



移动阅读

于斌,朱卫兵,李竹,等.特厚煤层开采远场覆岩结构失稳机理[J].煤炭学报,2018,43(9):2398-2407. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1037

YU Bin, ZHU Weibing, LI Zhu, et al. Mechanism of the instability of strata structure in far field for super-thick coal seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2398-2407. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1037

特厚煤层开采远场覆岩结构失稳机理

于斌^{1,2},朱卫兵¹,李竹¹,高瑞¹,刘锦荣²

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 大同煤矿集团有限责任公司, 山西 大同 037003)

摘要:针对大同矿区石炭系特厚煤层综放工作面周期性发生液压支架立柱大幅下缩甚至压死支架的工程难题,采用理论分析与现场实测的方法,研究特厚煤层开采远场覆岩结构失稳机理。提出了远场“三角板”结构运动影响特厚煤层开采工作面矿压的理念,建立了远场关键层“横O-X”破断形成的“三角板”结构力学模型,确定了该“三角板”结构滑落失稳和回转变形失稳的理论判据;结合同忻煤矿现场实例,预计了远场关键层“横O-X”破断“三角板”结构块体的几何尺寸,并分析了此“三角板”的走向长度及回转程度对其自身结构稳定性的影响,结果表明“三角板”的走向长度和回转程度越大时该结构越容易失稳。同忻煤矿8202工作面临空侧回风平巷超前段底臃变形特征间接验证了远场关键层发生“横O-X”破断的规律。据此提出超前预裂远场关键层以及在“三角板”结构下工作面实行快速推进等防治措施。

关键词:特厚煤层;关键层;“横O-X”破断;“三角板”结构;矿压显现;大采高

中图分类号:TD325 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2018)09-2398-10

Mechanism of the instability of strata structure in far field for super-thick coal seam mining

YU Bin^{1,2}, ZHU Weibing¹, LI Zhu¹, GAO Rui¹, LIU Jinrong²

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Datong Coal Mine Group Co., Ltd., Datong 037003, China)

Abstract: To overcome the problems of sharp decrease of hydraulic support's prop and even emerging support crushing disaster periodically when the fully-mechanized top coal caving mining method is applied for mining the Carboniferous super-thick coal seam in Datong mining area, the methods of theoretical analysis and field measurement were used to study the mechanism of the instability of strata structure in far field for super-thick coal seam mining. The hypothesis that the movement of the "triangle plate" structure in far field impacts the mine pressure in super-thick coal seam working faces was proposed, and the "triangle plate" structural mechanics model for far field key strata broken in the shape of "horizontal O-X" for super-thick coal seam mining was established. Combining the field measurement in Tongxin coalfield, the geometrical parameters for the broken blocks of "triangle plate" structure for far field key strata broken in the shape of "horizontal O-X" were predicted, and the influence of its strike length and rotation degree on the structural stability was analyzed. The results show that this structure was easy to break when a big strike length and a heavy rotation degree of "triangle plate" existed. The floor heave deformation behavior of advancing segments in tailgate on the side of free face of 8202 working face, Tongxin coalfield, indicated the breakage rule for the "horizontal O-X" breakage of far-field key strata indirectly. Based on the influential mechanism of the "triangle plate" structure in

收稿日期:2017-07-30 修回日期:2018-05-02 责任编辑:毕永华

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600700, 2018YFC0604500)

作者简介:于斌(1962—),男,黑龙江海伦人,教授级高级工程师,博士生导师。E-mail: yubin0352@163.com

通讯作者:朱卫兵(1978—),男,江苏海门人,副教授,博士。E-mail: zweibing@163.com

far field on the mine pressure in working faces, the precautions of presplitting the far field key strata in advance and mining quickly under the “triangle plate” structure were addressed. The research work can provide a reference to the safe and high-efficiency mining and strong mine pressure controlling of faces with large mining height in super-thick coal seams.

Key words: super-thick coal seam; key stratum; “horizontal O-X” breakage; “triangle plate” structure; strata behavior; large mining height

我国6~20 m及以上的特厚煤层储量丰富,是亿吨级大型煤炭基地的主采煤层,其资源储量占我国煤炭资源总量的45%~50%^[1]。近年来,随着开采工艺水平及配套装备的提升,已经成功研发了8.8 m特大采高综采和20 m特厚煤层大采高综采放顶煤技术及装备^[1-2],实现了特大型矿井的高产高效生产。目前我国每年的煤矿顶板事故起数和死亡人数虽然随煤矿机械化水平的升高逐渐降低,然而,仍居各类事故之首^[3-4]。尽管顶板事故主要发生于矿井支护体系弱和机械化水平低的中小型煤矿,但现代化特大型矿井在特厚煤层开采过程中工作面仍然频繁发生支架立柱大幅下缩甚至压死支架等强矿压灾害,严重威胁着人员的生命财产和矿井的安全高效生产,当前已成为顶板事故中仅有的增长类型。大同矿区是我国典型的坚硬顶板赋存矿区,近年来,随着浅部侏罗系煤炭资源的减少,逐步转入下部石炭系特厚煤层开采。特厚煤层综放开采一次采出空间大、覆岩垮裂范围广,将引起更大范围内的岩层破断运动参与影响采场矿压。

采场矿压显现与上覆岩层的破断结构运动密切相关,采场上覆岩层形成的结构形态及其稳定性既直接影响到采场矿压,也将影响到开采后上覆岩层运动的形体甚至地表塌陷形状^[5]。传统采场矿压理论主要关注直接顶和近场第1层关键层(即基本顶)岩层的破断运动。随着3.5~6.0 m大采高开采技术的日趋成熟及推广应用,大家普遍认识到近场的两层关键层运动都会对工作面矿压造成影响。大采高开采引起的垮落带与断裂带高度随采高的增大呈现台阶状上升^[6]。实测发现近场的第1层关键层呈“悬臂梁”破断、第2层关键层呈“砌体梁”破断,上述近场两层关键层的“悬臂梁+砌体梁”破断结构运动是造成大采高工作面出现端面漏冒^[7]、液压支架立柱大幅下缩^[8-9]、冲击地压^[10]、大小周期来压^[11-13]等现象的主要原因。统计发现此近场两层关键层的赋存位置都在4~6倍采高以内^[8-15],然而,已有的研究发现,特厚煤层开采与煤层间距8~12倍采高以内的远场关键层的破断运动在一定条件下也会参与影响采场矿压^[16-18]。鉴

于井工煤矿工作面顶板的垮落带高度一般为3~5倍采高^[5],显然,影响采场矿压的近场关键层总体处于垮落带以内,局部处于断裂带底界,而远场关键层的位置则甚至处于断裂带内的中上部。

一些学者为了掌握特厚煤层开采覆岩更高层次位的岩层结构运动对采场矿压的影响规律,采用微地震定位监测技术^[19-21]、EH-4探测技术^[21]、自制三维可加载模型实验装置^[22-23]等方法,对覆岩空间结构形态及致灾机理开展研究,将覆岩空间结构分为中部有支撑的“ θ ”型和无支撑的“O”型、“S”型及“C”型^[19,24-25],提出了冲击矿压动静载叠加原理及“OX-F-T”结构^[20,26]、“拱壳”结构^[27]、“载荷三带”结构^[28]和远场关键层横“O-X”破断的“三角板”结构^[16,29],通过优化特厚煤层顶煤爆破参数^[30]、水压致裂改造顶板岩层结构^[31]、合理确定支架工作阻力计算方法^[32-34],最大程度的控制采场强矿压显现。上述研究均认为采场顶板更大范围内的岩层结构运动以及多工作面与采空区覆岩协同作用会对采场矿压造成影响,所建立的结构模型总体对煤矿冲击地压及工作面回采巷道超前区域底鼓破坏变形有较好的解释及现场指导作用,但是,针对特厚煤层开采工作面频繁发生支架立柱大幅下缩的强矿压灾害问题研究较少,笔者曾经初步提出了“远近场”的概念,并构建了近场关键层“悬臂梁+砌体梁”以及远场关键层“三角板”的大结构^[16,29];但是,尚未对远场关键层“三角板”破断块体结构的稳定性展开讨论,因此,有必要进一步阐述特厚煤层开采远场覆岩结构失稳机理,为后续特厚煤层工作面的安全高效开采及强矿压控制提供理论基础。

1 特厚煤层工作面强矿压显现实例

通常煤层群开采中上煤层的回采对下煤层起到一定的卸压作用,使下煤层工作面的采场矿压显现趋于缓和。然而,据大同矿区特厚煤层综放工作面强矿压灾害统计资料显示,石炭系3-5号特厚煤层综放工作面在上覆侏罗系老采空区下回采时,即使已经采用额定工作阻力15 000 kN的低位放顶煤支架,工作面仍然频繁发生强矿压现象,工作面来压时强度大、

支架立柱下缩量普遍达到 800 ~ 1 100 mm, 严重时甚至诱发支架压死等顶板灾害事故。截止目前, 仅同忻矿和塔山矿石炭系特厚煤层综放开采强矿压显现(来压期间支架立柱下缩量超过 600 mm) 已达 132 次, 其中, 工作面发生压架事故约 21 次。同忻煤矿部分工作面发生强矿压的位置如图 1 所示, 具体的强矿压显现特征见表 1。

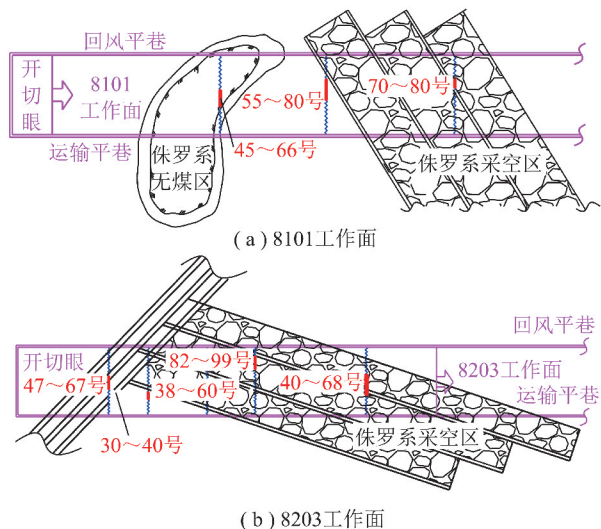


图 1 同忻矿综放工作面强矿压位置及对应支架区域

Fig. 1 Site plan of strong weighting event of the fully-mechanized working face in Tongxin Coal Mine

表 1 侏罗系老采空区下工作面强矿压显现实例

Table 1 Case study of strong weighting event in the working face under the old goaf of Jurassic system

工作面	推进距/m	矿压显现情况
8101	513	45 ~ 66 号支架立柱下缩量达 1 000 mm
	770	55 ~ 60 号支架立柱下缩量达 900 mm, 61 ~ 80 号支架立柱无行程完全压死
	1 082	70 ~ 80 号支架立柱下缩量达 900 mm
8203	278	47 ~ 67 号支架立柱下缩量达 1 100 mm
	395	30 ~ 40 号支架立柱下缩量达 800 mm
	570	38 ~ 42 号支架立柱下缩量达 1 100 mm, 50 ~ 60 号支架立柱无行程完全压死
	712	82 ~ 99 号支架立柱下缩量达 900 mm
	1 042	40 ~ 68 号支架立柱下缩量达 800 mm

统计大同矿区侏罗系老采空区或者实体煤下的综放工作面强矿压显现位置, 发现石炭系综放工作面强矿压发生位置存在一定规律性, 即特厚煤层开采每隔 117 ~ 175 m 或其整数倍时就会发生一起采场强矿压现象, 见表 2。

表 2 中特厚煤层开采工作面的强矿压显现与浅埋煤层开采压架类型存在本质差异^[35]。神东矿区综

采工作面的周期来压步距普遍为 10 ~ 20 m, 大同矿区石炭系综放工作面的周期来压步距普遍为 15 ~ 35 m, 这与全国其它矿区工作面的周期来压步距长度基本相近; 然而, 石炭系特厚煤层综放工作面每隔 117 ~ 175 m 或其整数倍时会周期性发生强矿压, 这显然不再是近场关键层的破断运动所致, 而是与更高层次远场关键层的破断运动密切相关。

表 2 强矿压显现事故周期性间隔统计

Table 2 Statistics of periodic intervals for strong weighting event accident

矿井	工作面	推进距/m	间距/m
同忻煤矿	8101	513, 770, 1 082	257 (128.5×2), 312 (156×2)
	8203	278, 395, 570, 712, 1 042	117, 175, 142, 330 (165×2)

2 远场关键层“三角板”结构模型

国内外已有的工程实践表明, 随着煤层采高的增大, 上“三带”的发育高度及覆岩的结构形态将发生显著变化。相同的开采条件下, 采高较小时, 下位关键层破断后能够形成相互铰接的“砌体梁”结构, 且块体的回转角均较小; 而当采高加大后, 覆岩破断的范围明显加大, 导致近场关键层处于“垮落带”内, 并在运动过程中以“悬臂梁”或“砌体梁”结构形态出现。不难推测, 采高继续增大后, 巨大的采出空间将引发更大范围内的岩层活动, 覆岩结构对矿压的影响也更为复杂。上覆各层位关键层由于受到工作面宽度、采高及岩层破断角的影响, 与煤层的距离不同, 其破断块体运动空间不同, 在工作面走向和倾向上的暴露尺度也不尽相同, 破断特征亦存在明显差异。

就同忻矿石炭系特厚煤层坚硬顶板综放开采条件而言, 工作面宽度为 200 m, 煤层一次累计采出空间可达 15 m, 覆岩垮裂带高度可达 12 ~ 18 倍采高, 已经波及上覆远场关键层。由于距离开采煤层远, 远场关键层在工作面上方的暴露长度受岩层破断角影响较大, 造成其在工作面倾向方向上的暴露长度小于在工作面走向方向上的暴露长度, 该关键层将呈现典型的“横 O-X”破断特征, 如图 2 所示^[16]。

图 2 中的近场关键层呈现“竖 O-X”破断形式, 工作面矿压主要受沿工作面走向发育的梯形板影响, 破断距普遍小于 35 m, 相应的采场来压周期较短; 相比之下, 远场关键层“横 O-X”破断模型中的“三角板”结构位于工作面正上方, 与采场矿压显现联系密

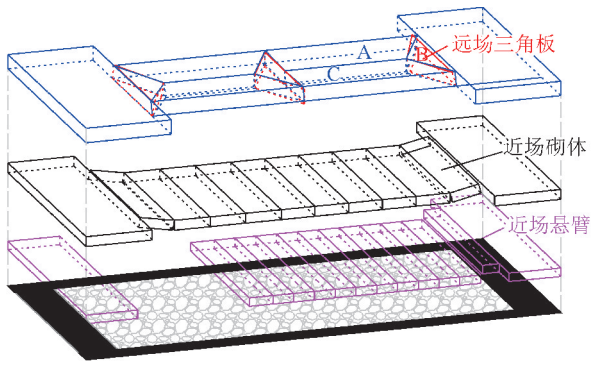


图2 远场关键层“横O-X”破断“三角板”结构模型

Fig.2 Schematic diagram of the triangle plate structure after the “horizontal O-X” breakage of the far field key stratum

切,且成为主导工作面矿压显现的关键破断块体。因为远场关键层“横O-X”破断时各“三角板”之间的间隔距离较大,回转运动失稳后将引起采场超大步距周期性强矿压,这与前述的统计结果不谋而合。因此,研究远场关键层“三角板”结构的失稳机理是揭示和防治特厚煤层开采工作面压架等强矿压灾害的关键所在。

3 “三角板”结构稳定性的力学分析

图2中远场关键层呈现“横O-X”破断特征,结合破断块体在工作面上方分布的位置可知,梯形破断块体A和C处于采空区上方,此块体的回转运动主要对临空侧巷道以及本工作面回风平巷超前段的变形影响较大;而“三角板”块体B处于采场顶板上方,其结构失稳运动将显著影响工作面采场矿压显现。有别于近场关键层破断块体的铰接结构,远场“三角板”后方受力边界条件发生改变,传统的梁模型不能满足受力条件,应当以板的结构加以分析。

“三角板”结构由于自身形状的原因,与后方两个梯形块体咬合铰接力较弱,可能存在以下两种失稳形式:①在回转的过程中,接触面面积不断变化,接触应力也在变化,当接触面的水平推力产生的集中应力超过了接触面关键块的强度极限时,关键块将发生挤压破坏,进一步导致“三角板”关键块回转而形成变形失稳;②在“三角板”上覆载荷及自身重量作用下,一旦接触面提供不了足够的摩擦力,“三角板”块体将发生滑落失稳。

采用板模型对此“三角板”进行受力计算,建立三维坐标,取图2中B块体为研究对象,在上覆载荷

Q和自重作用下,三角形块体B绕轴AC做定轴转动并与A,C块体产生侧向挤压,如图3所示。

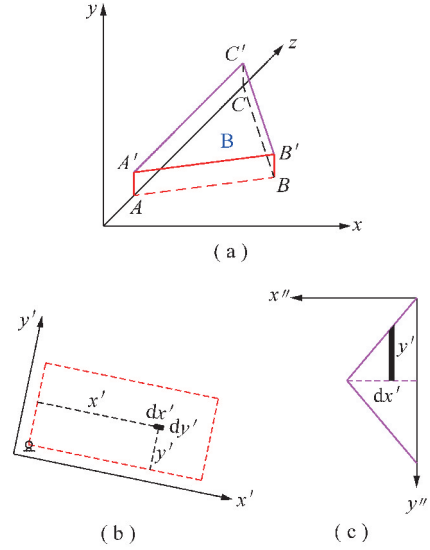


图3 远场关键层“横O-X”破断“三角板”受力分析示意
Fig.3 Stress analysis diagram of the triangle plate structure after the “horizontal O-X” breakage of the far field key stratum

截取块体B侧向挤压面 $ABB'A'$,该截面分布正应力 σ 。 σ 对转轴AC的力矩 M_σ 计算式为

$$M_\sigma = \int_0^{(h-l\sin\theta)} \int_0^{\sqrt{\frac{1}{4}L^2+l^2}} \sigma y \cos \alpha dx' dy' = \frac{1}{2} \sigma (h-l\sin\theta)^2 \sqrt{\frac{1}{4}L^2+l^2} \cos \alpha \quad (1)$$

式中, L 为“三角板”倾向长度,m; l 为“三角板”走向长度,m; h 为“三角板”厚度,m; σ 为接触面正应力,MPa; θ 为“三角板”回转角度,(°)。

覆岩载荷及块体B自重对转轴AC的力矩 M_q 可表示为

$$M_q = \int \gamma (H+h) x'' y'' \cos \theta dx = \frac{1}{3} \gamma (H+h) L l^2 \cos \theta \quad (2)$$

同样接触面摩擦力矩 M_f 可表示为

$$M_f = \frac{1}{2} \mu \sigma l (h-l\sin\theta) \sqrt{\frac{1}{4}L^2+l^2} \quad (3)$$

式中, γ 为岩石容重, N/m^3 ; H 为“三角板”上覆载荷层厚度,m; μ 为岩石材料界面摩擦因数。

由力矩平衡关系可知

$$2M_\sigma = M_q + 2M_f \quad (4)$$

将式(1),(2)和(3)代入式(4)可得

$$\sigma = \frac{2\gamma(H+h)Ll^2\cos\theta}{3\sqrt{L^2+4l^2} \left(\frac{Ll^2\sin^2\theta}{\sqrt{L^2+4l^2}} - \frac{2Lhl\sin\theta}{\sqrt{L^2+4l^2}} + \mu l^2\sin\theta + \frac{Lh^2}{\sqrt{L^2+4l^2}} - hl\mu \right)} \quad (5)$$

“三角板”结构块体回转运动过程中,接触面挤压程度及其挤压力逐渐增大,接触面长度亦处于动态变化过程中,当接触面挤压应力超过岩石

$$\sigma = \frac{2\gamma(H+h)Ll^2 \cos \theta}{3\sqrt{L^2+4l^2} \left(\frac{Ll^2 \sin^2 \theta}{\sqrt{L^2+4l^2}} - \frac{2Lhl \sin \theta}{\sqrt{L^2+4l^2}} + \mu l^2 \sin \theta + \frac{Lh^2}{\sqrt{L^2+4l^2}} - hl\mu \right)} > \zeta[\sigma_c] \quad (6)$$

“三角板”结构块体回转运动过程中,接触面挤压程度及其挤压力逐渐增大,截面挤压正应力随之增加,若截面正应力超过岩石材料抗压强度,“三角板”块体接触面发生破坏,接触面正应力大幅减弱,导致截面上摩擦力同步减小;此时若截面摩擦力小于上覆载荷及块体自重两者接触面上产生的剪切力,“三角板”结构块体将发生滑落失稳,失稳判据为

$$\frac{1}{2}\gamma(H+h)Ll = 2\mu\sigma(h - l \sin \theta) \sqrt{\frac{1}{4}L^2 + l^2} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{\gamma(H+h)Ll}{\mu h \sqrt{L^2+4l^2}} > \zeta[\sigma_c] \quad (8)$$

$$\theta = \arcsin \left[\frac{M - (K_p - 1)\Delta}{l} \right] \quad (9)$$

材料抗压强度时,“三角板”块体接触面将发生塑性破坏,“三角板”结构发生回转变形失稳,失稳判据为

式中, M 为煤层采出厚度,m; Δ 为垮落带高度,m; K_p 为垮落带岩石碎胀系数; σ_c 为岩石材料抗压强度,MPa; ζ 为块体端部挤压系数,可取 $\zeta=0.35$ 。

4 “三角板”结构稳定的尺寸效应分析

以同忻矿 8203 工作面为例,假设远场关键层破断前倾向悬板宽度为 100 m,走向悬露长度为 200 m,板厚度 20 m,载荷层厚度 200 m,岩石材料泊松比 0.25,弹性模量 10 GPa。

首先,依据板理论,求解上述参数下板结构发生“横 O-X”破断时板内部弯矩分布,可知板结构裂缝位置及其扩展顺序如图 4 所示。

据此求得“三角板”块体大小,即“三角板”结构倾向长度 L 和走向长度 l ,通过分析计算可知,“三角板”结构 $L=80$ m, $l=25$ m。

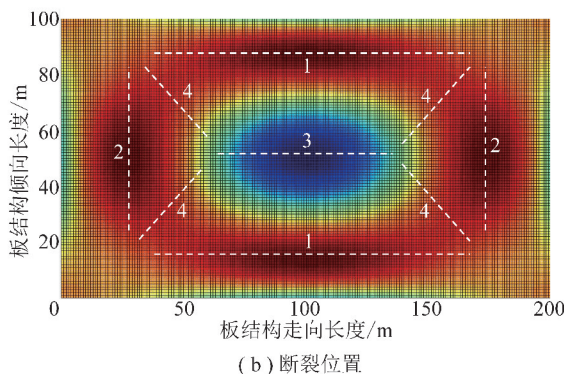
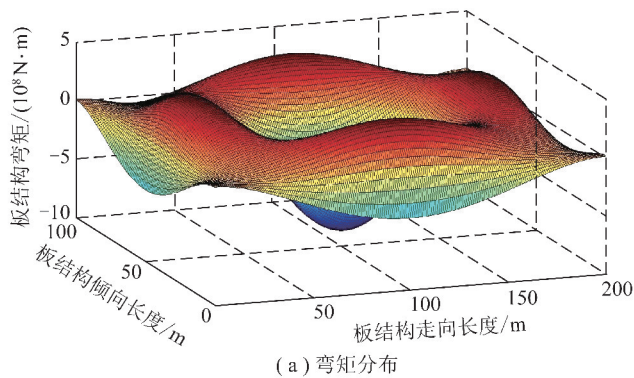


图 4 远场关键层弯矩分布及断裂位置

Fig. 4 Bending moment distribution and fracture position of the far field key strata

基于式(6),(8)和(9),采用上述参数可求得“三角板”结构在回转变形失稳或滑落失稳时,“三角板”走向长度 l 对接触面正应力的影响规律,如图 5 所示。受到远场关键层上覆载荷的影响,载荷越大,“三角板”走向长度必然越小,在工作面累计采放高度保持不变的前提下,若“三角板”长度较小时回转角度以 $\theta = 15^\circ$ 计算,三角板长度较大时回转角度以 $\theta = 10^\circ$ 计算。

由图 5 可知,在“三角板”走向长度 l 保持一定的前提下,回转角度越大,接触面挤压正应力 σ 越大,即“三角板”结构接触面越容易发生挤压破碎,诱发三角板结构失稳,致使工作面强矿压显现。在“三角

板”回转角度 θ 保持一定的前提下,块体长度越短,接触面挤压正应力 σ 越小,表明“三角板”结构接触面越不易发生挤压破碎,即“三角板”结构能够保持稳定。

由图 6 可知,在工作面采高 M 、垮落带高度 D 、垮落带破碎岩石碎胀系数 K_p 、岩石抗压强度 σ 一定的情况下,“三角板”结构的稳定性与“三角板”走向长度密切相关。“三角板”越长,块体挤压程度越大,接触面越易挤压破坏,“三角板”结构越不稳定,远场“三角板”结构的失稳使得上覆载荷传递至采场,诱发了采场强矿压显现。在特定开采参数下,均存在“三角板”维持结构稳定的临界长度 l_0 ,上述算例中

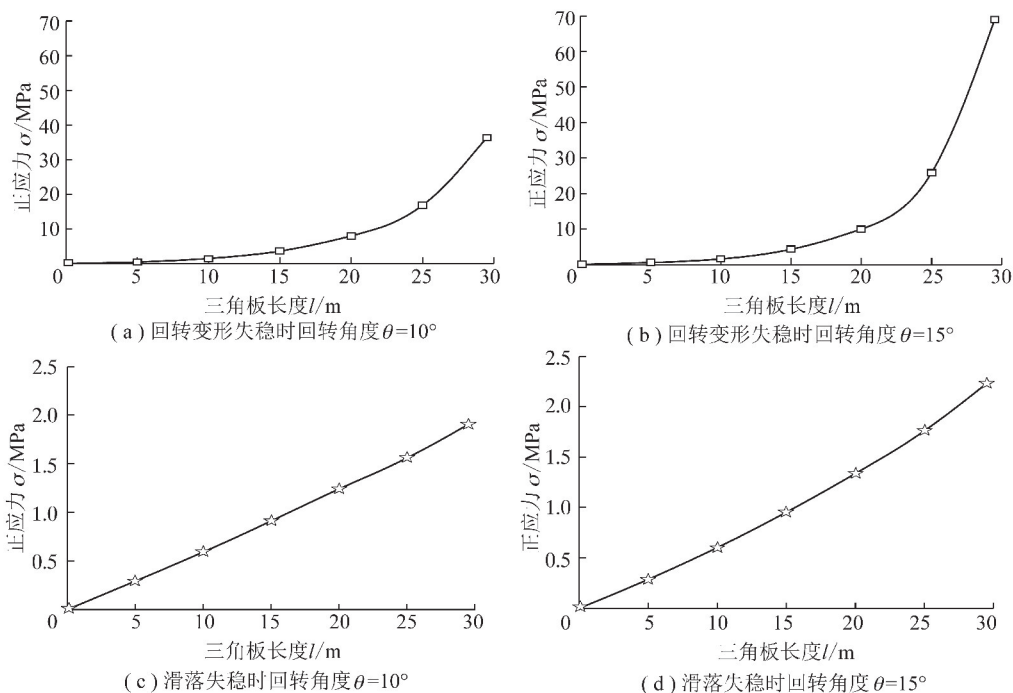
图5 “三角板”结构稳定性与 l 的关系

Fig. 5 Relationship between the stability of triangle plate and the strike length

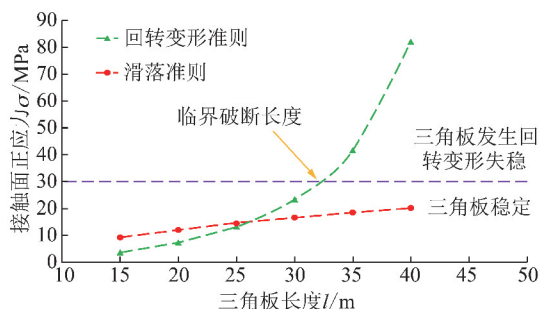


图6 “三角板”结构稳定的临界长度

Fig. 6 Critical length of triangle plate stabled

临界长度 l_0 约为32 m。因此,从确保“三角板”结构稳定的角度来控制采场矿压显现,则需减小“三角板”的走向长度。

5 远场“三角板”结构失稳机理

随着工作面推进,上覆岩层的暴露面积逐步增大,当远场关键层发生“横O-X”破断时,形成的“三角板”断裂块体位于采场顶板上方,成为影响采场矿压的关键块体。由于前方煤体的约束和下部岩层的支撑,“三角板”在上覆载荷及自重作用下将围绕AC边发生回转,回转的“三角板”两腰面与后方“梯形板”的接触面积不断变化,二者之间的水平推力也不断变化,当水平推力造成的应力集中超过岩体抗压强度后,“三角板”与后方块体接触面发生挤压破坏导致变形失稳;同时,接触面破坏后,摩擦因数减小,作

用其上的正应力大幅减弱,接触面间的摩擦力也随之减小,直至小于二者之间的剪力,便引发“三角板”的滑落失稳。“三角板”块体失稳后,其上覆载荷随着“三角板”的回转运动向下传递至近场“砌体梁”结构,诱发原本处于稳定状态的“砌体梁”结构进一步回转,回转角增大,以至发生滑落失稳,远场关键层“三角板”结构失稳带动近场关键层破断块体发生联动失稳效应便是特厚煤层综放开采周期性强矿压显现的本质原因。

此外,特厚煤层开采工作面强矿压显现间隔距离近似等于远场关键层的破断步距,远场关键层因距离开采煤层远,“横O-X”破断时走向步距较大,且影响采场矿压的仅为临近工作面的“三角板”关键块体,一旦“三角板”结构的失稳影响到采场矿压,工作面发生强矿压的间隔距离即可达到117~175 m;当然,远、近场关键块体联动失稳对工作面矿压是否能够造成影响还与它们彼此之间的时间和空间关系有关,这也是造成强矿压的间隔距离有时会是117~175 m的整数倍,即有时因工作面推进速度快或者远、近场关键块体失稳位置远滞后于工作面,工作面矿压显现趋于正常。

当远场关键层发生“横O-X”破断形成工作面采场上方的“三角板”结构时,在工作面回采巷道上方同时形成“梯形板”结构^[36],该“梯形板”结构易对临空侧回风平巷超前段的巷道底臃变形产生重要影响。

6 远场关键层“横 O-X”破断及其对矿压影响的实测验证

文献[37]叙述了在同忻煤矿 8203 工作面布置了内部岩移观测钻孔,其中的 3 个测点依次处于近场第 1 层和第 2 层关键层以及远场关键层之中。当 8203 工作面推过此钻孔期间,孔内各测点下沉值相继发生的跃升式变化与工作面的周期来压趋于同步,表明远场关键层的破断均对工作面矿压造成了影响,且远场关键层破断运动产生的矿压显现最为强烈。文献[38]根据 8203 工作面内地面钻孔电视的观测结果,得出孔内岩层错堵层位与工作面开采位置的对应关系,由于该电视观测钻孔与内部岩移钻孔位于同一个倾向剖面位置且两孔水平间距仅为 33 m,进一步表明远场关键层的初始破断运动与文献[37]中远场关键层内测点的下沉位移跃升变化相一致。

北京科技大学姜福兴教授团队曾在毗邻同忻煤矿的塔山煤矿 8103 工作面开展了系统的微地震监测,结合特厚煤层综放面岩层破裂场与应力场模拟结果,发现石炭系煤层开采引起的采动岩层破裂高度约达到 250 m,且岩层破裂在高度方向上具有明显的层位效应;在超前层位方面,先是高位顶板岩层超前煤壁发生破裂(远场关键层的超前破裂距离为 75 m),然后是低位岩层发生破裂(近场第 2 层关键层的超前破裂距离为 50 m、近场第 1 层关键层的超前破裂距离为 35 m)。鉴于特厚煤层综放工作面回采期间,临空侧回风平巷超前段的底臆变形量大(最大值达到 1.5 m)且影响范围广(普遍为超前 110 m 至 200 m),如果煤壁超前区域顶板岩层的应力传播角按 70° 计算,则远场关键层的影响范围就达到 113 m 以上,如图 7 所示,表明临空侧巷道底臆变形主要受远场岩层的运动影响。

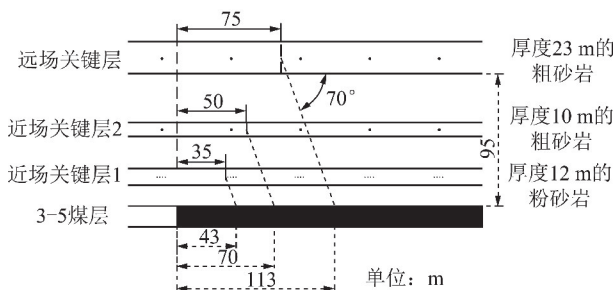


图 7 远场关键层超前破裂时的应力传递范围

Fig. 7 Delivery scope of stress in the advancing breakage of far-field key strata

同忻煤矿 8202 工作面紧邻 8203 工作面,该工作面宽度 200 m,走向推进长度约 2 184.5 m,煤层平均

厚度为 15.26 m,倾角 1.5° 。8202 工作面回采期间,在 8202 回风平巷超前工作面 300 m 左右提前布置巷道变形观测站,相邻测站间距约 30 m,观测记录工作面推进至各测站时巷道顶底板的最大移近量,如图 8 所示。由图 8 可知,该回风平巷内不同位置的顶底板移近量存在显著差异。在工作面初采期间,远场关键层第 1 次发生“横 O-X”破断时,其 3 侧均为实体煤壁,另一侧为区段煤柱,此时受 3 侧实体煤壁的主要承载影响,区段煤柱能够保持稳定;之后的远场关键层仅有 2 侧为实体煤壁,一侧为区段煤柱,另一侧则为采空区、无实际支撑体;此时,区段煤柱承受的载荷将逐步加大,且其较大的压缩变形将进一步增加远场关键层传递的载荷,致使远场关键层第 3 次破断期间,工作面后方的区段煤柱就已经破坏失稳,导致临空侧巷道超前段的底臆变形趋于严重,且存在周期性由小到大的变化特征,推测其周期长度与远场关键层发生“横 O-X”破断步距相一致,如图 9 所示。

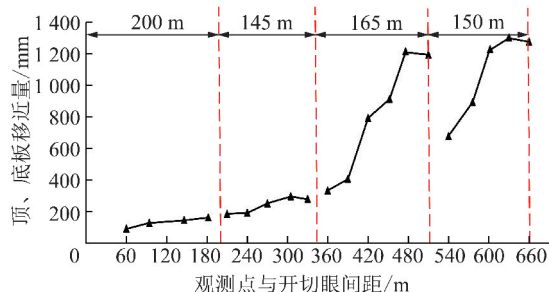


图 8 8202 工作面回风平巷顶底板的最终移近量

Fig. 8 Final convergence between roof and floor in tailgate of 8202 working face

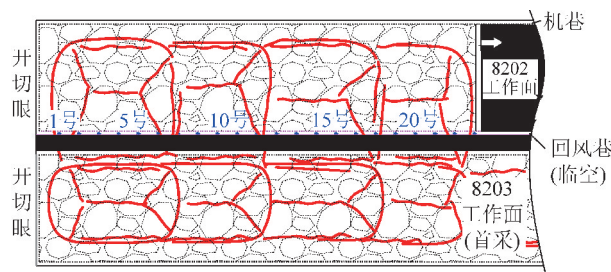


图 9 远场关键层破断的预计效果

Fig. 9 Expected effect for the breakage of far-field key strata

7 防治对策

鉴于大同矿区坚硬顶板条件下特厚煤层开采远场关键层“三角板”结构失稳易导致采场周期性发生强矿压显现的本质,而远场“三角板”结构的稳定性又取决于“三角板”的长度,宽度,厚度及其载荷等因素,可以通过以下措施进行防治。

(1) 预裂远场关键层。工作面开采前,在工作面前方,每间隔 80 ~ 100 m 对远场关键层实施平行于工

作面倾向的预裂,人为构造裂隙面以缩短断裂步距,改变远场关键层“O-X”破断形式,防止“三角板”结构的出现;同时,预裂也相对减小了关键层侧向块体大小,分散上覆载荷向下传递的集中程度,有利于巷道维护。当预裂远场关键层操作实施困难时,可通过预裂近场的各层关键层以实现下位岩层的卸压。

(2)改变顶煤放煤方式。即指定工作面中部的部分支架(5~10架)沿走向每隔80~100m后的10~15m推进距内不放顶煤,利用遗留顶煤的碎胀空间及再压实过程控制上覆岩层的运动,类似于墩柱承载,以达到减小工作面强矿压与临采空侧巷道超前段变形的目的,同时,可以实现缩短留设的区段煤柱宽度,间接提高煤炭资源采出率。

(3)覆岩定点注浆充填。利用地面探水钻孔或瓦斯抽放钻孔对采动过程中的覆岩进行隔离注浆充填,根据远场关键层破断特征实施定点区域灌注,最终在工作面中部的上覆岩层中形成走向间隔墩柱充填体,控制并减缓远场覆岩的运动,达到减小工作面强矿压显现的目的。

(4)调节工作面推进速度。结合各矿顶板条件和邻近矿井工作面强矿压分布规律,初步给出远场关键层“横O-X”结构尺寸,在工作面与远场“三角板”水平距离较大时,减小推进速度,使基本顶充分垮落充填采空区以支撑上覆岩层;水平距离较小时,则加快推进速度,以期与“三角板”结构失稳形成时空差,使上覆载荷传递到工作面后方采空区,减缓对工作面矿压的影响。

8 结 论

(1)实测统计发现大同矿区石炭系特厚煤层综放工作面每隔117~175m或其整数倍时周期性发生支架立柱大幅下缩等强矿压现象;提出了远场关键层“三角板”结构运动影响特厚煤层开采工作面矿压的理念。

(2)建立了远场关键层“横O-X”破断形成的“三角板”结构力学模型,给出了远场关键层“三角板”结构回转变形失稳与滑落失稳的理论判据,为揭示特厚煤层综放开采强矿压机理奠定了理论基础。

(3)分析了远场关键层“三角板”结构稳定的尺寸效应,揭示远场关键层“三角板”结构失稳联合近场关键层破断块体影响采场矿压的作用关系,据此提出了预裂远场关键层、覆岩定点注浆充填等防治对策。

(4)同忻煤矿8202工作面临空侧回风平巷超前段顶底板最大移近量的变化特征,间接说明了远场关

键层呈现“横O-X”破断的特点。

参考文献(References):

- [1] 王国法,庞义辉. 特厚煤层大采高综采综放适应性评价和技术原理[J]. 煤炭学报,2018,43(1):33-42.
WANG Guofa, PANG Yihui. Full-mechanized coal mining and caving mining method evaluation and key technology for thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(1):33-42.
- [2] 王家臣. 我国放顶煤开采的工程实践与理论进展[J]. 煤炭学报,2018,43(1):43-51.
WANG Jiachen. Engineering practice and theoretical progress of top-coal caving mining technology in China[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(1):43-51.
- [3] 孙继平,钱晓红. 2004—2015年全国煤矿事故分析[J]. 工矿自动化,2016,42(11):1-5.
SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Analysis of coal mine accidents in China during 2004—2015[J]. Industry and Mine Automation,2016,42(11):1-5.
- [4] 于健浩,毛德兵. 我国煤矿顶板管理现状及防治对策[J]. 煤炭科学技术,2017,45(5):65-70.
YU Jianhao, MAO Debing. Status and countermeasures of roof management in China coal mines[J]. Coal Science and Technology,2017,45(5):65-70.
- [5] 钱鸣高,石平五,许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [6] 弓培林,靳钟铭. 大采高采场覆岩结构特征及运动规律研究[J]. 煤炭学报,2004,29(1):7-11.
GONG Peilin, JIN Zhongming. Study on the structure characteristics and movement laws of overlying strata with large mining height[J]. Journal of China Coal Society,2004,29(1):7-11.
- [7] 鞠金峰,许家林,朱卫兵. 浅埋特大采高综采工作面关键层“悬臂梁”结构运动对端面漏冒的影响[J]. 煤炭学报,2014,39(7):1197-1204.
JU Jinfeng, XU Jialin, ZHU Weibing. Influence of key strata cantilever structure motion on end-face fall in fully-mechanized face with super great mining height[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(7):1197-1204.
- [8] JU Jinfeng, XU Jialin. Structural characteristics of key strata and strata behaviour of a fully mechanized longwall face with 7.0 m height chocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2013,58:46-54.
- [9] 弓培林. 大采高采场围岩控制理论及应用研究[M]. 北京:煤炭工业出版社,2006.
- [10] 李振雷,何学秋,窦林名. 综放覆岩破断诱发冲击地压的防治方法与实践[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(1):162-171.
LI Zhenlei, HE Xueqiu, DOU Linming. Control measures and practice for rock burst induced by overburden fracture in tip-coal caving mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2018,47(1):162-171.
- [11] 许家林,鞠金峰. 特大采高综采面关键层结构形态及其对矿压显现的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(8):1547-1556.
XU Jialin, JU Jinfeng. Structural morphology of key stratum and its

- influence on strata behaviors in fully-mechanized face with super-large mining height [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1547-1556.
- [12] 闫少宏,尹希文,许红杰,等. 大采高综采顶板短悬臂梁-铰接岩梁结构与支架工作阻力的确定[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11): 1816-1820.
- YAN Shaohong, YIN Xiwen, XU Hongjie, et al. Roof structure of short cantilever-articulated rock beam and calculation of support resistance in full-mechanized face with large mining height [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 1816-1820.
- [13] 黄庆享,周金龙,马龙涛,等. 近浅埋煤层大采高工作面双关键层结构分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2504-2510.
- HUANG Qingxiang, ZHOU Jinlong, MA Longtao, et al. Double key strata structure analysis of large mining height longwall face in nearly shallow coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2504-2510.
- [14] 李化敏,蒋东杰,李东印. 特厚煤层大采高综放工作面矿压及顶板破断特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1956-1960.
- LI Huamin, JIANG Dongjie, LI Dongyin. Analysis of ground pressure and roof movement in fully-mechanized top coal caving with large mining height in ultra-thick seam [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1956-1960.
- [15] 于雷,闫少宏. 特厚煤层综放开采顶板运动形式及矿压规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(8): 40-44.
- YU Lei, YAN Shaohong. Study on roof movement form and mine strata pressure law of fully-mechanized top coal caving mining in ultra thick seam [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(8): 40-44.
- [16] 朱卫兵,于斌. 大空间采场远场关键层破断形式及其对矿压显现的影响[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 99-104.
- ZHU Weibing, YU Bin. Breakage form and its effect on strata behavior of far field key stratum in large stope [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 99-104.
- [17] 高浩然. 风积沙厚度对大采高综采面矿压显现影响规律研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2013: 28-37.
- GAO Haoran. Study on thickness of aeolian sand affected on strata behaviors in fully mechanized face of great mining height [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013: 28-37.
- [18] 张文柯. 浅埋煤层工作面过露天矿边坡动载矿压机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2013: 52-60.
- ZHANG Wenke. Study on mechanism of dynamic strata pressure of shallow coal seams face when cross slope of open pit mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013: 52-60.
- [19] 姜福兴,张兴民,杨淑华,等. 长壁采场覆岩空间结构探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 979-984.
- JIANG Fuxing, ZHANG Xingmin, YANG Shuhua, et al. Discussion on overlying strata spatial structures of longwall in coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 979-984.
- [20] 窦林名,贺虎. 煤矿覆岩空间结构 OX-F-T 演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 453-460.
- DOU Linming, HE Hu. Study of OX-F-T spatial structure evolution of overlying strata in coal mines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 453-460.
- [21] 张宏伟,荣海,韩军,等. 特厚煤层不同开采阶段“弱-弱”结构覆岩破坏高度研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(6): 45-50.
- ZHANG Hongwei, RONG Hai, HAN Jun, et al. On the overburden failure height in the extra-thick coal seams due to the “weak-weak” overburden structures in different mining stages [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(6): 45-50.
- [22] 王红伟,伍永平,曹沛沛,等. 大倾角煤层开采大型三维可加载相似模拟试验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1505-1511.
- WANG Hongwei, WU Yongping, CAO Peipei, et al. Large scale loadable 3D-simulation tests on mining steeply dipping seam [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1505-1511.
- [23] 伍永平,胡博胜,解盘石,等. 基于支架-围岩耦合原理的模拟试验液压支架及测控系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 374-382.
- WU Yongping, HU Bosheng, XIE Panshi, et al. Development and application of support and control system for simulating test based on the coupling principle of support-surrounding rocks [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 374-382.
- [24] 姜福兴. 采场覆岩空间结构观点及其应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 30-33.
- JIANG Fuxing. View point spatial structures of overlying strata and its application in coal mine [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 30-33.
- [25] 侯玮,霍海鹰. “C”型覆岩空间结构采场岩层运动规律及动压致灾机理[J]. 煤炭学报, 2012, 37(S2): 269-274.
- HOU Wei, HUO Haiying. Stope rock movement rule of C-shaped of overlying strata spatial structure and disaster-causing mechanism of dynamic pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 269-274.
- [26] 窦林名,何江,曹安业,等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469-1476.
- DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469-1476.
- [27] 霍丙杰,于斌,张宏伟,等. 多层坚硬顶板采场覆岩“拱壳”大结构形成机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11): 18-23.
- HUO Bingjie, YU Bin, ZHANG Hongwei, et al. Study on formation mechanism of arch shell large structure of overburden in coal mining face with multi layer hard roof [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 18-23.
- [28] 姜福兴,刘懿,张益超,等. 采场覆岩的“载荷三带”结构模型及其在防冲领域的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2398-2409.
- JIANG Fuxing, LIU Yi, ZHANG Yichao, et al. A three-zone structure loading model of overlying strata and its application on rock-burst prevention [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2398-2409.
- [29] 于斌,朱卫兵,高瑞,等. 特厚煤层综放开采大空间采场覆岩结构及作用机制[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 571-580.
- YU Bin, ZHU Weibing, GAO Rui, et al. Strata structure and its

- effect mechanism of large space stope for fully-mechanized sublevel caving mining of extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 571-580.
- [30] 来兴平, 崔峰, 曹建涛, 等. 特厚煤体爆破致裂机制及分区破坏的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1642-1649.
LAI Xingping, CUI Feng, CAO Jiantao, et al. Extra-thick coal blasting mechanism and numerical simulation of partition failure[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1642-1649.
- [31] 黄炳香, 赵兴龙, 陈树亮, 等. 坚硬顶板水压致裂控制理论与成套技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 2954-2970.
HUANG Bingxiang, ZHAO Xinglong, CHEN Shuliang, et al. Theory and technology of controlling hard roof with hydraulic fracturing in underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 2954-2970.
- [32] 王家臣, 王蕾, 郭尧. 基于顶板与煤壁控制的支架阻力的确定[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1619-1624.
WANG Jiachen, WANG Lei, GUO Yao. Determining the support capacity based on roof and coal wall control[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1619-1624.
- [33] 徐刚, 宁宇, 闫少宏. 工作面上覆岩层蠕变活动对支架工作阻力的影响[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1354-1359.
XU Gang, NING Yu, YAN Shaohong. Effect of overburden strata creep activities on working face support resistance[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1354-1359.
- [34] 尹希文. 综采工作面支架与围岩双周期动态作用机理研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3072-3080.
YIN Xiwen. Double period dynamic mechanism of support and surrounding rock in fully mechanized mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3072-3080.
- [35] 许家林, 朱卫兵, 鞠金峰. 浅埋煤层开采压架类型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1625-1634.
XU Jialin, ZHU Weibing, JU Jinfeng. Supports crushing types in the longwall mining of shallow seams[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1625-1634.
- [36] 朱卫兵, 于斌, 齐祥瑞, 等. 基于三角板结构模型的远场关键层切顶卸压护巷方法[P]. 中国专利: 2017100985149, 2017-02-23.
- [37] 于斌, 高瑞, 孟祥斌, 等. 大空间远近场结构失稳矿压作用与控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1134-1145.
YU Bin, GAO Rui, MENG Xiangbin, et al. Near-far strata structure instability and associate strata behaviors in large space and corresponding control technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1134-1145.
- [38] JU Jinfeng, XU Jialin, XU Jingmin. A case study of surface borehole wall dislocation induced by top-coal longwall mining[J]. Energies, 2017, 10(12): 2100-2118.