数曲线式递增, 煤壁处( $x=0$ )压力强度低, 邻域煤体受残余支承压力作用, 超前煤壁  $x$  处达到峰值, 而数值计算结果(图 5)亦表明, 支承压力沿工作面走向在煤体内区段式分布, 煤壁邻域内煤体大幅卸压, 压力仅为 0.5~1 MPa, 卸压区形态呈非对称拱状, 拱顶偏向于垂向煤壁中上部, 压力强度由外向内梯次性增加, 并于煤壁前方 5~8 m 处压力集中, 压

$$\sigma_1 = -\sigma_z \cos\alpha, \quad \sigma_3 = -\sigma_x \quad (3)$$

为便于计算中间主应力  $\sigma_2$  ( $\sigma_2 = -\sigma'_y$ ), 将煤体倾向( $\sigma'_y$  作用方向)形变假定为 0, 根据平面应变公式得:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (4)$$

结合 D-P-Y 准则<sup>[24]</sup>, 并依据边界条件, 化简可得煤壁前方支承压力  $\sigma_z$ <sup>[25]</sup>:

力强度增至峰值达 6.5 MPa 以上。分析可知, 支承压力在煤壁前方散播是以煤体移动形变消耗进而作用强度、位置、影响范围动态变换来实现, 煤壁附近煤体首先会遭受支承压力集中作用, 进而形变大幅塑性化发展, 并随着煤体塑性能态深化, 其内部会逐步衍生出次生裂隙, 并与原生裂隙等弱结构耦合发育破坏煤体结构, 支承压力进而向煤体深部转移, 且由于煤体沿走向不同程度破坏, 使得应力释放量异化, 故分布表现出梯度分区特征。

大倾角大采高工作面超前支承压力按照强度可分为低值卸压、高强增压、稳压区, 且煤壁邻域煤体主要处于支承压力增压、卸压影响区, 即便是卸压区内煤体承压也并未完全消耗, 仍受低强支承压力作用, 工作面前移后, 揭露新煤壁前方又会重新形成支承压力扰动区, 并与煤体内残存支承压力作用叠加, 使得煤壁邻域内煤体极易受重复性压载作用, 且随着工作面煤壁位置动态变化, 煤壁力学响应塑性化演变程度会逐步加剧, 表现出塑性变形量增加、分布范围扩展, 当至塑性极值时, 煤体承压响应模式将随之转变, 由位移形变等量值演变过渡为煤体质态劣化, 结构破断后形成游离煤块, 塑性区亦随之分区化分布, 由煤壁向内依次为碎裂区、塑性形变区, 碎裂区游离态块体经持续性支承压力及块体自重效应诱导, 从而发生片帮等灾变, 与此同时, 煤体承压又将充分性释放。

大倾角大采高工作面煤壁前方煤体承压具有重复性, 而煤壁承压动态演变又受制于顶板力学性状。工作面矿压监测数据(表 2)表明, 25221 工作面顶板属坚硬岩层, 回采期间, 支架最大、平均工作阻力及周期来压步距均较顶板弱化后开采时大, 顶板经预

表 2 不同顶板状态工作面矿压实测统计

Table 2 Mine pressure measurement statics of face with different roof conditions

支架编号	最大阻力/kN		平均阻力/kN		周期来压步距/m	
	坚硬	弱化	坚硬	弱化	坚硬	弱化
	顶板	顶板	顶板	顶板	顶板	顶板
47	6 940	6 547	5 059	4 558	18	8
33	7 403	6 855	4 968	4 558	18	8
9	5 940	5 400	4 191	3 742	18	8

爆破弱化后, 47、33、9 号架最大及平均工作阻力都会不同幅度下降, 最大工作阻力降幅分别为 6%、8%、10%, 平均工作阻力降幅分别为 11%、9%、12%, 周期来压步距均减小 55%, 可见, 顶板强度与顶压扰动效能正向相关, 即顶板强度升高, 支架阻力、周期来压步距亦会随之增加。工作面内煤壁会与支架、矸石等介质承压作用耦合形成控顶结构, 故硬顶工作面回采, 煤壁及前方煤体承压强度高, 形变等破坏程度加剧, 顶压作用经岩梁超前煤壁迁移距离增加, 支承压力扰动范围扩大, 同时, 周期来压步距大, 岩梁

$$x = \frac{(1-3\lambda)M}{2[f(1+3\lambda)+Mf']} \ln \left[ \frac{\frac{(1-3\lambda)k'\gamma H \cos \alpha - 2(a-1)k}{1+3\lambda} - \frac{k(a-1)(2f+Mf') - (1-3\lambda)^2(c+Mc')}{f(1+3\lambda)+Mf'}}{p - \frac{k(a-1)(2f+Mf') - (1-3\lambda)^2(c+Mc')}{f(1+3\lambda)+Mf'}} \right] \quad (6)$$

式(6)表明, 大倾角大采高工作面煤壁前方塑性区分布广度与支承压力强度间具有正相关性。倾角效应下围岩运移力学环境异化, 工作面倾向覆岩内应力非均匀性分布, 且分布轮廓呈非对称拱拱状, 拱顶偏向于工作面中上部, 中上部区域覆岩内应力卸荷较下部明显, 具体表现为-0.5~0.1 MPa 低应力区分布范围广, 应力卸荷扰动层位高(图 6), 而应力卸荷主要发生途径为覆岩运移破坏消耗, 且覆岩运移状况与顶压作用密切联系, 说明顶压作用亦会区域

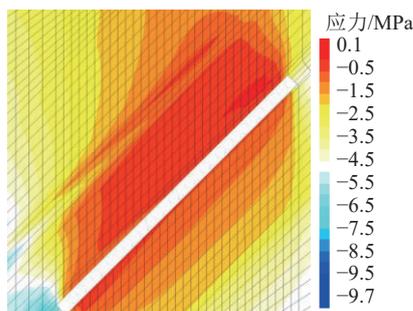


图 6 大倾角大采高工作面围岩应力

Fig.6 Surrounding rock stress of large mining height face in steeply dipping coal seam

不能及时断裂卸压, 导致煤壁邻域煤体承压时间延长, 从而随着煤壁位置变化, 支承压力与残存压力耦合作用增强, 煤体承压循环叠加程度升高, 使其处于近似疲劳损伤态, 因此, 顶板强度与煤体承压成正比, 而与其稳定性状态负向相关。

综上分析可知, 煤壁邻域内煤体支承压力循环性与塑性区分布密切相关, 煤壁邻域内煤体失稳前, 由于塑性变形会弱化其承压性, 支承压力超前煤壁扰动范围会一定扩展, 煤体承压重复性次数及强度升高, 且塑性区分布范围越广, 重复循环作用程度会越高, 随着煤壁失稳卸压, 工作面前方煤体承压重复性次数及强度会有所降低。

### 2.2 塑性区范围

大倾角大采高工作面煤壁前方支承压力强度倍于原岩应力, 迫使煤体塑性变形, 减弱近煤壁煤体承压能力, 进而高强压载作用位置迁移, 形成一定范围塑性区, 支承压力峰值位置到煤壁区域内煤体处于极限平衡态, 域外煤体处于弹性变形态, 故煤壁到支承压力峰值区间  $x$  为塑性区范围。设支承压力峰值为  $k'\gamma H$ , 结合式(5)可得塑性区宽度:

异化, 工作面中上部顶压大于下部。超前支承压力是顶压作用超前煤壁迁移的结果, 其作用强度与顶压正向相关, 故工作面中上部煤体承压强度较下部高, 即中上部煤体承压增压系数  $k'$  大于下部, 由式(6)可知, 工作面中上部塑性区广度大于下部。

大倾角大采高工作面数值计算结果(图 7)表明, 倾角效应下工作面内塑性区超前煤壁距离随工作面倾向位置变化而区域非对称性分布, 轮廓形态呈梯级拱状, 塑性区分布范围表现为上部大于中部大于

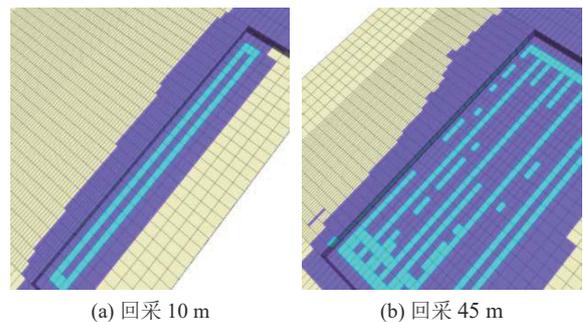


图 7 大倾角大采高工作面倾向煤壁前方塑性区演变

Fig.7 Tendency evolution of plastic zone in front of coal wall of large mining height face in steeply dipping coal seam

下部,而这与式(6)分析结果充分契合,更加说明大倾角大采高工作面塑性区分布区域差异化性。大倾角大采高工作面煤壁前方塑性区分布范围随推进距增加会分区差异性扩展,且工作面中上部塑性区增幅大于下部。

大倾角大采高工作面软煤壁塑性化变形是其结构断裂进而游离灾变的前提,塑性变形量累积超过其变形阈值后,煤体状态将由行为量变转变为结构质变,因此,煤壁失稳深度与塑性区宽度联系紧密,即煤壁失稳程度会受塑性区分布广度影响,且塑性区范围广域时,持续性支承压力 $\sigma_2$ 作用下煤体失稳范围及程度亦随之增加。而大倾角开采条件由于角度影响,工作面前方塑性区分区差异化分布,故煤壁失稳亦会区域性分化,塑性区越大,临界失稳态煤体破坏加剧,失稳几率升高,加之煤体自重作用不可忽略,游离态煤块脱离母体煤壁后容易滑帮致灾。

### 2.3 煤壁稳定性影响因素类型

大倾角大采高工作面超前支承压力是诱发煤壁失稳的主要力源,而支承压力在煤壁前方散播过程同时伴随着煤体的变形消耗,煤壁邻域内煤体由于临空侧卸压及高强支承压力作用将处于类“卸侧压+加轴压”承压环境下,迫使煤体塑性变形形成塑性区,且随着煤壁位置动态变化,塑性区内应力作用强度及范围均会随之动态变化,且支承压力越大,塑性区

范围越广,新揭露煤壁承压强度越大,稳定性状况恶化,此外,塑性区范围又会影响煤壁失稳深度,同时影响煤体承压叠加状态,可见煤壁稳定性与塑性区应力及范围具有负相关性,因此,塑性区分布影响因素亦会影响煤壁稳定性。

式(5)、式(6)表明,大倾角大采高工作面煤壁前方塑性区应力及分布范围影响因素具有多元性,包含煤层赋存地质及开采技术2方面,其中地质方面影响因素包括煤体抗拉强度、煤体摩擦角、黏聚力、煤岩内摩擦力、埋深等,开采技术制约性因素包括倾角、支架支护阻力、采高等。对于特定地质条件下大倾角大采高开采,地质条件为定值,而开采技术影响因素则可以通过技术参数优化加以调整,使工作面开采良性化发展,因此,从可控性角度而言,开采技术条件是煤壁稳定性控制关键,同时,鉴于该类工作面倾角、采高均较大的典型化开采特点,可将倾角、采高视为煤壁状态主控因素,故本文主要分析主控因素与煤壁稳定性联动关系。

大倾角大采高工作面煤壁稳定性状态、程度主要受支承压力及塑性区分布范围影响,进而根据工作面开采条件,选取参数 $c$ 、 $c'$ 分别为1.2、1.6 MPa,  $\varphi$ 、 $\varphi'$ 分别为25.5°、28°,抗拉强度 $\sigma_t$ 为2 MPa,  $P$ 为千斤顶最大推力386 kN,对式(5)、式(6)计算,确定出不同工况下支承压力强度、塑性区宽度(图8)。

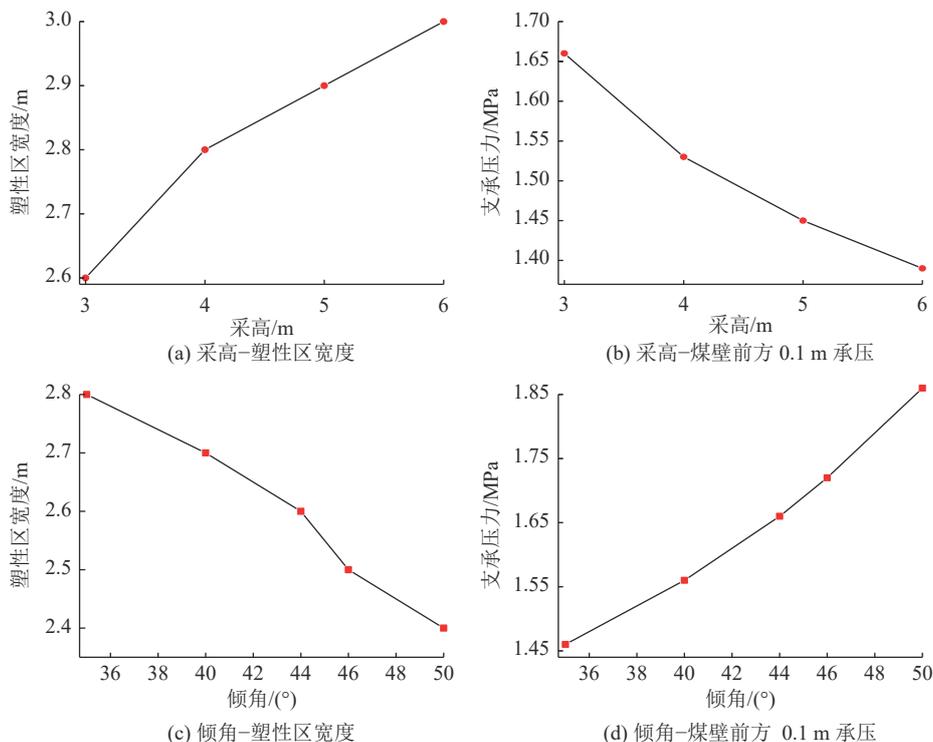


图8 不同工况下支承压力及塑性区变化曲线

Fig.8 Variation curves of abutment pressure and plastic zone under different mining conditions

### 3 大倾角大采高工作面煤壁稳定性主控因素效能

#### 3.1 采高影响效能

大倾角大采高工作面采高与围岩运移状况密切相关,采高增加,煤体承压强度虽会整体性增加,但承压状态随距煤壁距离变化具有差异性,其中,煤壁邻域内煤体承压采高  $3.5\text{ m}>4.5\text{ m}$ ,域外则为  $4.5\text{ m}>3.5\text{ m}$ (图 9a),而式(5)结果(图 8b)亦表明,采高与煤壁邻域煤体承压反向相关,即近煤壁煤体承压随采高增加降低。分析可知,变采高条件下,大倾角大采高工作面空域尺度会随采高增加而扩大,同位置处覆岩受扰动层位升高,顶压作用强度升高,进而煤体承压强度亦会升高,支承压力传递过程中首先迫使煤壁邻域煤体形变破坏,采高增加,导致煤体运移空间大,且低约束高度大,极易沿工作面倾向以“薄板”状结构承压,造成煤壁稳定性状态恶化,煤壁越高,近煤壁煤体塑性变形量大幅增加,支承压力释放卸压越充分,因此,煤壁邻域煤体承压随采高增加降低,支承压力在近煤壁煤体破坏后位置转移并重新集聚,从而域外支承压力与采高成正比。

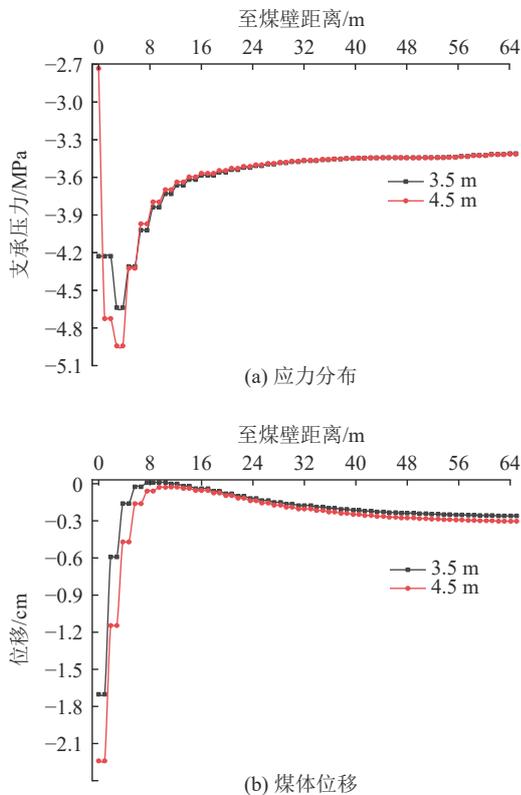


图 9 不同采高煤体应力及位移曲线

Fig.9 Stress and displacement curves of coal with different mining heights

大倾角大采高工作面煤壁运移与采高变化亦具有正相关性(图 9b),采高 4.5 m 煤壁邻域内煤体运

移整体位移较 3.5 m 大,且最大位移均集中于煤壁前方 0.94 m 范围内,位移最大值分别为 2.24、1.70 cm,由此分析可知,煤体位移与采高正向相关,煤体运移幅度越大,内部结构破坏程度升高,承压能力降低。采高变大时,煤壁前方支承压力强度升高,加之煤壁邻域煤体低承压性,导致支承压力峰值超前煤壁距离加大,塑性区范围大幅扩展,塑性区分布与采高表现出正比性演变关系(图 8a)。塑性区内煤体承压虽会在其形变破坏过程中消耗但仍会残存,并与煤壁位置变化后支承压力叠加,且随着塑性区扩大,残余支承压力分布范围扩展,煤体承压循环叠加作用强度及范围均会升高,近煤壁煤体会疲劳破坏,随着煤壁侧向卸压,支承压力作用增强,煤壁失稳几率及广度升高。

综上可知,采高对于煤壁稳定性影响效能(图 10)主要表现为 3 方面:运移空间广、煤壁高度大、承压强度高。采高增加时,工作面后方会形成大尺度空域,煤壁高度大,倾角效应下煤体自重作用增强,自稳性差,支承压力作用增强,煤体进而大幅向空区内运移,塑性化程度加深,而塑性区范围扩展,一定程度上又会促使煤体支承压力叠加强度、重复次数、范围升高,致使煤壁邻域内煤体易疲劳屈服,并随采高增加大幅劣化。

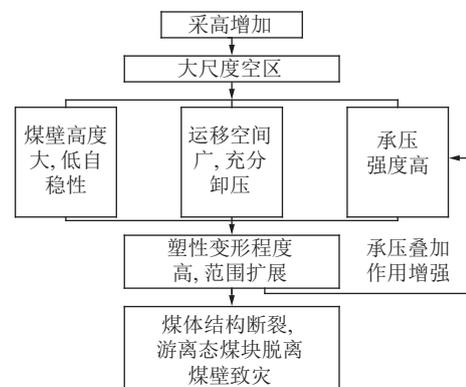


图 10 采高对煤壁稳定性影响效能

Fig.10 Effectiveness of mining height on coal wall stability

#### 3.2 倾角影响效能

大倾角大采高工作面数值计算结果(图 11a)表明,煤壁承压具有区域性、异化性,上部、下部区域应力波动幅度及频次均较中部大,且端头附近波动幅度最大,下部应力为 0.45 ~ 1.89 MPa,平均 0.78 MPa,中部应力 0.76 ~ 0.60 MPa,平均 0.66 MPa,上部应力为 0.49 ~ 0.10 MPa,平均 0.72 MPa,煤壁内应力由大到小为下部、上部、中部,工作面端部附近更易应力集中,应力值较其余位置大,其中,下端煤壁应力为工作面全域最大。

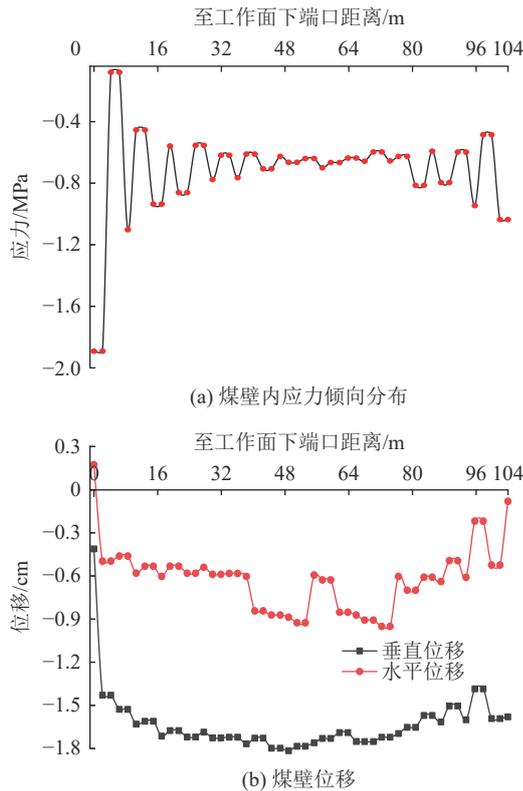


图11 大倾角大采高工作面煤壁力学行为分布规律

Fig.11 Distribution law of rib mechanical behavior of large mining height face in steeply dipping coal seam

大倾角大采高工作面煤壁各向运移均会分区非对称性分布(图11b),工作面倾向由下至上各区域煤壁垂直运移分别集中于0.41~1.73 cm、1.69~1.82 cm、1.39~1.72 cm,平均垂直位移依次为1.56、1.75、1.58 cm,最大位移量位置处于工作面中下部,距下端口48.9 m,水平位移集中区间分别为0.46~0.59、0.59~0.91、0.08~0.95 cm,平均位移分别为0.52、0.80、0.56 cm,位移极值位置处于工作面中上部界值邻域,距工作面下端口72.3~74.4 m,可见,煤壁位移由大到小依次为工作面中部、上部、下部。结合煤壁应力分布结果可知,倾角效应下,煤壁承压环境异化,工作面中部、上部煤壁运移量大,能够使其内部应力释放卸荷程度升高,进而应力值降低,倾向分布表现出中部、上部应力小于下部。

大倾角大采高工作面俯伪斜布置,伪斜角作用下工作面倾角将直接影响工作面回采,而工作面倾角 $\beta$ 与煤层倾角 $\alpha$ 、伪斜角 $\theta$ 满足以下关系:

$$\beta = \arcsin(\cos \theta \sin \alpha) \quad (7)$$

因而工作面倾角会随伪斜角变化而波动,由式(7)可知,伪斜角增加时,工作面倾角会随之减小,反之,则会增加,进而倾角效应会主导承压作用沿工作面倾向及垂向不同程度分解,使得煤壁不同模式失

稳,结合式(5)、式(6)结果(图8c、图8d)分析可得:伪斜角增大时,支承压力垂向分力作用增强,邻迫使煤体压缩变形幅度加大,进而塑性化程度加深,压力值超前煤壁扰动范围扩展,塑性区范围随之增加,且煤壁邻域内煤体破坏程度高,压力经充分释放后降低,煤壁失稳模式主要为高强压力下结构破断后外凸式失稳。伪斜角减小时,垂向压缩作用弱化后煤体塑性化程度降低,塑性区范围减小,煤壁邻域内煤体破坏程度降低,使得域内承压会升高,支承压力倾向分力作用强度增加,并与煤壁邻域内煤体自重作用耦合,导致倾向力学作用主导煤壁失稳,当倾向分力超过煤体与顶(底)板、煤体内部摩擦等反力时,会诱发煤体滑移式失稳。

大倾角大采高工作面煤壁失稳实测结果(图12)表明,煤壁失稳时工作面伪斜角度均超过 $6^\circ$ ,最大角度可达 $8.2^\circ$ ,煤壁失稳范围与伪斜角密切联动,伪斜角大,煤壁失稳范围较广,且大都几乎分布于工作面中部、上部全域,随着伪斜角减小,煤壁失稳范围则会明显减小。可见,伪斜角与煤壁稳定性关系紧密,且彼此间一定程度上成反比关系,即伪斜角增大,工作面倾角减小,垂向压缩作用增强,近煤壁煤体承压后向空区内侧向变形等破坏程度升高,片帮几率大,广域性失稳,反之,倾向分力作用会增强,且倾角效应下工作面各域非对称性力学作用,促使近煤壁煤体沿倾向非均匀性破坏,造成煤体滑帮几率升高。

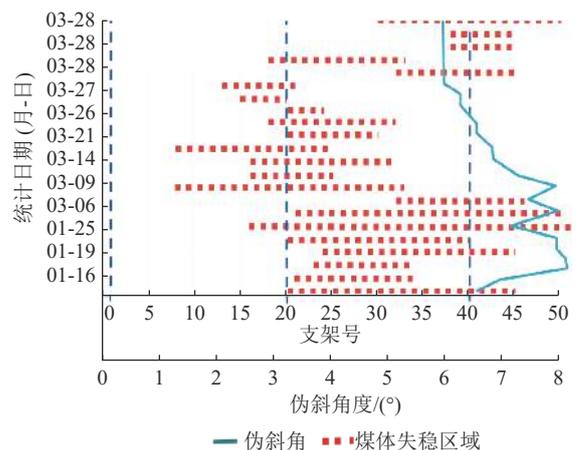


图12 大倾角大采高工作面变伪斜角煤壁失稳特征

Fig.12 Instability characteristics of rib of large mining height face in steeply dipping under variable pseudo angle

## 4 结 论

1)大倾角大采高工作面塑性区内应力分区梯度式分布,呈指数曲线状递增,煤壁邻域存在非对称拱状残余应力影响区,拱顶偏于垂向煤壁中上部;塑性

区广度区域性异化,表现为上部大于中部大于下部,分布形态呈梯级拱状,塑性区内煤体承压具有重复叠加性,并会随塑性区扩展叠加作用增强。

2)大倾角大采高工作面煤壁稳定性与采高具有负相关性,随采高增加,煤壁邻域残余支承压力强度降低,位移量增加,支承压力作用强度升高,扰动范围扩展。

3)大倾角大采高工作面煤壁承压力学行为区域差异化分布,煤壁应力下部大于上部大于中部,位移量则表现为中部大于上部大于下部,煤壁失稳模式与伪斜角密切相关,伪斜角大,主要发生外凸式片帮,伪斜角小,则为侧压诱导下滑移失稳。

#### 参考文献(References):

- [1] 华新祝,谢广祥.大采高综采工作面煤壁片帮机理及控制技术[J].煤炭科学技术,2008,36(9):1-3.  
HUA Xinzhu, XIE Guangxiang. Coal wall spalling mechanism and control technology of fully mechanized high cutting longwall coal wall mining face[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(9): 1-3.
- [2] 伍永平.大倾角煤层开采“R-S-F”系统动力学控制基础研究[M].西安:陕西科学技术出版社,2003.
- [3] 伍永平.“顶板-支护-底板”系统动态稳定性控制模式[J].煤炭学报,2007,32(4):341-346.  
WU Yongping. Controlling pattern for dynamic stability of system “Roof-Support-Floor” [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(4): 341-346.
- [4] 解盘石,伍永平,王红伟,等.大倾角煤层大采高综采围岩运移及支架相互作用规律[J].采矿与安全工程学报,2015,32(1):14-19.  
XIE Panshi, WU Yongping, WANG Hongwei, *et al.* Interaction characteristics between strata movement and support system around large mining height fully-mechanized face in steeply inclined seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(1): 14-19.
- [5] 郝海金,张 勇.大采高开采工作面煤壁稳定性随机分析[J].辽宁工程技术大学学报,2005,2(4):489-491.  
HAO Haijin, ZHANG Yong. Stability analysis of coal wall in full-seam cutting workface with fully-mechanized in thick seam[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 2(4): 489-491.
- [6] 尹希文,闫少红,安 宇.大采高综采面煤壁片帮特征分析与应用[J].采矿与安全工程学报,2008,25(2):222-225.  
YIN Xiwen, YAN Shaohong, AN Yu. Characters of the rib spalling in fully mechanized caving face with great mining height[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(2): 222-225.
- [7] 徐 兵.大采高工作面煤壁片帮冒顶控制技术[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011,30(6):826-829.  
XU Bing. Large working rib fall control technology [J]. Journal of Liaoning Technical University (Nature Science), 2011, 30(6): 826-829.
- [8] 胡国伟,靳钟铭.基于FLAC<sup>3D</sup>模拟的大采高采场支承压力分布规律研究[J].山西煤炭,2006,26(6):10-12.  
HU Guowei, JIN Zhongming. Research on distribution laws of abutment pressure in large mining height workface by FLAC<sup>3D</sup> simulation[J]. Shanxi Coal, 2006, 26(6): 10-12.
- [9] 闫少宏.大采高综放开采煤壁片帮冒顶机理与控制途径研究[J].煤矿开采,2008,13(4):5-8.  
YAN Shaohong. Research on side and roof falling mechanism and control approaching in full mechanized caving mining with large mining height[J]. Coal Mining Technology, 2008, 13(4): 5-8.
- [10] 方新秋,何 杰,李海潮.软煤综放面煤壁片帮机理及防治研究[J].中国矿业大学学报,2009,38(5):640-644.  
FANG Xinqiu, HE Jie, LI Haichao. A study of the rib fall mechanism in soft coal and its control at a fully-mechanized top-coal caving face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(5): 640-644.
- [11] 袁 永,屠世浩,马小涛,等.“三软”大采高综采面煤壁稳定性及其控制研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(1):21-25.  
YUAN Yong, TU Shihao, MA Xiaotao, *et al.* Coal wall stability of fully mechanized working face with great mining height in “three-soft” coal seam and its control technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(1): 21-25.
- [12] 杨敬轩,刘长友,吴锋锋,等.煤层硬夹矸对大采高综采工作面煤壁稳定性影响机理研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(6):856-862.  
YANG Jingxuan, LIU Changyou, WU Fengfeng, *et al.* The research on the coal wall stability mechanism in larger height coal seam with a stratum of gangue[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(6): 856-862.
- [13] 杨 科,何 祥,刘 帅,等.近距离采空区下大倾角“三软”厚煤层综采片帮机理与控制[J].采矿安全与工程学报,2016,33(4):611-617.  
YANG Ke, HE Xiang, LIU Shuai, *et al.* Rib spalling mechanism and control with fully mechanized longwall mining in large inclination “three-soft” thick coal seam under closed distance mined gob[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(4): 611-617.
- [14] 伍永平,张 浩,解盘石,等.大倾角大采高工作面煤壁应力分布及变形特征研究[J].煤炭工程,2016,48(6):87-90.  
WU Yongping, ZHANG Hao, XIE Panshi, *et al.* Study on coal wall stress distribution and deformation features of high cutting face in steeply dipping seam[J]. Coal Engineering, 2016, 48(6): 87-90.
- [15] 张 浩,伍永平.大倾角煤层长壁大采高采场煤壁片帮机制[J].采矿与安全工程学报,2019,36(2):332-337.  
ZHANG Hao, WU Yongping. Coal wall caving mechanism of longwall large mining height stope in steeply dipping coal seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(2): 332-337.
- [16] 解盘石,伍永平.大倾角煤层长壁大采高开采煤壁片帮机理及防控技术[J].煤炭工程,2015,47(1):74-77.  
XIE Panshi, WU Yongping. Mechanism and control methods of

- rib spalling in steeply dipping thick seams in fully-mechanized longwall mining with large mining height[J]. *Coal Engineering*, 2015, 47(1): 74-77.
- [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 thick seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(7): 1829-1836.
- [18] 殷帅峰, 何富连, 王玉杯, 等. 大采高复合煤壁非同步片帮分层弱化机制的试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(4): 750-759.
- YIN Shuai Feng, HE Fulian, WANG Yuhuai, *et al.* An experimental study of layered weakening mechanism to nonsynchronous spalling from composite rib with large mining height[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(4): 750-759.
- [19] 杨科, 刘帅, 唐春安, 等. 多关键层跨煤组远程被保护层煤壁片帮机理及防治[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(9): 2611-2621.
- YANG Ke, LIU Shuai, TANG Chunan, *et al.* Mechanism and prevention of coal seam rib spalling in remote protected layer across coal group[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(9): 2611-2621.
- [20] 杨科, 刘文杰, 李志华, 等. 厚硬顶板下大倾角软煤开采灾变机制与防控技术[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(2): 12-20.
- YANG Ke, LIU Wenjie, LI Zhihua, *et al.* Catastrophe mechanism and prevention and control technology on soft coal mining with large inclination angle under thick and hard roof[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(2): 12-20.
- [21] 王红伟, 伍永平, 焦建强, 等. 大倾角煤层大采高工作面倾角对煤壁片帮的影响机制[J]. *采矿与安全工程学报*, 2019, 36(4): 728-752.
- WANG Hongwei, WU Yongping, JIAO Jianqiang, *et al.* Study on effect of dip angle on coal wall spalling of working face with great mining height in steeply inclined coal seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2019, 36(4): 728-752.
- [22] 李立, 于雷, 张世青, 等. 大采高大倾角工作面煤壁片帮机理分析[J]. *煤炭工程*, 2020, 52(12): 102-107.
- LI Li, YU Lei, ZHANG Shiqing, *et al.* Spalling mechanism of coal wall in large-angle and high-cutting coal mining face[J]. *Coal Engineering*, 2020, 52(12): 102-107.
- [23] 熊钰, 孔德中, 杨胜利等. 大倾角工作面煤壁稳定性的云模型综合辨识[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(3): 144-151.
- XIONG Yu, KONG Dezhong, YANG Shengli, *et al.* Cloud model identification of coal face stability in steeply inclined working faces[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(3): 144-151.
- [24] 李平恩, 殷有泉. Drucker-Prager准则在拉剪区的修正[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(S1): 3029-3033.
- LI Ping'en, YIN Youquan. Modification of Drucker-Prager criterion in tensile shear region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S1): 3029-3033.
- [25] 张浩. 大倾角煤层长壁大采高综采工作面煤壁稳定性分析[D]. 西安: 西安科技大学, 2016.
- ZHANG Hao. Coal face stability of longwall large mining height fully-mechanized panel in steeply dipping coal seam[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016.