



推荐阅读:

[2025 年中国能源消费及煤炭需求预测](#)

[深部岩体力学与开采理论研究进展](#)

[煤炭开采与岩层运动](#)

[煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想](#)

煤炭开采:

[煤及共伴生资源精准开采科学问题与对策](#)

[煤矿厚煤层高强度开采技术特征及指标研究](#)

[深部煤炭资源采选充绿色化开采理论与技术](#)

[我国放顶煤开采的工程实践与理论进展](#)

[“采充并行”式保水采煤方法](#)

[特厚煤层综放开采地表沉陷预计模型算法改进](#)

[特厚煤层智能化综放开采理论与关键技术架构](#)

[煤矿“采选充+X”绿色化开采技术体系与工程实践](#)

煤岩动力灾害:

[煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用](#)

[煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构](#)

[冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法](#)

[煤矿复合动力灾害危险性实时预警平台研究与展望](#)

[煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展](#)

[基于冲击启动过程的近场围岩冲击危险性电磁波 CT 评估方法](#)

[煤矿冲击地压启动理论及其成套技术体系研究](#)

[基于变分模态分解及能量熵的微震信号降噪方法](#)

[煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究](#)



移动阅读

杨科,池小楼,刘钦节,等.大倾角煤层综采工作面再生顶板与支架失稳机理[J].煤炭学报,2020,45(9):3045-3053.

YANG Ke,CHI Xiaolou,LIU Qinjie,et al.Cataclastic regenerated roof and instability mechanism of support in fully mechanized mining face of steeply dipping seam[J].Journal of China Coal Society,2020,45(9):3045-3053.

大倾角煤层综采工作面再生顶板与支架失稳机理

杨科^{1,2},池小楼^{1,2},刘钦节^{1,2},刘文杰^{1,2},刘帅^{1,3}

(1.安徽理工大学深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室,安徽淮南 232001; 2.安徽理工大学煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室,安徽淮南 232001; 3.东北大学资源与土木工程学院,辽宁沈阳 110819)

摘要:针对底分层煤层开采诱导采场再生顶板二次破坏和支架失稳特点,以潘北矿1212(3)再生顶板下大倾角煤层工作面为例,综合运用井下钻孔三维成像对再生顶板结构实测、基于声发射监测技术的相似物理模拟和理论分析3种技术手段,对大倾角煤层综采面再生顶板顶板结构、垮落特征以及支架失稳模式进行了研究。通过对底分层再生顶板施工的3个钻孔进行孔壁成像确定了底分层再生顶板胶结压实状态,结合相似物理模拟确定了煤层回采过程中的再生顶板垮落规律,并采用理论计算分析了再生顶板运动对采场支架稳定性的影响程度。结果表明:①受煤层倾角影响,再生顶板压实程度呈现出采场下部高于采场中部,采场上部压实程度最弱的非对称压实特征;②底分层顶板3~5 m范围内岩层易在支架间冒漏,此范围再生顶板是改变支架位态的关键岩层;③底分层再生顶板破断失稳经历了6个阶段,基于声发射信号强弱程度确定了采场下部再生顶板高位悬臂梁的断裂和上部再生顶板的滑移是引起底分层顶板破碎严重的主因;④基于现场支架载荷数据,验证了相似物理模拟准确性,标划出采场上部是支架稳定性重点防控区域;⑤在综合厘定再生顶板-支架作用关系基础上,构建再生顶板运动下的大倾角煤层采场支架倾倒和下滑失稳模型,分析支架受力特征,获得支架在倾倒、下滑临界状态下的架间作用力分别为-126.8 kN,86.2 kN,揭示了再生顶板载荷作用位置对支架稳定性影响显著;⑥探讨了护帮、护顶和护架的三位一体协同支护体系。

关键词:再生顶板;支架失稳;综采工作面;大倾角煤层;围岩破坏

中图分类号:TD325

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2020)09-3045-09

Cataclastic regenerated roof and instability mechanism of support in fully mechanized mining face of steeply dipping seam

YANG Ke^{1,2}, CHI Xiaolou^{1,2}, LIU Qinjie^{1,2}, LIU Wenjie^{1,2}, LIU Shuai^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Key Laboratory of Mining Coal Safety and Efficiently Constructed by Anhui Province and Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 3. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Based on the characteristics of the steeply dipping 1212(3) working face with the cataclastic regenerative roof of Panbei mine, the characteristics of secondary failure of surrounding rock and instability of support caused by coal seam mining have been discussed. The three-dimensional borehole imaging, similar simulation with acoustic emission and theoretical analysis have been used to study the structure and caving characteristics of roof and the support in-

收稿日期:2019-06-26 修回日期:2020-01-07 责任编辑:常琛 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2019.0854

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51634007);安徽理工大学研究生创新基金资助项目(2019CX1003);安徽省学术和技术带头人科研活动资助项目(2019D230)

作者简介:杨科(1979—),男,四川叙永人,教授,博士。E-mail:yksp2003@163.com

通讯作者:池小楼(1992—),男,山东菏泽人,博士研究生。E-mail:2937680510@qq.com

stability model of fully mechanized mining face with steeply dipping seam. The consolidation and compaction state of cataclastic regenerative roof were described by the image of three boreholes. Then, similar simulation with acoustic emission and theoretical analysis method were used to explore the characteristics of the roof caving and sliding and the mechanism of support instability. The study shows that: ① affected by inclination angle, the characteristics of the compaction degree of cataclastic regenerated roof was that the lower part of the stope was higher than the middle part's and the upper part of the stope with the weakest compaction degree. ② In the range of 3–5 m of cataclastic regenerated roof which was the key layer to change the position and state of support was easy to leak between the supports. ③ The breaking of cataclastic regenerated roof had experienced six stages. Based on the strength of acoustic emission signal, the main causes of the fracture and instability of the cataclastic regenerated roof were the fracture of the upper cantilever beam and the slip of the cataclastic regenerated roof. ④ The upper part of stope was marked as the key prevention and control area of support stability, based on the field support load data which had verified the accuracy of similar physical simulation. ⑤ Based on the comprehensive analysis of the relationship between cataclastic regenerated roof and the support, the dumping and sliding instability models of steeply dipping stope under the cataclastic regenerated roof was constructed. The force characteristics of the support were analyzed and the inter-forces of the support under the critical state of tipping and sliding were -126.8 kN and 86.2 kN, respectively, which revealed that the position of cataclastic regenerated roof load had a significant influence on the stability of the support. ⑤ The trinity coordinated support system was discussed which included the protection of coal wall, the control of roof and the stability of support.

Key words: cataclastic regenerated roof; support instability; fully mechanized mining face; steeply dipping seam; surrounding rock failure

在我国,大倾角($35^{\circ} \sim 55^{\circ}$)赋存条件煤炭资源储量较多,分布范围较广^[1]。近年来,随易采煤炭资源趋于枯竭,愈多矿井开采赋存条件复杂的大倾角煤层。对于大倾角煤层,众多学者对采场围岩运移^[2-4]、采场空间支承压力演化^[5-7]、煤壁片帮^[8-10]以及支架稳定性^[11-15]方面做了系统研究,揭示了大倾角采场围岩非对称空间梯阶状垮落特征,获得了岩层破坏滑移易形成倾向与反倾向堆砌结构。由于大倾角煤层采场空间支承压力受矸石的非均匀充填和上覆岩层自重倾向的分解影响,表现出“勺型”的应力拱形态。受煤层倾角影响,煤壁片帮具有区域多发性及交替演变性,具体表现为工作面倾向中部为煤壁片帮高发区,其与采场围岩的非对称受载相一致。而在矿压控制中大倾角煤层采场液压支架的防倒防滑是其关键技术难题,通过建立架间失稳力学模型,揭示支架的力学失稳机理,结合覆岩非对称垮落及空间支承压力分布制定了系列支架防倒防滑措施。

上述研究成果对大倾角煤层采场围岩特征及支架稳定性具有一定的理论指导作用,但受地质构造和煤层赋存条件影响,大倾角煤层顶板特性存在较大差异,其中软弱破碎的再生顶板就是大倾角煤层开采围岩控制的技术难题之一。已有再生顶板的研究主要集中在巷道围岩大变形力学模型及支护系统改造^[16-17]和大倾角煤层软弱顶板巷道大变形关键部位确定及影响因素上^[18],对于再生顶板下采场围岩破

坏特征,尤其是大倾角煤层采场围岩冒落滑移特征研究较少。

相似物理模拟试验中,有关学者成功运用声发射监测到断层滑移失稳时的事件数及其能量率,得到了断层滑移失稳的前兆信息,揭示了断层活化前后采场矿压显现特征及其动力响应规律;同时在急倾斜煤岩体的动力失稳时空演化特征方面,声发射无损检测技术也得到了较好的发挥^[19-22]。综上所述,笔者聚焦鲜有报道的再生顶板下大倾角煤层开采,运用现场实测、相似模拟声发射监测和理论分析手段,基于现场钻孔窥视技术,探索了再生顶板下大倾角煤层采场围岩破坏特征及支架失稳模式。

1 工作面概况和开采条件

1212(3)工作面为潘北煤矿13号煤层首个回采工作面,工作面标高为 $-375 \sim -495$ m,煤层平均倾角 40° ,平均厚度 4.4 m,煤层赋存稳定,煤的硬度系数 f 值为 $0.3 \sim 0.5$;直接顶多为泥岩、砂质泥岩,厚度 $2.5 \sim 6.8$ m,平均 4.7 m,硬度系数 f 值为 3 ;基本底为泥岩,平均厚度 3.0 m,属于大倾角“三软”煤层。13号煤层分上、下两层开采,上分层工作面倾斜长度 120 m,采高 2 m,已于2015年回采完毕。底分层工作面布置在上分层采空区的倾斜下部区域,具体为:底分层运输巷距上分层运输巷 5 m,回风巷距上分层回风巷 25 m。底分层回采巷

道正常掘进,采用“锚网索+深浅孔注浆”多层次组合控制方案及时支护外露再生顶板。底分层工作面倾斜长度90 m,采高2.4 m,两煤层回采时间间隔为2 a。工作面布置如图1所示。煤层采用走向长壁倾斜分层综合机械化开采方法进行回采,全部垮落法管理顶板。底分层工作面回采期间煤层顶板破碎,架间和架前漏冒顶严重,支架出现倾倒、下滑失稳现象,严重制约了安全开采。

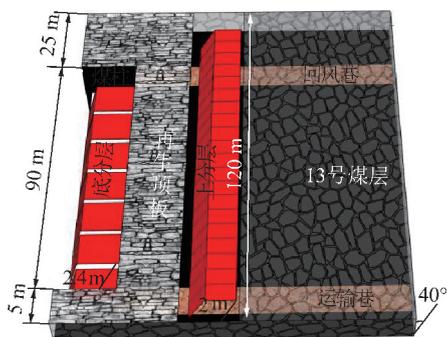


图1 工作面布置

Fig. 1 Working face layout

2 底分层顶板实测

2.1 钻孔布置

为摸清再生顶板未受底分层回采采动应力影响下的胶结压实状况,在1212(3)底分层工作面开切眼处的顶板中布置3个角度为 0° (竖直往上)、编号为1~3号、孔深8 m和直径32 mm的钻孔。底分层工作面开切眼开挖后支架即安装到位,因此钻孔均布置在两支架顶梁的较大间隙中。受倾角影响,上分层开采后顶板的垮落呈非对称特征(上部垮落程度高于下部),继而导致底分层工作面顶板结构也具有分区特点,为再现底分层工作面顶板的实际赋存状态,定义工作面倾向自回风巷实体煤侧起0~30 m为工作面上部,30~60 m为工作面中部,60~90 m为工作面下部。钻孔1号布置在距回风巷实体煤侧15 m处,钻孔2号布置在距回风巷实体煤侧45 m处,钻孔3号布置在距回风巷实体煤侧75 m处。使用TYGD10矿用本安型钻孔窥视仪对孔壁变形实探,获得孔壁围岩变形形态。钻孔具体位置及孔壁形态如图2所示。

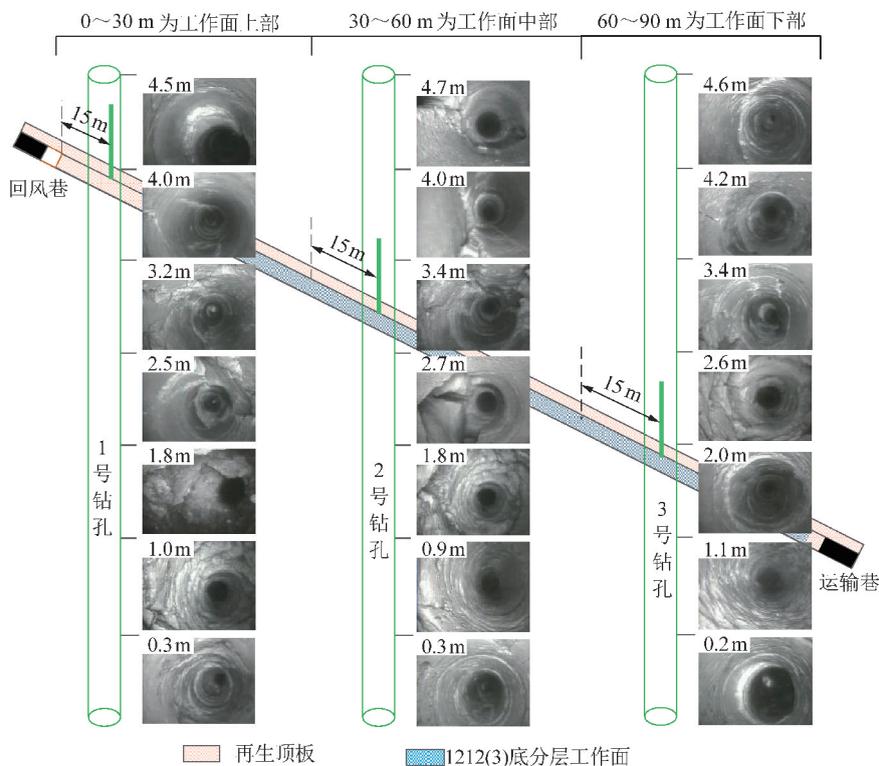


图2 孔壁不同高度形态

Fig. 2 Shapes of hole walls at different heights

2.2 钻孔孔壁形态描述

3个钻孔孔壁受上分层采动和煤层倾角的影响,出现了不同程度的破碎,具体表现为:1号钻孔在0.1~2.0 m孔壁围岩破碎程度随孔的高度增大而减小,2.5~4.5 m孔壁围岩破碎程度减小,围岩完整性

变大,4.5 m处孔壁上下破碎程度出现分层,下部较为破碎,上部孔壁完整;2号钻孔在0.1~0.3 m孔壁围岩压实程度较钻孔1号密实,0.9~2.1 m孔壁围岩破碎程度随孔的高度增大而减小,2.7~4.7 m孔壁围岩完整度增大,相较于钻孔1号此高度段孔壁围

岩较为破碎;3号钻孔在0.1~2.0 m孔壁围岩压实程度较1号钻孔和2号钻孔密实,2.0~2.6 m孔壁围岩完整性较小,孔壁围岩较为破碎,2.6 m后完整性呈增大趋势。综上可知,底分层再生顶板压实程度为底分层下部>底分层中部>底分层上部,呈非对称压实特征。在再生顶板垂直方向,底分层上部0.5 m、中部1.0 m、下部2.0 m范围内的压实胶结程度较好;底分层上部2.0~2.5 m、中部2.1~2.5 m、下部2.3~2.7 m内岩块尺寸相对较大,压实及胶结程度一般。1号钻孔在3.5~4.5 m、3号钻孔在3.4~4.6 m孔壁围岩较为完整,个别位置裂隙发育。

3 采场围岩破坏冒落相似模拟

3.1 方案设计

采用相似材料模拟试验研究底分层工作面顶板围岩冒落滑移过程,试验选用的相似模拟装置尺寸为长×宽×高=2.0 m×0.2 m×2.0 m。试验以细河沙为骨料,石膏、石灰为胶结物,水为黏结剂。为确定相似

材料配比,首先建立相似模拟材料的初始配比,对模拟材料进行加权混合,利用这些材料制备柱状标准试样,并对这些试样进行力学测试,通过筛选和比较,最终确定相似材料的配比。工作面顶底板不同岩性物理力学参数如图3所示,相似材料配比见表1。云母模拟原生分层,采用人工开挖模拟工作面煤层回采,不同顶底板高度涂抹不同颜色加以区分。物理模型中预先埋设9个声发射探头,用以监测顶板断裂过程中所释放弹性波。具体为:正面6个声发射探头,位置在距上分层两侧巷道上方10 cm和20 cm处,背面3个声发射探头作为辅助监测。为校对声发射阈值设定,在开挖上分层时设置系列梯度的声发射阈值,最终确定90 dB时可监测到强烈的相似材料断裂声发射信号。因此,90 dB作为开挖动作的上限声发射信号接收阈值,以便于后期数据筛选。铺设的相似材料模型、声发射监测探头布置位置及模型设计满足的相似条件如图4所示(各相似常数式中下标参数p表示原型,下标参数m表示模型)。

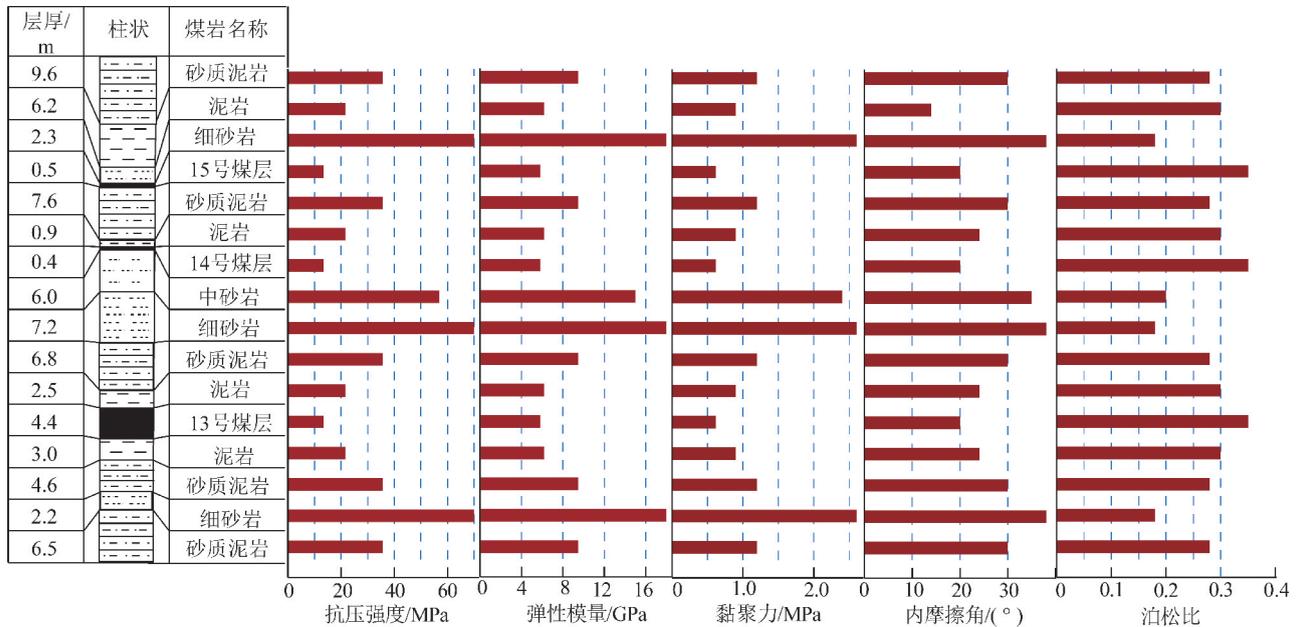


图3 岩层柱状及物理力学参数

Fig. 3 Rock column and physical and mechanical parameters

表1 不同岩性配比

Table 1 Different lithology ratios

岩性	配比	质量/kg			
		细河沙	石灰	石膏	水
中砂岩	6:6:4	35.12	3.51	2.34	4.10
细砂岩	6:6:4	34.48	3.45	2.30	4.02
砂质泥岩	7:7:3	47.70	4.77	2.04	5.45
泥岩	10:7:3	14.23	1.00	0.42	1.56
13号煤	10:5:5	35.10	1.76	1.76	3.86
泥岩	10:7:3	16.27	1.14	0.49	1.79

大倾角工作面现场割煤机割煤顺序为自上而下,液压支架移架顺序为自下而上,工作面上覆顶板垮落滑移发生在移架阶段,为真实再现大倾角工作面顶板垮落特征,相似模拟试验的挖煤顺序为自下而上。相似模拟试验中开挖步距为10 cm,共开挖9次。每次开挖时间约1 min。声发射监测时间自底分层开挖至覆岩稳定。

3.2 顶板围岩破坏特征

上分层开挖后,根据时间相似比,待上覆岩层稳定后继续开挖底分层,如图5所示。底分层煤层自下

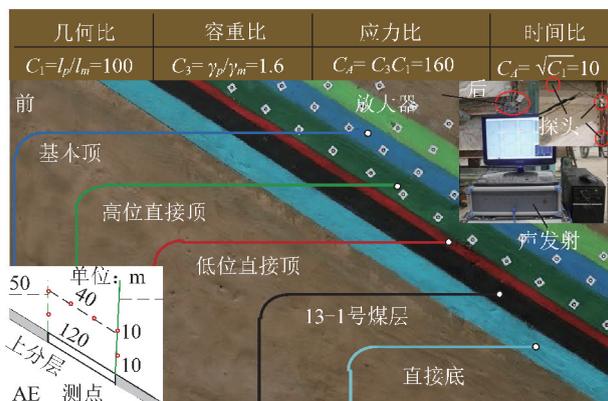


图4 物理模型

Fig. 4 Physical model

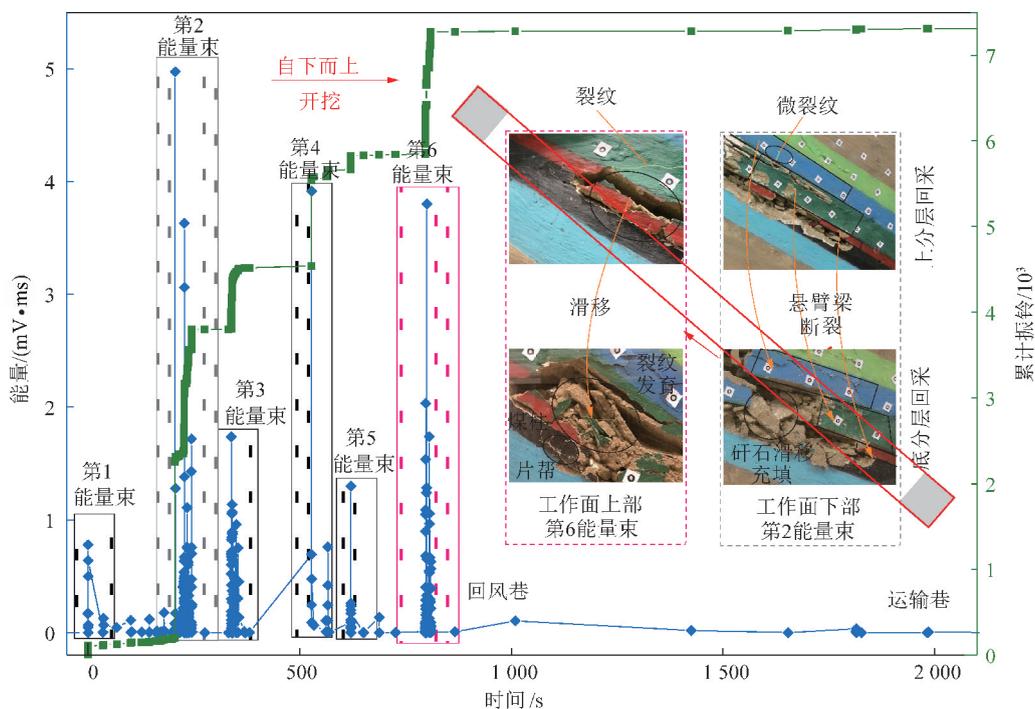


图5 底分层再生顶板破坏损伤特征

Fig. 5 Damage characteristics of the bottom layered regenerated roof

根据再生顶板冒落转移特征,结合声发射能量和累计振铃演化规律可知,煤层自下而上开挖过程中,采场围岩破坏失稳经历了6个阶段,具体为:底分层工作面自下而上回采过程中,采场下部再生顶板低位悬臂梁(红色部分)断裂,声发射表现为第1能量集中信号束,信号强度较小。随上行开挖矸石下滑充填,上分层开挖后高位直接顶断裂后形成的高位悬臂梁(绿色部分)断裂,形成第2能量束,信号强度最高。第2阶段断裂矸石下滑,形成第3声发射能量束。此时采场上方供岩层移动的自由空间增大,引起上分层开挖后裂隙发育的基本顶沿较大裂纹破断垮落,形成新的悬臂梁(蓝色部分)结构,声发射监测到第4能量束,但强度弱于第2阶段岩层断裂能量束。

而上回采过程中,上分层回采后经压实的再生顶板下部随即冒落,在倾角影响下,矸石向下滑移充填采空区。受矸石滑移影响,工作面上部区域存在自由空间高度,再生顶板在上覆岩层重力、采动应力和采场四周支承压力叠加作用下继续垮落滑移,上行开挖至上端头后,煤柱上方的再生顶板在无任何支护下出现滑移破坏,煤柱倾斜下部出现片帮,再生顶板的上位岩层中裂纹发育。煤层采出后,对于底分层工作面下部而言,再生顶板垮落滑移,上分层形成的低位悬臂梁断裂,揭露上位岩层,其下方存在自由空间高度,悬臂梁继续断裂,揭露更高层位岩层,在上覆岩层载荷作用下,只要高层位岩层下方存在自由空间高度,岩层就会断裂,形成新的悬臂梁结构。

破断垮落矸石继续下滑,由于工作面下部充填已较为密实,在倾向上充填高度接近中下部,因此监测到矸石下滑第5能量束较第3下滑充填能量束弱。当上行开挖至采场上部,在采动应力及上覆岩层载荷作用下,煤柱上方再生顶板在无任何支护下继续剪切回转变破坏,声发射出现第6能量束,强度仅次于第2能量束。

综合分析可知,采场下部悬臂梁断裂与形成过程的能量束最高,各阶段的累计振铃出现渐进爬升趋势,第2阶段的渐进升高幅度最大,岩体损伤程度亦最高。悬臂梁载荷全部施加在支架之上,致使采场下部支架载荷升高,但较上分层开采后形成的悬臂梁结构相比,底分层开采形成的悬臂梁结构小得多,对支

架施加的载荷降低。同时发现在2次采动影响下,底分层顶板破碎程度加剧,上分层开挖后高位直接顶断裂后形成的高位悬臂梁(绿色部分)断裂,是引起工作面下部顶板破碎的主因;煤柱上方再生顶板在无任何支护下继续滑移破坏,是引起工作面上部顶板破碎的主因。工作面上部区域存在自由空间,会导致工作面上部支架接顶不实,易引起支架失稳。

4 支架-围岩关系分析

底分层倾角为 40° ,顶板破碎,煤层回采过程中支架歪斜严重,架间距增大。结合钻孔孔壁形态可知,底分层上部 0.5 m 、中部 1.0 m 、下部 2.0 m 范围内岩层随采随冒,块度小,易在架间冒落,为上部较大块度矸石冒漏提供了自由空间。因矸石有自由运动空间,底分层上部 $2.0\sim 2.5\text{ m}$ 、中部 $2.1\sim 2.5\text{ m}$ 、下部 $2.3\sim 2.7\text{ m}$ 范围内较大块度矸石继续在架间和架前冒漏,引起更高层位破碎岩层断裂冒落。实探表明,底分层再生顶板 3 m 范围内为架间冒漏矸石主要来源岩层(相似模拟试验中红色部分及绿色下部), 5 m 以上为冒落、滑移大块度矸石的主要来源岩层,支架易受顶板冒落的大块度矸石推移而失稳。

综合相似模拟可知,底分层回采过程中悬臂梁的断裂与形成均对支架造成冲击,断裂后的岩层破断成更大块度矸石沿工作面倾向迅速下滑,支架上方顶板运动空间增大,引起底分层上部区域煤柱上方的再生顶板滑移,底分层上部出现空顶,支架空载。为佐证大倾角煤层底分层回采再生顶板的垮落、滑移特征,实测了底分层15号支架(采场下部),34号支架(采场中部)和51号支架(采场上部)回采期间工作阻力,如图6所示。采场中下部支架工阻高于上部,下部最大,采场上部工阻整体较小,表现为倾斜方向支架载荷的非对称特征,这与相似模拟结果具有一致性。同时底分层上部再生顶板在无任何支护下继续滑移,空顶范围增大,支架空载,这是采场上部支架工阻较小的原因。因此,采场上部亦是支护系统稳定控制的重点区域。

基于上述分析可知,沿工作面倾斜方向,底分层再生顶板大面积冒落、滑移是引起再生顶板下大倾角采场支架失稳的主要诱因。此时,再生顶板运动引起支架的位态改变,支架发生转动,如图7所示。

5 采场支架稳定性分析

底分层底板为完整岩层,顶板为破碎的再生岩层。工作面回采过程中,底板较为稳定,而再生顶板沿倾向滑移严重,进而导致支架发生下滑和顺向转

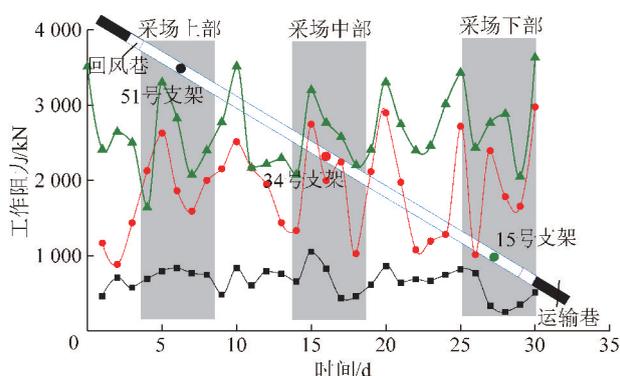


图6 底分层不同位置支架载荷

Fig. 6 Support load of different positions of bottom layer

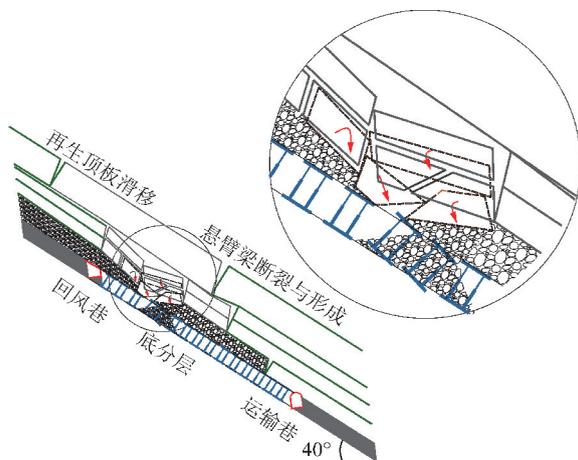


图7 再生顶板与支架作用关系

Fig. 7 Interaction between regenerated roof and support. 结合文献[23],建立如图8所示的支架倾向力学模型,研究再生顶板对支架稳定性的影响。

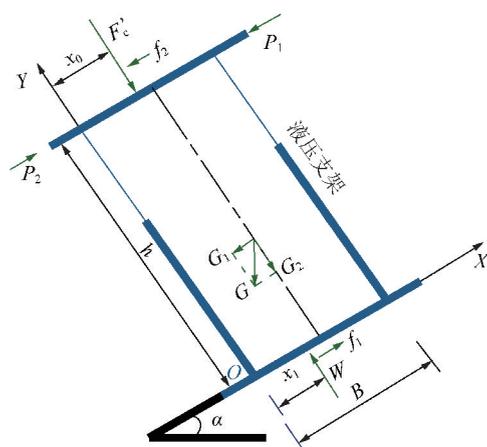


图8 支架受力模型

Fig. 8 Mechanical model of support

图8中,支架逆向转动为正, α 为煤层倾角, $(^\circ)$; h 为采高, m ; B 为支架底座宽度, m ; F'_c 为再生顶板对支架的法向载荷, kN ; f_2 为支架与再生顶板间的摩擦力, kN ; x_0 为再生顶板法向载荷作用位置, m ; W 为底板对支架的法向载荷, kN ; f_1 为支架与底板间摩

擦力, kN; x_1 为再生顶板法向载荷作用位置, m; P_1, P_2 为相邻支架间作用载荷; G 为支架自重, kN; μ_1, μ_2 为顶底板与支架间摩擦因数。

支架受到的再生顶板作用力 F_c 计算式

$$F_c = \gamma H L_z B \quad (1)$$

式中, γ 为容重, kN/m³; H 为再生顶板厚度, m; L_z 为支架支护长度, m。

煤层回采期间, 当再生顶板对支架的法向载荷 F'_c 作用位置 $x_0 = B$, 底板对支架的法向载荷 W 移动至 $x_1 = 0$ 时, 支架处于倾覆极限临界状态。根据力矩平衡条件, 此时有

$$\left\{ h f_2 + \frac{h}{2} G_1 - h(P_2 - P_1) - B F'_c - \frac{B}{2} G_2 = 0 \right.$$

$$F'_c = F_c \cos \alpha$$

$$\left. \left\{ f_2 = \mu_2 F'_c \cos \alpha \right. \right. \quad (2)$$

$$G_1 = G \sin \alpha$$

$$\left. \left\{ G_2 = G \cos \alpha \right. \right.$$

当再生顶板对支架的法向载荷 F'_c 作用位置 $x_0 = B/2$, 底板对支架的法向载荷 W 移动至 $x_1 = B/2$ 时, 支架在再生顶板作用力 F_c , 自重 G 作用下有沿工作面倾向下滑的趋势, 支架处于下滑临界状态, 此时有

$$\left\{ (P_2 - P_1) + f_1 - G_1 - f_2 = 0 \right.$$

$$\left. \left\{ W - F'_c - G_2 = 0 \right. \right. \quad (3)$$

$$\left. \left\{ f_1 = \mu_1 W \right. \right.$$

根据底分层工程地质条件和支架技术参数, 取 $\alpha = 40^\circ$, $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, $H = 4 \text{ m}$, $L_z = 5 \text{ m}$, $B = 1.5 \text{ m}$, $h = 2.4 \text{ m}$, $\mu_1, \mu_2 = 0.37$, $G = 240 \text{ kN}$ 。令 $P = P_2 - P_1$, 把上述具体数值代入式(1)~(3)得到支架在倾覆模式下支架间作用力 P 为 -126.8 kN、支架下滑模式下支架间作用力 P 为 86.2 kN。综合分析可知, 随再生顶板载荷作用位置 x_0 由 0 增大到 B 时, 支架的位态发生改变, 支架运动模式由逆向转动变为顺向转动。底分层采用 ZZ6 400/18/38 型支撑掩护式支架, 在回采过程中应时刻监测支架侧护板千斤顶的支护力, 为防止支架下滑, 由支架侧护板千斤顶提供的架间作用力最小应达到 86.2 kN。

6 支架-围岩稳定控制分析

煤炭采出后, 再生顶板受 2 次采动影响较为破碎, 破碎垮落顶板沿工作面倾向下滑, 采场上部支架空顶, 载荷减小, 出现倒滑失稳。为控制工作面回采系统稳定, 从再生顶板下大倾角煤层综采工作面支架-围岩失稳机理出发, 提出了融护帮、护顶和护架

为一体的三位协同支护体系, 如图 9 所示。具体为: 底分层上风巷煤柱侧打高强中空注浆锚索, 防治移架上端头后煤柱上方再生顶板继续剪切滑移; 改用菱形金属网(刚性)作为破碎顶板防冒顶材料, 铺设在支架顶梁之上, 垂于煤壁; 采场上部支架每 3 架顶梁和底座及六架四连杆处设置防倒、滑千斤顶防治支架失稳引起整个支护系统失效。

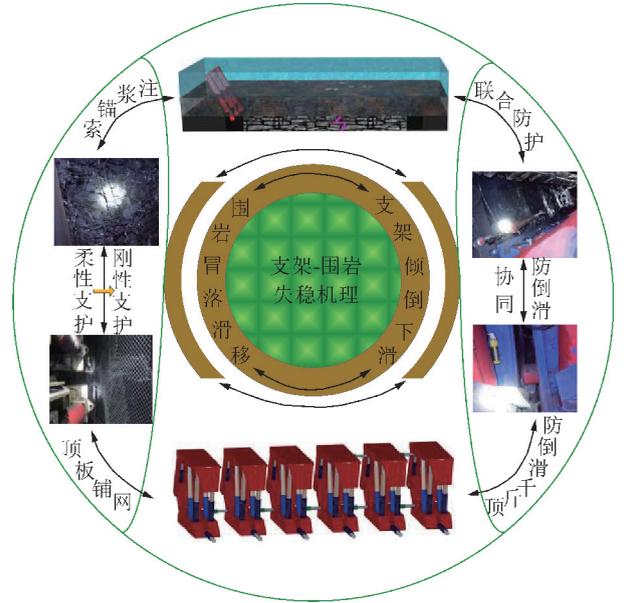


图9 “三位一体”协同支护

Fig. 9 Trinity coordinated support

7 结论

(1) 基于现场钻孔实探, 描绘出再生顶板下部>中部>上部的非对称胶结压实特征。底分层回采过程中, 上覆岩层经历了 6 个阶段的破断失稳, 下部高位悬臂梁断裂声发射能量束集中程度最高, 上部再生顶板剪切回转滑移声发射能量束集中程度其次。

(2) 再生顶板高位悬臂梁的断裂和上部再生顶板的剪切滑移是引起底分层顶板破碎严重的原因; 底分层下部各层位形成的悬臂梁结构是致使采场下部支架载荷升高的原因; 上部采场空顶是引起上部支架载荷较小的原因。

(3) 结合现场矿压数据, 得到了采场上部支架为重点防控对象, 确定采场支架降架减阻的移架方式。再生顶板破坏演化过程中, 支架受再生顶板滑移作用, 基于此推导了支架临界失稳状态侧护板千斤顶的支护力, 揭示了再生顶板载荷作用位置对支架运动方向的影响机制。

(4) 基于大倾角煤层采场再生顶板结构和支架稳定性分析, 探讨了护帮、护顶和护架为一体的三位

协同支护体系。

参考文献 (References):

- [1] 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, 2006:1-23.
- [2] 伍永平, 解盘石, 任世广. 大倾角煤层开采围岩空间非对称结构特征分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2):182-184.
WU Yongping, XIE Panshi, REN Shiguang. Analysis of asymmetric structure around coal face of steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2):182-184.
- [3] 解盘石, 伍永平, 罗生虎, 等. 大倾角大采高采场倾向梯阶结构演化及稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5):953-959.
XIE Panshi, WU Yongping, LUO Shenghu, et al. Structural evolution of ladder roof and its stability analyses for a fully-mechanized working face with a large mining height in steeply inclined coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(5):953-959.
- [4] 伍永平, 解盘石, 王红伟, 等. 大倾角煤层开采覆岩空间倾斜砌体结构[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8):1252-1256.
WU Yongping, XIE Panshi, WANG Hongwei, et al. Incline masonry structure around the coal face of steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8):1252-1256.
- [5] 杨科, 孔祥勇, 陆伟, 等. 近距离采空区下大倾角厚煤层开采矿压显现规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2):4278-4285.
YANG Ke, KONG Xiangyong, LU Wei, et al. Study of strata pressure behaviors with longwall mining in large inclination and thick coal seam under closed distance mined gob[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2):4278-4285.
- [6] 尹光志, 李小双, 郭文兵. 大倾角煤层工作面采场围岩矿压分布规律光弹性模拟模型试验及现场实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1):3336-3343.
YIN Guangzhi, LI Xiaoshuang, GUO Wenbing. Photo-elastic experimental and field measurement study of ground pressure of surrounding rock of large dip angle working coal face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1):3336-3343.
- [7] 杨科, 陆伟, 潘桂如, 等. 复杂条件大倾角大采高旋转综采矿压显现规律及其控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2):199-205.
YANG Ke, LU Wei, PAN Guiru, et al. Investigation into strata behaviours and ground control of high height rotary longwall mining in large inclined angle coal seam under complicated geological conditions[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(2):199-205.
- [8] 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):331-337.
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):331-337.
- [9] 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.
- [10] 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]. 采矿与安全工程学报, 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.
- [11] 伍永平, 负东风. 大倾角综采支架稳定性控制[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999, 16(3/4):82-85.
WU Yongping, YUN Dongfeng. The stability control of support at top caving face with steep seam[J]. Ground Pressure and Strata Control, 1999, 16(3/4):82-85.
- [12] 杨科, 池小楼, 刘帅. 大倾角煤层综采工作面液压支架失稳机理与控制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7):1821-1828.
YANG Ke, CHI Xiaolou, LIU Shuai. Instability mechanism and control of hydraulic support in fully mechanized longwall mining with large dip[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7):1821-1828.
- [13] 王金安, 焦军灵, 程文东, 等. 论大倾角长壁综放工作面圆弧段对支架稳定性的控制作用[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10):2361-2369.
WANG Jin'an, JIAO Junling, CHENG Wendong, et al. Roles of arc segment in controlling the support stability in longwall fully mechanized top coal caving mining face of steeply inclined coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10):2361-2369.
- [14] 张东升, 吴鑫, 张炜, 等. 大倾角工作面特殊开采时期支架稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(3):331-336.
ZHANG Dongsheng, WU Xin, ZHANG Wei, et al. Stability analysis on support in large inclined coalface during special mining period[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2013, 30(3):331-336.
- [15] 林忠明, 陈忠辉, 谢俊文, 等. 大倾角综放开采液压支架稳定性分析与控制措施[J]. 煤炭学报, 2004, 29(3):264-268.
LIN Zhongming, CHEN Zhonghui, XIE Junwen, et al. Stability analysis and control measures of powered supports in greater inclined full-mechanized coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(3):264-268.
- [16] 王平, 冯涛, 蒋廷良, 等. 软弱再生顶板巷道围岩失稳机理及其控制原理与技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(10):2953-2965.
WANG Ping, FENG Tao, JIANG Yunliang, et al. Control principle and technology and instability mechanism of surrounding rock in weak regenerated roof[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(10):2953-2965.
- [17] 马文强, 王同旭, 张恒. 再生顶板结构及巷道注-锚支护研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4):693-700.
MA Wenqiang, WANG Tongxu, ZHANG Heng. Regenerated roof structure and grouting-bolt support of roadway[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(4):693-700.
- [18] 王旭锋, 汪洋, 张东升. 大倾角“三软”煤层巷道关键部位强化

- 支护技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 208-213.
- WANG Xufeng, WANG Yang, ZHANG Dongsheng. Enhanced support technology for key area of the roadway in large inclined angle "three-soft" coal seam[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(2): 208-213.
- [19] 王宏伟, 邵明明, 王刚, 等. 开采扰动下逆冲断层滑动面应力场演化特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2318-2327.
- WANG Hongwei, SHAO Mingming, WANG Gang, et al. Characteristics of stress evolution on the thrust fault plane during the coal mining [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2318-2327.
- [20] 赵善坤. 采动影响下逆冲断层“活化”特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(2): 354-360.
- ZHAO Shankun. Experiments on the characteristics of thrust fault activation influenced by mining operation [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2016, 33(2): 354-360.
- [21] 来兴平, 杨毅然, 王宁波, 等. 急斜煤岩体动力失稳时空演化特征综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 583-592.
- LAI Xingping, YANG Yiran, WANG Ningbo, et al. Comprehensive analysis to temporal-spatial variation of dynamic instability of steeply inclined coal-rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 583-592.
- [22] 来兴平, 孙欢, 单鹏飞, 等. 急倾斜坚硬岩柱动态破裂“声-热”演化特征试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2285-2292.
- LAI Xingping, SUN Huan, SHAN Pengfei, et al. Acoustic emission and temperature variation in failure process of hard rock pillars sandwiched between thick coal seams extremely steep [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2285-2292.
- [23] 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.
- 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.