

急倾斜巨厚煤层复杂空间结构区微震时空演化规律及诱冲机理

崔峰^{1,2,3}, 张随林^{1,2}, 刘旭东⁴, 来兴平^{1,2}, 姬松涛^{1,2}, 冯攀飞⁴, 贾冲^{1,2}, 陆长亮^{1,2}, 王昊^{1,2}

(1. 西安科技大学能源学院, 陕西西安 710054; 2. 西安科技大学教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室, 陕西西安 710054; 3. 自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西西安 710021; 4. 国家能源集团新疆能源公司乌东煤矿, 新疆乌鲁木齐 830000)

摘要:煤矿冲击地压灾害的发生与空间结构密切相关,尤其在复杂空间结构区灾害发生更频繁。掌握煤层开采复杂空间结构区煤岩灾变规律并揭示其发生机制对于冲击地压防控具有重要意义。以乌东煤矿为研究背景,采用数值模拟、微震监测、理论分析等方法,研究了岩柱应力异常尺寸效应,分析了复杂空间结构区微震时空演化规律,揭示了复杂空间结构下冲击地压发生机理,评估了煤层开采不同区域的冲击危险性。研究表明:①急倾斜岩柱厚度更窄、出露高度更大其撬动效应更强,岩厚变异应力异常形成5个分区。②岩柱厚度更窄区域微震频次更多,能量更高,时空活动度更强,离散性更高。高应力区、应力梯度区、应力平稳区依次呈现“低频次-高能量”、“高频次-高能量”、“低频次-低能量”的微震响应特征。③特殊空间结构区域微震事件簇集且能级增大,时空活动度及离散性陡增,尤其在结构边缘该特征更明显,能量积聚及释放速率增大,冲击地压发生的概率及强度更高。位于岩柱更窄区域的特殊空间结构内微震活动更剧烈。④岩柱厚度越窄(煤柱高度越大)则岩柱向深的弯矩及能量增长速率越快,冲击危险性更高。依据结构面强度效应推断出断裂带发生滑移错动,是能量积聚与释放的优势区域。揭示冲击地压发生机理为高静载及低临界载荷共同作用,基于应力集中特征评估煤层开采不同区域的冲击危险性。

关键词:急倾斜巨厚煤层;复杂空间结构;微震时空演化规律;冲击地压

中图分类号:TD324 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2024)04-1786-18

Temporal and spatial evolution law of microseisms and induced impact mechanism in complex spatial structure area of steep and extremely thick coal seam

CUI Feng^{1,2,3}, ZHANG Suilin^{1,2}, LIU Xudong⁴, LAI Xingping^{1,2}, JI Songtao^{1,2}, FENG Panfei⁴, JIA Chong^{1,2}, LU Changliang^{1,2}, WANG Hao^{1,2}

(1. College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mines and Hazard Prevention of Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710021, China; 4. Wudong Coal Mine, CHN Energy Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

Abstract: The occurrence of coal mine rock burst disasters is closely related to the spatial structure, especially in the com-

收稿日期:2023-11-09 修回日期:2024-01-24 责任编辑:王凡 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2023.1477

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874231);陕西省创新能力支撑计划资助项目(2020KJXX-006);陕西省自然科学基金基础研究计划企业联合基金资助项目(2019JLZ-04)

作者简介:崔峰(1986—),男,河南新乡人,教授。E-mail: cuifeng9418@163.com

通讯作者:张随林(1997—),男,甘肃定西人,硕士研究生。E-mail: 3500624578@qq.com

引用格式:崔峰,张随林,刘旭东,等.急倾斜巨厚煤层复杂空间结构区微震时空演化规律及诱冲机理[J].煤炭学报,2024,49(4):1786-1803.

CUI Feng, ZHANG Suilin, LIU Xudong, et al. Temporal and spatial evolution law of microseisms and induced impact mechanism in complex spatial structure area of steep and extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1786-1803.



移动阅读

plex spatial structure area. It is of great significance to master the law of coal and rock catastrophe and reveal its mechanism in the complex spatial structure area of coal seam mining for the prevention and control of rock burst. Taking the Wudong Coal Mine as the research background, using numerical simulation, micro-seismic monitoring, theoretical analysis and other methods, the abnormal size effect of rock pillar stress is studied, the temporal and spatial evolution law of microseisms in the complex spatial structure area is analyzed, the mechanism of rock burst under the complex spatial structure is revealed, and the impact risk in the different areas of coal mining is evaluated. The research results show that: ① The steeply inclined rock pillar with narrower thickness and higher exposed height has stronger prying effect, and the abnormal stress of rock thickness variation forms five divisions. ② The area with narrower rock pillar thickness has more micro-seismic frequency, higher energy, stronger spatio-temporal activity and higher dispersion. The high stress region, the stress gradient region and the stress plateau region show the micro-seismic response characteristics of “low frequency-high energy”, “high frequency-high energy” and “low frequency-low energy” in turn. ③ The micro-seismic events in special spatial structure area are clustered and the energy level increases, and the temporal and spatial activity and dispersion increase sharply. This feature is more obvious especially at the edge of the structure, the energy accumulation and release rate increases, and the probability and intensity of rock burst are higher. The micro-seismic activity of special spatial structures located in the narrower area of rock pillars is more acute. ④ The narrower the thickness of rock pillar (the greater the height of coal pillar), the faster the growth rate of bending moment and energy in the depth of rock pillar, and the higher the impact risk. According to the strength effect of structural plane, it is inferred that the fault zone has slip and dislocation, and fault zone is the dominant area for energy accumulation and release. It is revealed that the mechanism of rock burst is the joint action of high static load and low critical load. The impact risk in the different areas of coal mining is evaluated based on stress concentration characteristics.

Key words: steep and extremely thick coal seam; complex spatial structure; temporal and spatial evolution law of microseisms; rock burst

冲击地压是矿井开采中积聚在煤岩体中的能量突然释放将煤岩体迅速抛出且伴随大量能量释放而形成的动力灾害^[1-2],其成因与煤岩体应力、能量状态相关,煤岩体应力水平是原岩应力与采掘扰动应力叠加之和,应力集中区域能量积聚高,易诱发冲击地压^[3-6]。谭云亮等^[7]提出了冲击孕灾的4类客观主控因素:煤岩冲击倾向性、开采深度、坚硬顶板、地质构造,以及3类人为主控因素:煤柱、采空区及采掘卸荷。煤矿开采中由于地质构造、开采布局等存在特殊空间结构,如煤岩层厚度变异、断裂(断层)构造、遗留煤柱等,煤矿冲击地压灾害的发生与这些结构密切相关。针对煤矿开采中特殊空间结构致灾规律,国内外有众多学者进行了卓有成效的研究。曹安业等^[8]基于弹性力学及数值模拟分析了覆岩厚度变化应力异常机制及冲击地压诱发机理;赵同彬等^[9]揭示了煤厚变异区煤层开采冲击地压发生的力学机制;其他学者也对煤层及岩层厚度变异下应力能量异常规律进行了详细的研究^[10-11]。王宏伟等^[12]分析了与断层构造相关的冲击地压发生模式,凝练了开采扰动下断层滑移失稳的力学机理和断层构造失稳诱冲的多物理场前兆特征;张宁博等^[13]研究了煤层开采活动下断层卸荷效应诱发逆冲断层失稳而导致冲击地压的机理;另外众多

学者对断裂(断层)构造下应力异常机制及冲击机理进行了丰富的研究^[14-15]。冯国瑞等^[16]提出了遗留煤柱群的最弱失稳致灾模式,揭示了关键柱局部失稳的诱灾机理,形成了遗留煤柱群链式失稳的关键柱理论;杨伟利等^[17]通过理论计算和数值模拟研究了遗留煤柱下应力集中特征及冲击地压诱发机理;同样对于煤柱应力异常机制及诱冲机理有诸多学者进行了相关研究^[18-19]。

以上学者对近水平及缓倾斜煤层空间结构致灾机制进行了研究。同样诸多学者对急倾斜煤层空间结构致灾机理进行了研究,笔者^[20]分析了乌东煤矿岩柱、顶板弯曲变形效应并评估不同煤层回采的危险性;来兴平等^[21]分析得出乌东煤矿夹持岩柱是致灾的主要因素;蓝航^[22]分析得出近直立特厚煤层两侧采空岩柱对煤体的“撬杆效应”并得到表达式;杜涛涛等^[23]得出应力异常和“诱冲关键层”是近直立特厚煤层冲击地压主要致灾因素,中间岩柱为诱冲关键层;高明仕等^[24]建立煤层间岩板破断力学模型,得到岩板破断时能量计算公式;吴振华等^[25]、李东辉等^[26]、何学秋等^[27]、HE等^[28]均通过分析得出乌东煤矿冲击地压发生主要原因为顶板挤压与岩柱撬动的“压-撬”作用;李安宁等^[29]得出近直立煤层受顶底板夹持作用是

冲击地压发生的主要作用;张宏伟等^[30]基于地质动力区划方法,确定乌东煤矿冲击地压主要影响因素与相互作用关系,冲击地压多发生在高应力与应力梯度区。

以上研究成果对结构诱导的冲击地压灾害防治具有重要意义,但缺乏对多个空间结构复合情况下冲击地压发生规律及机制的分析。新疆乌东煤矿煤层赋存环境极其复杂,煤层厚度及倾角大,夹持岩柱厚度变异,且存在诸多特殊空间结构,为此以乌东煤矿为研究背景,采用数值模拟、微震监测、理论分析等方法,研究岩柱应力异常尺寸效应,分析复杂空间结构区微震时空演化规律,揭示复杂空间结构下冲击地压发生机理,评估煤层开采不同区域的冲击危险性,指

导后续煤层采掘安全进行。

1 工程背景

乌东煤矿南采区位于新疆乌鲁木齐矿区八道湾向斜南翼,煤层赋存及空间结构分布特征如图1所示。主采B1+2、B3+6煤层,煤层平均厚度分别为28、40 m,煤层平均倾角为87°,属急倾斜巨厚煤层。两煤层交替回采,先回采B3+6煤层,后回采B1+2煤层。采用水平分段综采放顶煤采煤法,分段高度25 m,割煤高度3~5 m,放煤高度22 m,采放比1:7.33。采空区内充填矸石与黄土。现场地应力测试结果显示,其应力场以水平构造应力为主,水平构造应力为垂直应力的1.74~1.90倍。

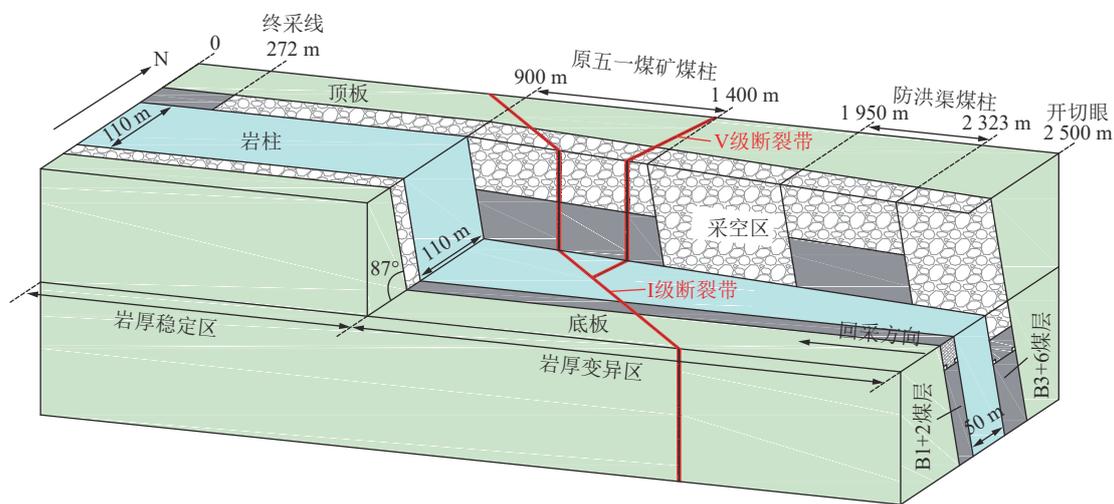


图1 急倾斜巨厚煤层赋存环境及复杂空间结构分布特征

Fig.1 Occurrence environment and distribution characteristics of complex spatial structure in steep and extremely thick coal seam

乌东煤矿南采区沿走向存在诸多空间结构,主要有岩柱、遗留煤柱、断裂带等。岩柱空间结构特征:两煤层之间夹持有自西向东逐渐变窄的岩柱,走向0~900 m厚度为110 m,为岩厚稳定区;900~2500 m厚度逐渐变窄至50 m,为岩厚变异区,因此在900 m处形成岩厚变异点。B3+6煤层上覆遗留煤柱空间结构特征:防洪渠煤柱位于走向1950~2323 m区域,原五一煤矿煤柱位于走向900~1400 m区域。开切巷、终采线边界煤柱空间结构特征:乌东煤矿南区煤层开采时在开切眼、终采线均留有一定的保护煤柱,+450水平B3+6煤层开切巷位于2500 m,终采线位于272 m,认为边界50 m范围内为受影响区域。断裂带空间结构特征:乌东煤矿所在区域处于博格达断裂带体系中,I级断裂带经乌东煤矿南区,位于走向850~1600 m区域内,与煤层呈约26°的夹角。

2 急倾斜岩柱结构应力异常尺寸效应分析

煤矿开采中煤岩活动与空间结构密切相关。乌东煤矿岩柱分布于煤层走向全长范围,遗留煤柱及边界煤柱、断裂带等分布于煤层开采局部区域。因此首先分析急倾斜煤层回采时岩柱应力异常尺寸效应,明确岩厚变异应力分区特征。

2.1 急倾斜岩厚变异数值模型构建

依据乌东煤矿实际地质力学条件构建急倾斜巨厚煤层组的FLAC^{3D}数值模型,模型长×宽×高为2800 m×400 m×450 m,共划分网格4032000个,煤层走向长度为开采全长(2500 m),地层倾角87°,模型两端为固定端围岩,如图2所示。

模型顶部施加初始应力2.5 MPa(埋深100 m),在模型x、y、z方向均施加梯度应力,x、z方向为2.5 MPa/hm(侧压力系数为1),y方向为4.5 MPa/hm(侧压力系

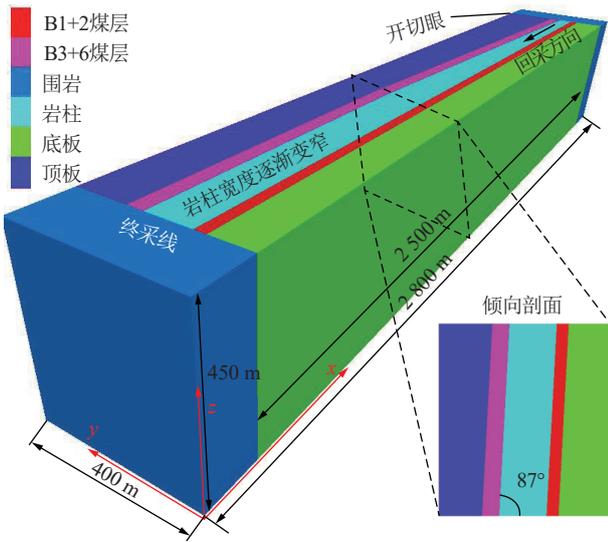


图2 急倾斜煤层数值模型

Fig.2 Numerical model of steep seam

数为1.8)。限制模型x方向左右边界,y方向前后边界,z方向下边界的位移。采用Mohr-Coulomb本构模型计算。实验室测试得出的煤岩力学参数见表1,模拟中赋参时对其适当折减。煤层开挖顺序与实际开挖顺序一致,先开挖B3+6煤层,后开挖B1+2煤层,水平分段高度25m。开挖后在采空区充填黄土,其物理力学参数参照前人研究成果取值^[31],见表2。

表1 煤岩体部分物理力学参数

Table 1 Some physical and mechanical parameters

岩层	岩性	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
底板	粉砂岩	1.78	1.19	0.26	3.60	37.00
B1+2煤层	煤	1.73	1.69	0.23	1.71	23.70
岩柱	细粒砂岩	2.39	1.34	0.23	3.93	32.30
B3+6煤层	煤	1.73	1.69	0.23	2.40	25.90
顶板	粉砂岩	3.78	1.30	0.24	3.60	37.00
围岩	粉砂岩	4.42	1.30	0.23	3.60	37.00

表2 充填体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of filling body

充填材料	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/MPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
黄土	1700	0.112	0.037	0.01	10.50	0

以+450水平为例,对比煤层开采水平应力与垂直应力分布差异,如图3所示。岩柱及顶底板中垂直应力较高,岩柱应力达到13.4MPa。水平应力在开采阶段以上较小,不超过7.5MPa。因此研究岩柱应力异常尺寸效应时主要分析垂直应力。

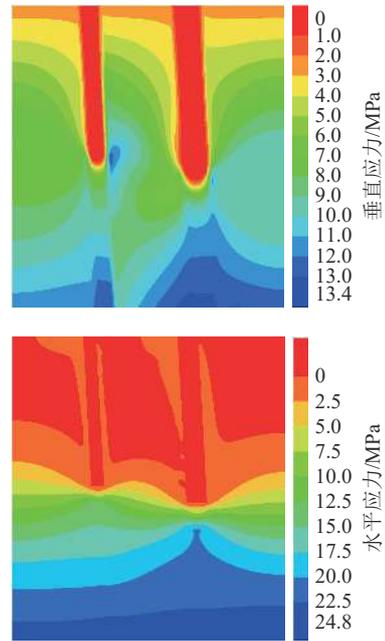


图3 急倾斜煤层应力分布

Fig.3 Stress distribution in steep seam

2.2 走向开采应力演化规律

定量化精准的分析岩厚变异引起的应力异常分区特征,有助于理清煤层开采不同区域岩柱撬动力源特征,更好分区分级的防控冲击地压。在+450水平岩柱应力峰值处布设测线,得出岩柱撬动力峰值演化曲线如图4所示。岩柱撬动力呈明显的分区特征,2500~2360m为初采区(7.77~13.66MPa)、2360~1940m为高应力区(13.45~13.66MPa)、1940~900m为应力梯度区(13.66~10.9MPa)、900~200m为应力平稳区(10.70~10.9MPa)、200~0m为末采区(10.70~8.10MPa)。

急倾斜岩厚变异结构形成了3处应力拐点,分别为900、1940、2360m,其中900m处为岩厚变异点引起的应力突变,1940m处为岩柱弯曲撬动进入最大区域形成的应力突变,2360m为岩柱受围岩约束反力作用弯曲撬动弱化形成的应力突变。应力拐点区域由于应力异常突变,围岩受力状态极不稳定,在采掘卸荷下易诱发强矿震及冲击地压。

模型走向不同位置应力演化曲线如图5所示。B3+6煤层开采时,在岩柱弯曲撬动作用下靠B1+2煤层侧形成高应力且随岩柱厚度变窄而增大。B3+6煤层顶板侧应力水平较高,约9.2MPa,B3+6煤层处于顶板-岩柱的双挤压作用下。B1+2煤层应力降低,约2.6MPa,表明B3+6煤层的采出使得B1+2煤层卸压。B1+2底板侧应力水平较低,约7.9MPa。

开切眼、终采线区域应力分布异于其他区域,如图6所示。开切眼、终采线位置岩柱-顶板形成“双

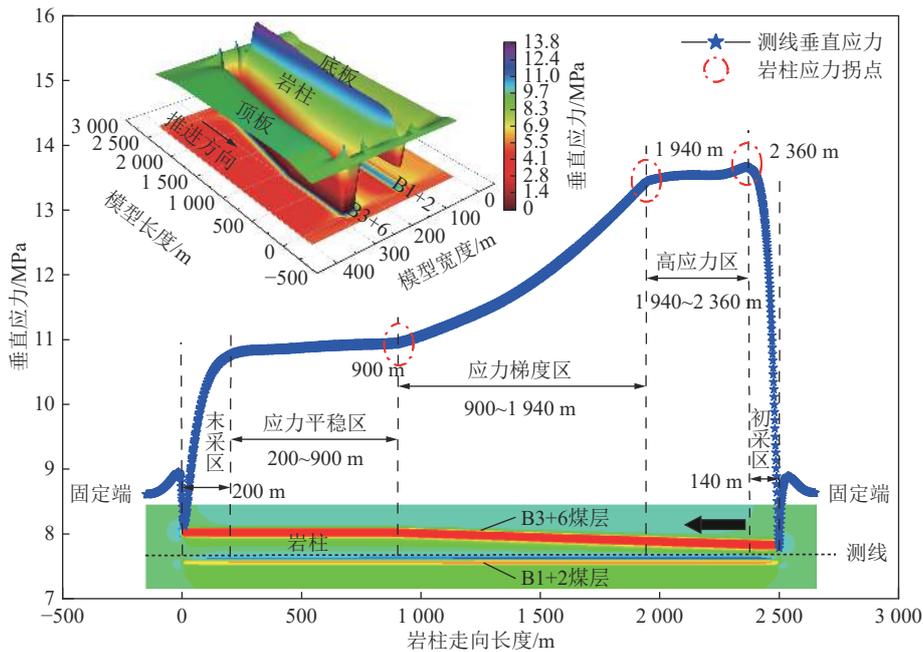


图4 岩柱走向应力演化特征

Fig.4 Evolution characteristics of strike stress of rock pillar

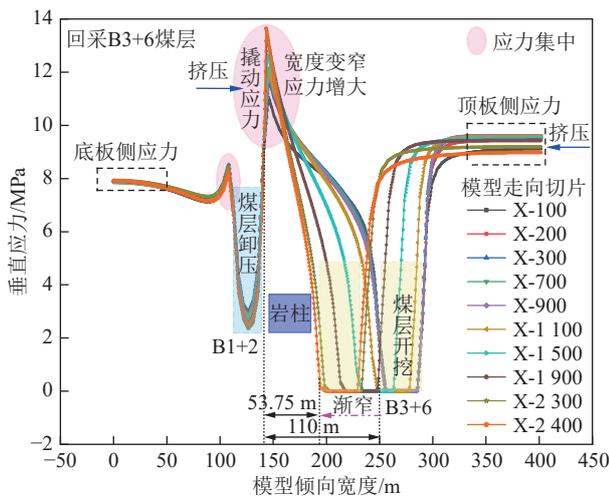


图5 模型走向不同位置应力演化

Fig.5 Stress evolution at different positions of model

“峰”形态应力。岩柱内应力峰值靠近 B3+6 煤层侧，而不是靠近 B1+2 煤层侧。开切眼岩柱内应力集中程度略高于终采线，分别为 11.0、10.4 MPa，分析原因为岩柱在开切眼处更窄，撬动效应更强。终采线处 B1+2 煤层应力略高于开切眼处，分别为 7.2、7.7 MPa，表明开切眼处卸压效果较终采线处好，但较其他区域 (2.5 MPa) 卸压效果差。B3+6 煤层顶板及 B1+2 煤层底板内均形成应力峰值，且顶板内应力集中更高，开切眼、终采线处顶板应力分别为 10.8、9.8 MPa。分析顶板及底板的应力峰值形成原因是其对岩柱撬动的约束反力作用。

整体上除了岩柱两端受围岩约束反力作用弯曲撬动效应减弱，应力较低外，其他区域岩柱由厚变窄

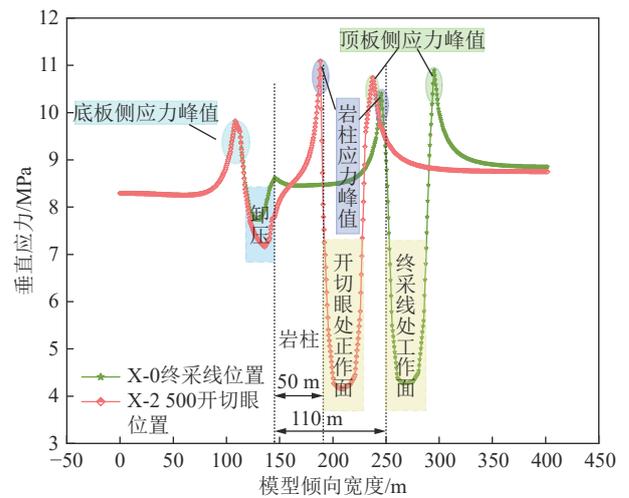


图6 煤层走向两侧应力演化

Fig.6 Stress evolution on both sides of coal seam strike

弯曲撬动效应增强，应力升高，分析原因为岩柱在相同出露高度下，厚度越窄，则宽高比越小，尺寸效应越明显，如在+450 水平岩柱出露高度 350 m，岩柱厚度在 110、50 m 时其宽高比分别为 0.285、0.143，岩柱宽高比越小则更符合板结构力学模型，在相同受力条件下弯曲撬动效应越明显，应力集中、能量积聚更高。

另外乌东煤矿开采中走向局部区域存在遗留煤柱，使得岩柱应力分布异常，闫瑞兵^[32]通过构建乌东煤矿南区遗留煤柱下工作面回采的数值模型，得出无煤柱时，垂直应力主要集中在 B3 巷侧；有煤柱时，整个煤柱高度范围内都存在应力集中现象。煤柱的存在大大增加了应力集中的范围，应力集中高度增加，

使得“撬杆效应”内部应力极大增加。发生动力灾害的危险性也迅速升高。

2.3 向深开采应力演化规律

随着开采深度的增加,岩柱出露高度增加,前述分析了岩厚变异走向应力异常演化规律,为了更加全面的分析岩柱应力异常的尺寸效应,还需分析其向深开采过程应力演化规律。选取岩柱走向 2 300 m 位置(岩柱厚度 57.5 m),分析向深开采模型应力演化规律,如图 7 所示。开采深度增大,岩柱撬动应力增大,B3+6 煤层顶板及 B1+2 煤层底板侧应力均增大,但其应力梯度变化量不同,原岩应力梯度为 0.625 MPa/25 m,岩柱应力峰值平均梯度为 1.107 MPa/25 m(1.77 倍原岩应力梯度),B3+6 煤层顶板应力平均梯度为 0.709 MPa/25 m(1.13 倍原岩应力梯度),B1+2 煤层底板应力平均梯度为 0.50 MPa/25 m(0.8 倍原岩应力梯度)。由此可知采深增加岩柱应力变化最明显,B3+6 煤层顶板次之,B1+2 煤层底板最小。同样在相同岩柱厚度下,岩柱出露高度越大,则宽高比越小,尺寸效应越明显,岩柱应力集中、能量蓄积水平越高。

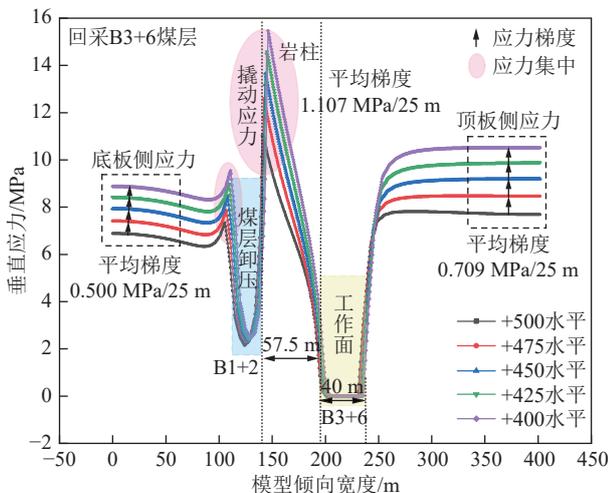


图7 煤层组向深开采应力演化

Fig.7 Stress evolution of deep mining in coal seam group

由以上分析可知,岩柱应力演化具有明显的尺寸效应,岩柱厚度变窄、出露高度增大其撬动效应增强。B3+6 煤层受顶板-岩柱的双挤压作用,同样岩柱厚度更窄、出露高度更大时 B3+6 煤层受挤压作用越强,冲击危险性更高。B3+6 煤层的采出使得 B1+2 煤层处于卸压保护状态。

3 急倾斜煤层复杂空间结构区微震时空演化规律

以上分析基本厘清了岩柱应力异常的尺寸效应。除岩柱外,乌东煤矿还存在特殊空间结构,加剧了局

部区域的应力集中。以往学者对乌东煤矿开采时冲击地压发生的时序前兆特征等进行了相应的研究,崔峰等^[33]、HE 等^[34]、XU 等^[35]、SHAN 等^[36]基于微震多指标识别冲击前兆特征,经融合构建预警模型,能够较为准确的预判冲击危险性。为此以乌东煤矿+450 水平 B3+6 煤层为研究对象,分析煤层开采复杂空间结构区微震多指标时空演化规律。为进一步揭示冲击地压发生机理及评估冲击危险性提供科学依据。

乌东煤矿采用 ARAMIS 微震监测系统,能够有效监测煤岩体产生的破裂,并计算其震源位置与释放的能量。+450 水平 B3+6 煤层采用 4 个微震监测台站参与定位计算。微震监测台站距工作面 50~200 m,并随开采不断调整布设位置。

3.1 微震震源空间分布规律

+450 水平 B3+6 煤层回采微震事件震源定位如图 8 所示,球体颜色代表各能级区间,球体直径代表能量大小(相同能级事件能量越大直径越大)。结合岩厚变异应力分区特征、复杂空间结构位置关系,分析煤层开采复杂空间结构区微震时空演化规律。

整个回采过程微震事件大部分分布于岩柱,煤层次之,顶板最少。表明受开采扰动岩柱破裂程度最大,煤体次之,顶板最小。整体上岩厚变异区(900~2 500 m)微震事件频次多、能量大,10⁴ J 事件 336 次,10⁵ J 事件 15 次,10⁶ J 事件 12 次,10⁷ J 事件 3 次,10⁸ J 事件 1 次,且以上事件随岩柱厚度变宽逐渐减少;岩厚稳定区(0~900 m)区域微震事件频次少、能量小,10⁴ J 事件仅 12 次,10⁵ J 事件仅 5 次,10⁶ J 以上事件仅 1 次,且只有 1 次 10⁵ J 事件位于 300 m,其余事件均分布在靠近 900 m 区域。由此可知岩柱厚度更窄区域煤岩破裂相对更剧烈。

为了更加清楚的分析岩柱厚度对煤岩破裂的影响,去除特殊空间结构因素,仅分析不同岩柱厚度下微震事件分布规律,选取 322~900 m(岩厚 110 m)与 1 400~1 950 m(岩厚 87~70 m)2 个区域,这 2 个区域内煤岩活动仅与岩柱厚度相关。由图 8 可知,1 400~1 950 m 区域相较 322~900 m 区域微震事件频次更多,微震事件能级更高。表明岩柱厚度越窄撬动效应越强,应力集中、能量积聚更高,受采掘扰动窄岩柱区域煤岩破裂尺度更大、频次更多,释放能量更高,形成强矿震及冲击地压的危险性更大。

高应力区内包含防洪渠煤柱,存在 2 处岩柱应力拐点。微震事件呈现低频次-高能量特征,共发生 10⁴ J 事件 151 次、10⁵ J 事件 6 次、10⁶ J 事件 2 次、10⁷ J 事件 2 次,其中大部分位于防洪渠煤柱区域内。分析原因为:① 该区域处于岩柱高应力区;② 防洪渠煤柱

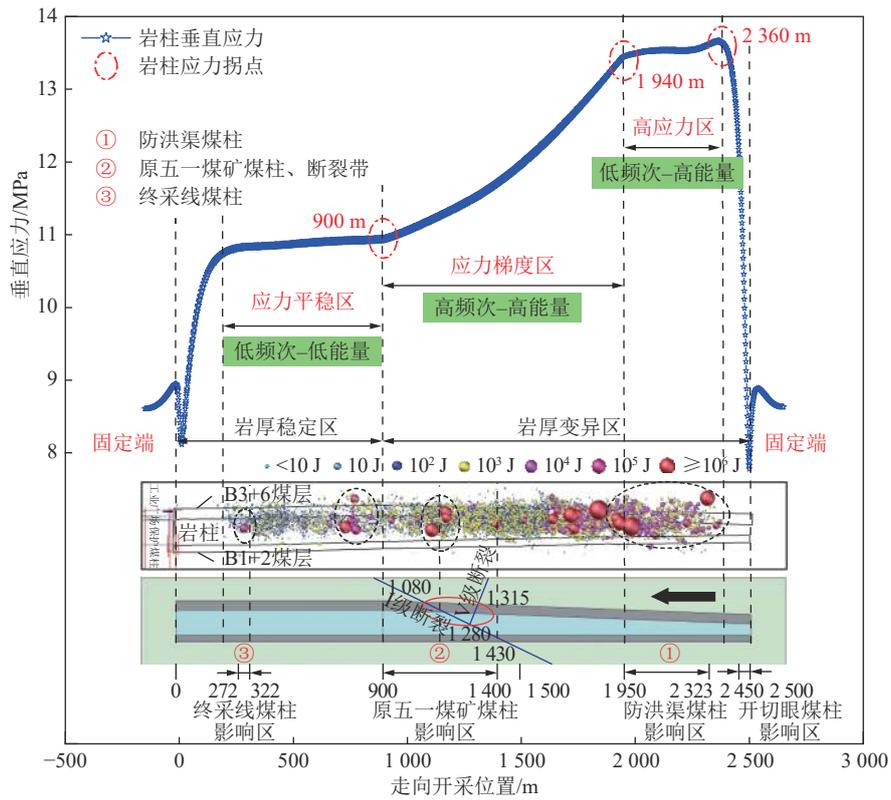


图 8 +450 水平 B3+6 煤层开采微震震源空间分布特征

Fig.8 Spatial distribution characteristics of microseismic sources in B3+6 coal seam mining at +450 level

内应力集中, 叠加后应力水平极高。

进防洪渠煤柱边界 2 323 m 处 (近 2 360 m 岩柱应力拐点) 发生 10^6 、 10^7 J 事件各 1 次。出防洪渠煤柱边界 1 950 m 区域 (近 1 940 m 岩柱应力拐点) 微震事件呈现簇集, 发生 10^5 J 事件 1 次, 10^6 J 事件 3 次 (其中 1 次为“11·24”冲击事故, 图 9), 10^7 J 事件

1 次。分析原因为岩柱应力拐点与进出防洪渠煤柱边界时应力异常突变, 煤岩活动剧烈且不稳定, 在窄岩柱本身高应力的基础上易于诱发冲击地压。

应力梯度区内包含原五一煤矿煤柱, 存在 I 级断裂带与 V 级断裂带。微震事件呈现高频次-高能量特征, 共发生 10^4 J 事件 185 次, 10^5 J 事件 9 次, 10^6 J 事

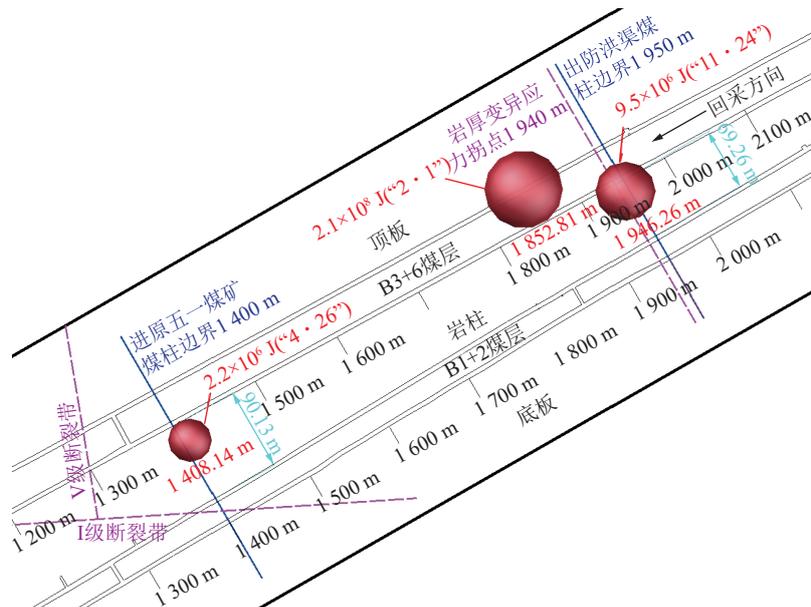


图 9 冲击事故震源空间分布

Fig.9 Spatial distribution of focal points of impact accident

件9次、 10^7 J事件1次、 10^8 J事件1次。这些事件中大部分聚集在1600~1940m(发生“2·1”冲击事故,图9,冲击发生原因与“11·24”冲击事故一致),而900~1600m较少(且4次 10^6 J事件呈簇集状分布于煤柱与断裂带叠合区域,即1168~1080m)。从结构复杂程度看,900~1600m空间结构更复杂,煤岩活动应该更剧烈,但实际上煤岩活动却比1600~1940m单一岩柱结构区域缓和。分析原因为1940~900m区域岩柱厚度逐渐变宽,弯曲撬动效应减弱,应力、能量水平逐渐降低,煤岩活动相对窄岩柱区域趋于缓和,表明岩柱对微震活动的影响程度大于特殊空间结构。另外煤柱与断裂带叠合区域微震活动相对剧烈原因为该区域结构复杂,应力水平升高,且断裂带活动使得煤岩能量积聚与释放速率增大。

同样在1408m处发生1次 10^6 J事件(“4·26”冲击事故,图9),分析原因为:①进入断裂带影响范围;②接近原五一煤矿煤柱边界。该区域能量积聚与释放速率加快,煤岩活动加剧。在岩柱本身较高应力的基础上易于诱发冲击地压。

应力平稳区内包含终采线煤柱,存在岩厚变异点。微震事件呈现低频次-低能量特征,共发生 10^4 J事件

11次, 10^5 J事件4次, 10^6 J事件1次(大部分集中在650~900m,近岩厚变异点及原五一煤矿煤柱边界,应力水平相对较高;只有1次 10^5 J事件在300m,受终采线煤柱影响,应力水平也较高)。

由以上分析可知,微震事件大部分集中在岩柱,且岩柱厚度更窄区域微震活动程度更高。煤柱、断裂带等特殊结构区域微震事件呈现簇集且能级增大,尤其在结构边缘该特征更明显。位于岩柱更窄区域的特殊空间结构微震活动更剧烈。因此岩柱撬动效应主导煤岩破裂形成,岩柱是煤岩灾变的主控结构,特殊空间结构加剧煤岩破裂程度,是煤岩灾变的重要结构。

3.2 微震日总能量-总频次演化规律

统计+450水平B3+6煤层开采单日微震事件总频次及总能量,量化分析急倾斜煤层复杂空间结构区微震时空演化规律,将单日 10^6 J以上事件单独在图中标注,如图10所示。岩厚变异区内微震事件日总能量及日总频次均高于岩厚稳定区,3次冲击地压事故均发生在岩厚变异区特殊空间结构内。进出特殊空间结构时微震能量及频次均呈陡增再下降特征,表明在结构边缘处煤岩活动更为剧烈。

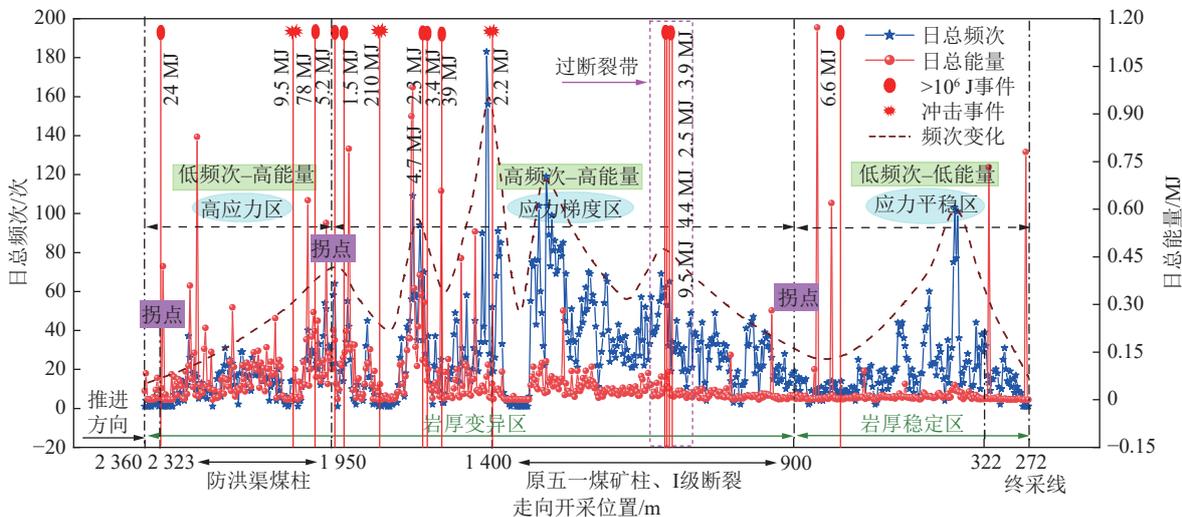


图10 +450水平B3+6煤层开采微震日总能量-总频次演化规律

Fig.10 Evolution law of daily total energy and total frequency of microseisms in B3+6 coal seam mining at +450 level

统计应力分区内微震日总频次、日总能量平均值,如图11所示。高应力区内微震事件呈现低频次-高能量特征,平均日总频次为14次,平均日总能量为0.928MJ;应力梯度区内微震事件呈现高频次-高能量特征,平均日总频次为32次,平均日总能量为1.02MJ;应力平稳区内微震事件呈现低频次-低能量特征,平均日总频次为18次,平均日总能量为0.0687MJ。由此可知窄岩柱区域内微震活动更剧烈,岩柱撬动效应更强,应力集中、能量积聚更高。

统计特殊空间结构内微震事件日总频次、日总能量平均值,如图11所示。防洪渠煤柱区域微震事件平均日总频次为15次,平均日总能量为1MJ;原五一煤矿煤柱、断裂带区域微震事件平均日总频次为35次,平均日总能量为0.124MJ;终采线区域微震事件平均日总频次为15次,平均日总能量为0.0454MJ。特殊结构内能量及频次均高于其他区域,其中防洪渠煤柱内微震事件能量较大,原五一煤矿煤柱内微震事件频次较高,终采线煤柱区域微震能量、频次均较小。

由此可知特殊空间结构是应力集中、能量积聚及释放的优势区域,位于岩柱更窄区域的特殊结构能量积聚及释放更高。

事件震级; M 为微震事件最大震级。
微震事件震级与能量的关系为

$$\lg E = c + dM \tag{2}$$

式中, d 取值 1.5; c 与区域地质状态有关, 取值 4.8; E 为煤岩柱弹性模量。

以乌东煤矿+450 水平 B3+6 综采工作面回采时微震数据为源数据计算微震活动度 S 值, 由于每天微震事件数相差较多, 因此按照事件个数划分计算窗口和滑动窗口, 计算窗口过大容易受早期数据的影响, 计算窗口过小则各值波动较大^[38], 经调试以 200 个事件数为计算窗口 T , 以 40 个事件数为滑动窗口 ΔT ^[33], 计算得出急倾斜巨厚煤层过复杂空间结构微震时空强活动度 S 如图 12 所示。

统计微震活动度 S 在应力分区及特殊空间结构内平均值如图 13 所示。高应力区内微震活动度 S 最大为 0.32, 平均为 0.26。应力梯度区内微震活动度 S 最大为 0.34, 平均为 0.22; 应力平稳区内微震活动度 S 最大为 0.28, 平均为 0.21。随岩柱厚度变宽, 微震活动度 S 最大值及平均值均逐渐减小, 由此可知岩柱撬动效应减弱, 应力、能量降低, 煤岩体受开采扰动破裂时空强活动降低。

防洪渠煤柱区域内微震活动度 S 平均为 0.260, 出现 4 次高值异常, 分别为 0.304、0.288(发生冲击)、0.323、0.282。原五一煤矿煤柱、断裂带区域内微震活动度平均 S 为 0.212, 出现 3 次高值异常, 分别为 0.263、0.297、0.284。终采线煤柱区域内微震活动度 S 平均为 0.206, 出现 1 次高值异常为 0.245。可知特殊空间结构微震活动时空集中度及强度较一般区域更高, 且位于岩柱更窄区域的特殊空间结构该特征更

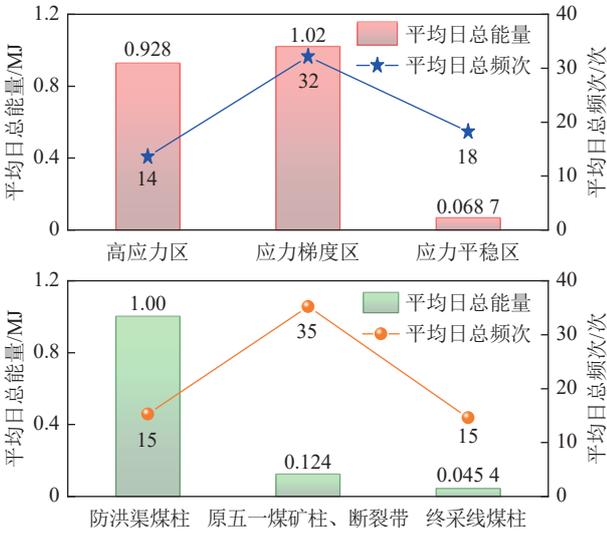


图 11 应力分区及特殊空间结构微震能量-频次

Fig.11 Energy-frequency of microseisms in stress zoning and Special spatial structure

3.3 微震时空强活动度演化规律

谷继成等^[37]在 1987 年提出微震活动度 S , 该值包含了微震活动的时间、空间、强度三维特征, 能够很好的反映微震活动在时间、空间上的集中度及其强度的记忆特征, 定义 S 为

$$S = 0.117 \lg(N + 1) + 0.0291 \lg\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{1.5M_i}\right) + 0.015M \tag{1}$$

式中, N 为某时间段微震事件的频次; M_i 为单个微震

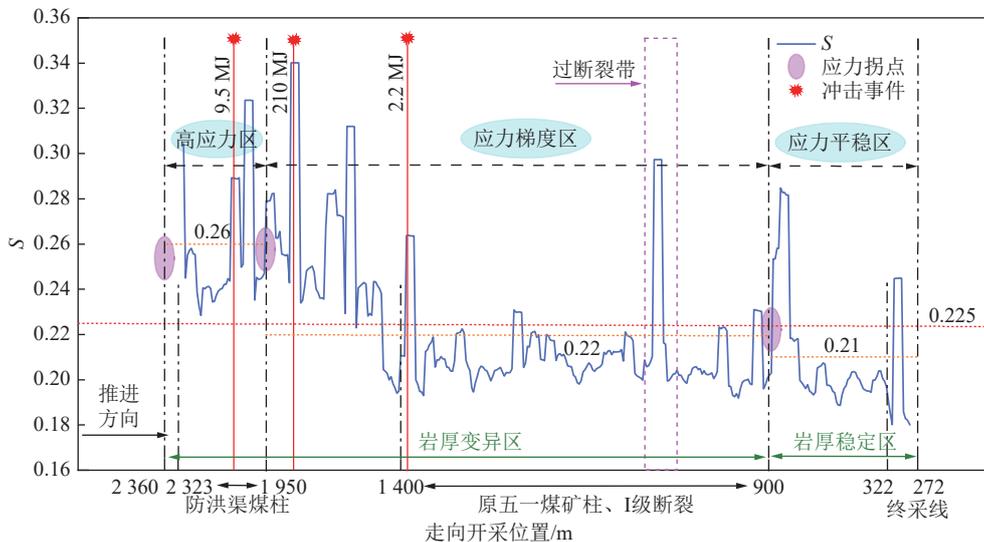


图 12 +450 水平 B3+6 煤层开采微震时空强活动度演化规律

Fig.12 Evolution law of temporal and spatial strong activity of microseismic mining in B3+6 coal seam at +450 level

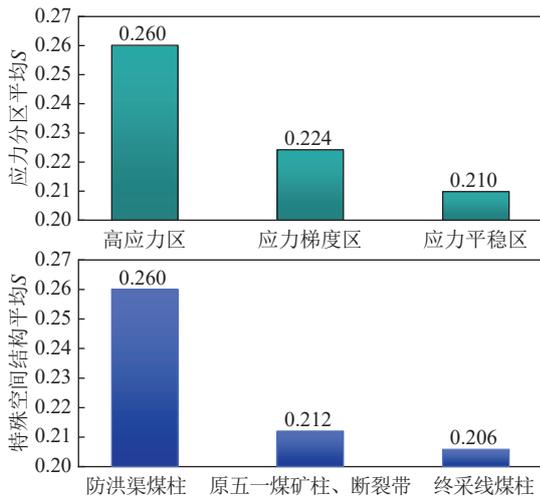


图 13 应力分区及特殊结构微震活动度

Fig.13 Microseismic activity in stress zoning and special structures

明显,表明特殊空间结构的存在加剧了应力集中与能量积聚,且在窄岩柱区域内的特殊空间结构其应力、能量水平更高。

如图 12 所示,进防洪渠煤柱(近 2 360 m 岩柱应力拐点)时出现 1 次 S 高值异常为 0.304;出防洪渠煤柱(近 1 950 m 岩柱应力拐点)时出现 2 次 S 高值异常为 0.288(发生冲击)、0.323。进原五一煤矿煤柱时出现 1 次 S 高值异常为 0.263(发生冲击),出原五一煤矿煤柱时出现 1 次高值异常为 0.284。过断裂带时出现 1 次 S 高值异常为 0.297。由此可知,在特殊空间结构边缘应力异常,能量积聚及释放速率更快,微震事件时空集中度及强度较空间结构内部更高,微震活动更剧烈且更不稳定,因此特殊空间结构边缘冲击危险性高于特殊空间结构内部。

3.4 微震事件离散性演化规律

煤岩体产生不同尺度破裂形成不同能级微震事件,且某时间段内煤岩不同尺度破裂的频次存在差异,因此总能量差异较大,如某段时间内总能量较大,则可能存在以下 3 种情况^[39]:① 频次较多,高能级事件较少;② 频次较少,高能级事件较多;③ 频次较多,且高能级事件较多。煤层开采中,煤岩破裂以小破裂居多,大破裂事件较少,因此导致微震数据离散程度增大的主要原因是煤岩产生较多的大破裂事件,以上 3 种情况中,第 1 种微震数据离散程度较小,第 2、3 种情况微震数据离散程度较大。大破裂事件主导煤岩灾变,因此微震数据离散程度异常增大的区段灾变危险性增大。为了表征微震数据的离散程度,引入概率论和统计学中离散系数 C_V ,其定义为标准差与平均值之比

$$C_V = \frac{\sigma_M}{\bar{M}} = \frac{1}{\bar{M}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad (3)$$

式中, C_V 为微震事件震级离散系数; σ_M 为某时间段微震事件震级的标准差; \bar{M} 为某时间段微震事件震级的平均值。

以 450 水平 B3+6 煤层开采微震数据为源数据,将微震事件能量换算为震级,同样以 200 个微震事件为计算窗口,以 40 个微震数据为滑动窗口,计算得出煤层开采全过程的微震事件震级离散系数 C_V ,由于平均震级为负值,计算得出 C_V 均为负值,因此计算绝对值将其转化为正值,并不会影响分析结果,得出急倾斜巨厚煤层过复杂空间结构离散性系数 C_V 如图 14 所示。

统计应力分区及特殊空间结构内微震事件离散

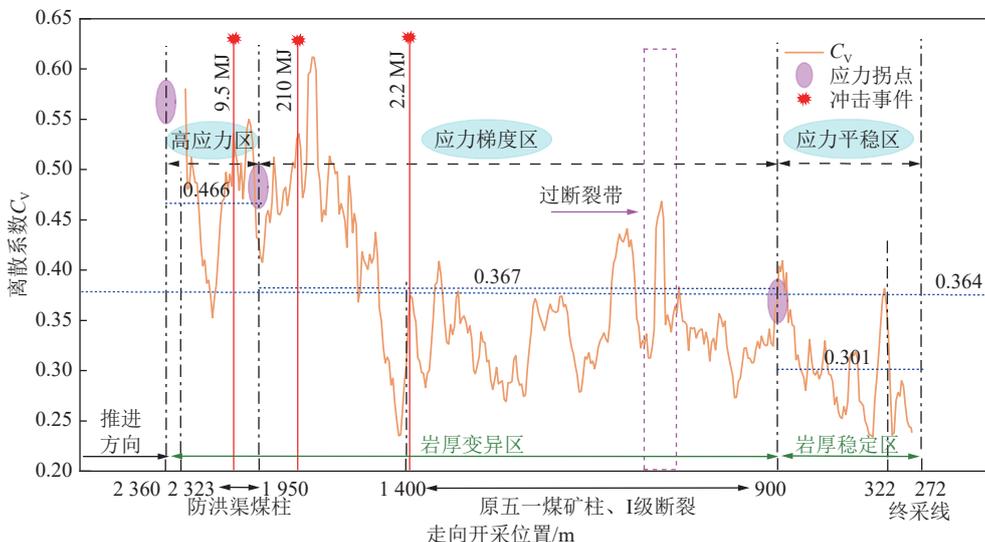


图 14 +450 水平 B3+6 煤层开采微震事件离散性演化规律

Fig.14 Discrete evolution law of microseismic events in B3+6 coal seam mining at +450 level

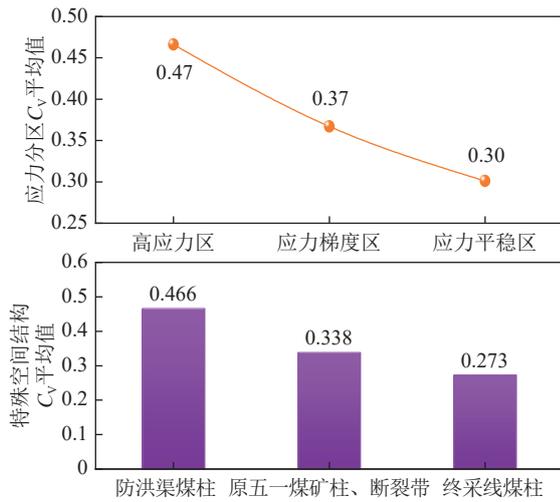


图 15 应力分区及特殊结构微震事件离散性

Fig. 15 Dispersion of microseismic events in Stress zoning and special structures

系数 C_V 平均值,如图 15 所示。整个回采过程平均值为 0.364,高应力区平均值为 0.466,高于整体水平;应力梯度区平均值为 0.367,接近整体水平;应力平稳区平均值为 0.301,低于整体水平。岩柱厚度变窄,微震事件离散性增大,高能级事件增多,煤岩破裂尺度增大。表明岩柱厚度变窄,撬动效应增强,应力、能量水平升高,煤岩破裂释放高能量致使冲击危险性升高。

特殊空间结构区微震事件离散系数呈现异常升高特征,防洪渠煤柱内平均值为 0.466,且出现 0.536 (发生冲击)、0.549 的高值异常。原五一煤矿煤柱内平均值为 0.338,出现 0.44(发生冲击)、0.46 的高值异常。终采线煤柱内平均值为 0.273。表明特殊空间结构内煤岩积蓄能量迅速升高,受扰动煤岩破裂尺度迅速增大,使得高能级事件陡增。受岩厚变异撬动效应作用,位于岩柱更窄区域的特殊空间结构内该特征更明显。

由图 14 可知,进防洪渠煤柱时出现 0.58 的高值。出防洪渠煤柱前后出现 0.54、0.61 的高值(附近均发生冲击)。进原五一煤矿煤柱时快速升高至 0.37(发生冲击);过断裂带时快速升高至 0.47,进终采线煤柱影响区时快速升高至 0.38。进出特殊空间结构时微震事件离散性快速增大,煤岩破裂迅速向大尺度转化。表明特殊空间结构边缘区域应力异常突变,能量积聚及释放速率更快,煤岩活动极不稳定,是灾变危险区域。

4 急倾斜煤层复杂空间结构区冲击地压发生机理

4.1 急倾斜岩厚变异应力异常机制分析

急倾斜巨厚煤层组回采后岩柱出露呈直立状,在

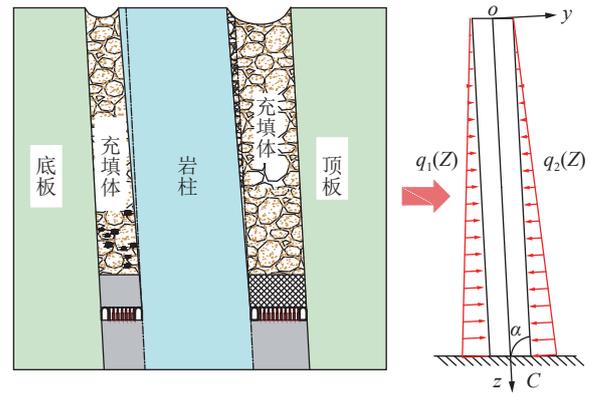


图 16 岩厚变异力学模型

Fig. 16 Mechanical model of rock thickness variation

自重及充填体作用下发生弯曲变形。同一水平岩柱出露高度相同,沿走向岩厚变异导致单位厚度岩柱受力不同。构建岩柱向深开采力学模型如图 16 所示,图中, Z 为深度变量; α 为岩柱倾角。由于平行岩柱的力不影响岩柱弯曲变形,因此岩柱受力分解后只考虑垂直岩柱的力。岩柱左侧受充填体的支撑力 $q_1(Z)$; 岩柱右侧受充填体的挤压力、充填体自重、岩柱自重的合力 $q_2(Z)$ 。

参照文献[20]得出 $q_1(Z)$ 表达式为

$$q_1(Z) = \frac{m\gamma_1 Z \sin^2 \alpha}{\lambda} \quad (4)$$

岩柱右侧受力表达式为

$$q_2(Z) = \frac{m\gamma_1 Z \sin^2 \alpha}{\lambda} + \frac{n\gamma_1 Z \sin \alpha \cos \alpha}{l} + \gamma_r Z \sin \alpha \cos \alpha \quad (5)$$

式中, γ_1 为充填体的平均容重; γ_r 为岩体的平均容重; λ 为侧压力系数; m 为充填体对岩柱的支护效力系数; 取值为 0~1, m 越大,则支撑(挤压)作用力越大; n 为 B3+6 煤层厚度; l 为岩柱厚度; C 为岩柱固定端。

根据材料力学计算得出岩柱任意位置处的弯矩 $M(Z)$, 其表达式为

$$M(Z) = \frac{[q_1(Z) - q_2(Z)]Z^2}{6} \quad (6)$$

由弯矩函数可以得出岩柱任意位置处的弹性变形能 $U(Z)$ 表达式为

$$U(Z) = \int \frac{M^2(Z)}{2EI} dZ \quad (7)$$

其中, I 为岩柱结构的惯性矩,在文中取值 1。参照现场实测数据取值, γ_r 取 25 kN/m³, γ_1 取 17 kN/m³, E 取 14 GPa, m 取 0.5, α 取 87°, λ 取 1.6。 n 取 40 m, l 随岩柱走向位置不同变化。

分析岩厚变异下岩柱弯曲撬动效应,岩柱厚度范

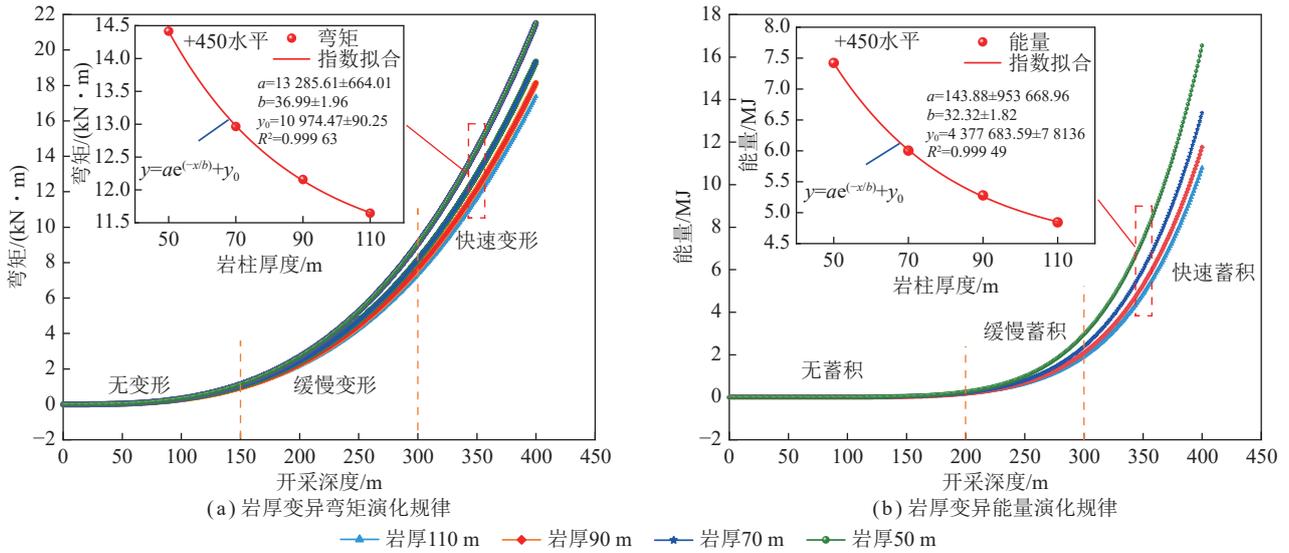


图 17 岩厚变异弯矩、能量演化规律

Fig.17 Evolution law of bending moment and evolution of rock thickness variation

围为 110~50 m, 因此选取岩柱厚度为 110、90、70、50 m 的 4 处分析岩厚变异的尺寸效应, 根据式 (6)、(7) 计算得出岩厚变异尺寸效应弯矩及能量演化规律如图 17 所示。由图 17 可知, 采深增加, 岩柱出露高度增大, 岩柱弯矩、能量均呈指数型增长, 且能量增长速率比弯矩更明显。根据弯矩增长速率划分为无变形 (0~100 m)、缓慢变形 (100~300 m)、快速变形 (>300 m) 3 个阶段。根据能量增长速率划分为无蓄积 (0~200 m)、缓慢蓄积 (200~300 m)、快速蓄积 (>300 m) 3 个阶段。岩柱厚度越窄, 随采深增加弯矩、能量增长速率越快, 表明岩厚越窄, 其弯曲撬动效应更强, 能量蓄积更多。同一水平岩柱出露高度相同, 选取+450 水平 (采深 350 m) 分析不同岩柱厚度下弯矩、能量差异性, 结果表明弯矩、能量均与岩厚呈非线性指数负相关, 即同一水平岩厚越窄弯矩、能量越大, 拟合得出岩厚与弯矩相关函数 (式 (8)), 相关系数 R^2 为 0.99963。拟合得出岩厚与能量相关函数 (式 (9)), 相关系数 R^2 为 0.99949。

$$y_1 = 13\,285.61e^{-\frac{x}{36.99}} + 10\,974.47 \quad (8)$$

$$y_2 = 1.44 \times 10^9 e^{-\frac{x}{32.32}} + 4.38 \times 10^6 \quad (9)$$

式中, x 为岩柱厚度, m; y_1 为岩柱弯矩; y_2 为岩柱能量。

4.2 急倾斜煤柱结构应力异常机制分析

乌东煤矿急倾斜巨厚煤层上覆遗留煤柱在空间中的存在方式不同于水平煤层下, 其处于岩柱与顶板的夹持作用下, 乌东煤矿 B3+6 煤层上覆存在多个遗留煤柱, 煤柱结构的存在使得顶板侧水平构造应力传递至岩柱, 对岩柱的弯曲撬动造成极大影响。在后续的回采中将遗留煤柱逐渐回收, 因此遗留煤柱逐渐高

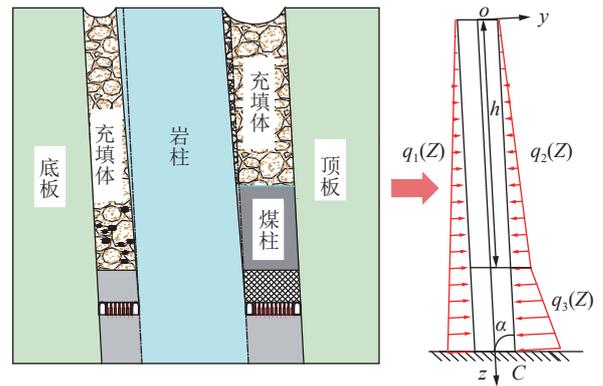


图 18 煤柱结构力学模型

Fig.18 Mechanical model of coal pillar structure

度减小, 同时遗留煤柱在上覆充填体压力及自身压力作用下向下滑移至未开采工作面顶部, 假设在+400 水平时还存在滑移至顶部的残留煤柱结构, 分析残留煤柱结构不同高度下岩柱弯矩及能量的演化规律, 掌握煤柱结构下应力及能量异常机制, 为此构建急倾斜遗留煤柱力学模型如图 18 所示, 其各参数与前述岩厚变异力学模型一致。

$q_1(Z)$ 、 $q_2(Z)$ 表达式参照前述岩厚变异分析, 煤柱结构内岩柱右侧受力 $q_3(Z)$ 表达式为

$$q_3(Z) = \left[k_1 \gamma_C (Z-h) \sin^2 \alpha + q_2(h) \right] + \frac{n \gamma_C (Z-h) \sin \alpha \cos \alpha}{l} + \gamma_1 Z \sin \alpha \cos \alpha \quad (10)$$

式中, k_1 为衰减后的水平应力与垂直应力之比; γ_C 为煤体的平均容重; h 为地表距煤柱顶部高度。

根据材料力学计算得出岩柱任意位置处的弯矩 $M(Z)$, 其表达式为

$$M(Z) = \frac{q_1(Z)Z^2}{6} - \frac{q_2(h)h(Z-2h/3)}{2} - \frac{[q_3(Z)+q_2(h)](Z-h)}{2} \left\{ (Z-h) - \frac{[q_3(Z)+q_2(h)](Z-h)}{3[q_3(Z)+q_2(h)]} \right\} \quad (11)$$

同样由弯矩函数可以得出岩柱任意位置处的弹性变形能 $U(Z)$ 表达式为

$$U(Z) = \int \frac{M^2(Z)}{2EI} dZ \quad (12)$$

防洪渠煤柱位于走向 1950~2323 m, 该区域岩柱宽度在 70 m 左右, 因此以防洪渠煤柱为例, 选取岩柱厚度为 70 m 分析不同高度残留煤柱结构下岩柱撬动效应, 选取残留煤柱高度为 25、50、75、100 m。其中, k_1 取 1.5, γ_c 取 13 kN/m³, l 取 70 m; 其余各参

数含义及取值与前述一致。根据式 (11)、(12) 计算得出残留煤柱结构影响下弯矩及能量演化规律如图 19 所示。

由图 19 可知, 随采深增加, 急倾斜煤柱结构内岩柱弯矩及能量增长速率均明显高于无煤柱结构时, 且煤柱高度越大岩柱弯矩、能量增长速率越快, 表明煤柱结构高度越大, 岩柱弯曲撬动效应越强, 能量蓄积越多。分析同一水平下不同煤柱高度的岩柱弯矩、能量差异性, 结果表明煤柱高度与岩柱弯矩、能量均呈非线性指数正相关关系, 即同一水平煤柱高度越大, 岩柱弯矩、能量越大。拟合得出煤柱高度与弯矩相关函数(式(13)), 相关系数 R^2 为 0.99686。拟合得出与煤柱高度与能量相关函数(式(14)), 相关系数 R^2 为 0.99757。

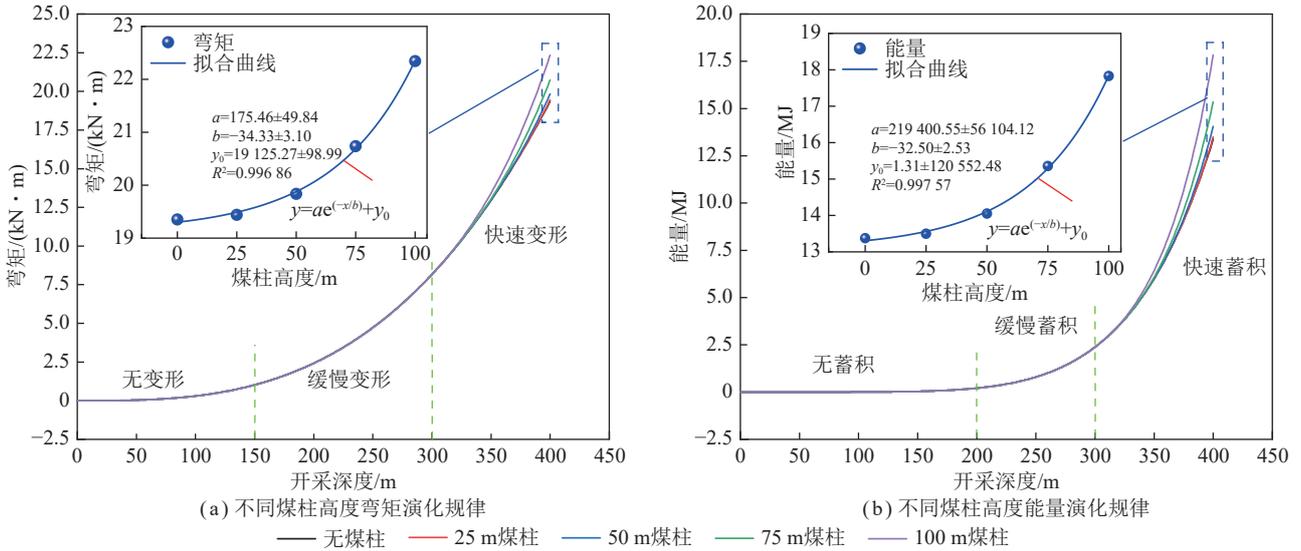


图 19 不同煤柱高度弯矩、能量演化规律

Fig.19 Evolution law of bending moment and energy at different coal pillar heights

$$y = 175.46e^{-\frac{x}{-34.33}} + 19125.27 \quad (13)$$

$$y = 2.19 \times 10^5 e^{-\frac{x}{-32.50}} + 1.31 \times 10^7 \quad (14)$$

4.3 断裂带结构应力异常机制分析

断裂带是结构弱面, 控制岩体变形, 形成岩体力学作用边界。结合岩体结构面强度效应^[40]。计算得出+450水平下断裂带结构的 β_1 、 β_2 分别为 19.33、88.67, 结构面法线与最大主应力夹角 β 为 26°, σ_3 再定值下, 岩体承载强度 σ_1 与 β 关系曲线中水平线与结构面的破坏曲线相交于 a、b, a、b 两点对应于 β_1 、 β_2 如图 20 所示。由此可知乌东煤矿断裂带区域煤岩体沿结构面发生滑移错动, 开采扰动下更活跃。

β_1 、 β_2 计算公式为

$$\beta_1 = \frac{\phi_w}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_w \cot \phi_w) \sin \phi_w}{\sigma_1 - \sigma_3} \right] \quad (15)$$

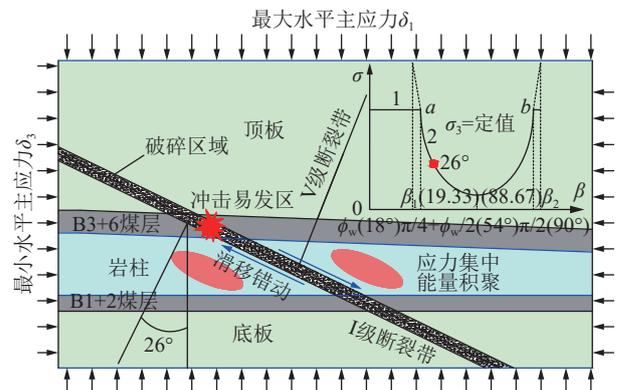


图 20 断裂带致灾机制

Fig.20 Disaster mechanism of fault zone

$$\beta_2 = \frac{\pi}{2} + \frac{\phi_w}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_w \cot \phi_w) \sin \phi_w}{\sigma_1 - \sigma_3} \right] \quad (16)$$

其中, c_w 、 ϕ_w 分别为结构面的黏结力与内摩擦角。

乌东煤矿断裂带在开采扰动下发生滑移错动的致灾机制如图 20 所示, 主要为以下几个方面: ① 应力、能量积累和释放的主要区域, 断裂带处岩石受应力作用发生弹性应变和塑性变形。当应力积累到一定程度后, 岩石发生破裂, 释放能量; ② 将煤岩体切割成多个块体, 弱化煤岩完整性及连续性, 降低整体强度及稳定性; ③ 当发生滑移错动时, 引起煤层应力重新分布, 增加冲击地压的强度和频率。

由以上对岩柱、遗留煤柱、断裂带等复杂空间结构应力异常机制的分析可知, 岩柱应力异常具有明显尺寸效应, 是急倾斜煤层开采煤岩灾变形成的主要结构。特殊空间结构加剧应力水平且其边缘区域应力突变, 煤岩活动不稳定, 是能量积聚及释放的优势区域。

4.4 复杂空间结构冲击地压发生机理分析

煤岩在微破裂稳定发育阶段形成低能矿震, 在非稳定破裂发育阶段形成高能矿震, 超过极限抗压强度后发生冲击。煤层开采使得煤岩体由三向应力状态转化为双向应力, 其抗压强度降低, 处于低临界载荷状态。因此高应力区域内三向状态时煤岩若处于微裂隙稳定发育阶段, 则在煤层开采扰动下转化为非稳定破裂发展阶段, 在特殊空间结构内应力水平更高, 则有可能超过极限抗压强度而发生冲击地压, 如图 21 所示。

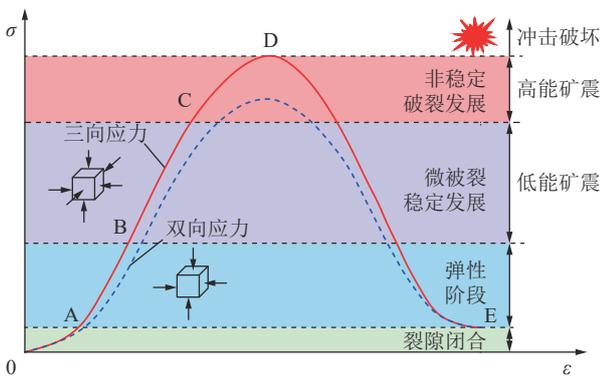


图 21 煤岩受载冲击机理

Fig.21 Impact mechanism of coal and rock under load

冲击地压发生在地下岩层内部, 其孕育及发生与所处地层的应力、能量状态密切相关, 当能量达到稳态与非稳态临界状态时, 开采扰动作用加剧能量向非稳态转化, 诱发冲击。煤岩体未被开挖前处于三向应力状态, 其内部本身储存一定的能量, 且应力水平越

高储存能量越高, 空间结构区域形成应力集中、能量积聚, 因此岩柱及特殊空间结构内煤岩应力、能量水平更高。冲击危险性更高, 结合动静载理论计算乌东煤矿急倾斜煤层开采冲击地压发生的临界能量^[41]。

冲击地压发生的能量表达式为

$$U_R + U_C + U_S > U_{b,\min} \quad (17)$$

式中, U_R 为围岩中储存的能量; U_C 为煤体储存的能量; U_S 为矿震能量; $U_{b,\min}$ 为煤岩破裂发生冲击时所需最小能量。

静载能量 U_j 和动载能量 U_d 为

$$U_j = U_R + U_C, U_d = U_S \quad (18)$$

破碎煤岩体向自由空间抛出的动能很大程度上取决于破碎煤岩体的平均初速度^[2]。研究表明, 当初速度 $< 1 \text{ m/s}$ 时不可能发生冲击地压, 而当初速度 $\geq 10 \text{ m/s}$ 时, 则冲击地压发生具有较高的可能性, 单位煤岩体冲击地压发生的最小动能为

$$U_{p,\min} = \rho v_0^2 / 2 \quad (19)$$

式中, $U_{p,\min}$ 为单位煤岩体发生冲击地压所需最小动能; v_0 为破碎煤岩体的平均初速度; ρ 为抛出破碎煤岩体的平均密度。单位煤岩体破碎所需消耗的能量为

$$U_{f,\min} = \sigma_c^2 / (2E) \quad (20)$$

其中, $U_{f,\min}$ 为单位煤岩体破碎所消耗能量; σ_c 为煤岩体单轴抗压强度。煤层开采使得煤岩卸荷, 由三向应力状态转化为双向应力状态, 因此其单轴抗压强度降低。煤岩发生冲击需满足破碎煤岩并将煤岩抛出, 因此其冲击所需最小能量为煤岩破碎消耗能量与抛出煤岩动能之和, 表示为

$$U_{b,\min} = U_{f,\min} + U_{p,\min} \quad (21)$$

根据乌东煤矿+400 水平 B3+6 煤层煤岩物理学参数测定, 煤样、岩样平均密度分别为 1300 、 2700 kg/m^3 , 平均单轴抗压强度分别为 10 、 40 MPa , 平均弹性模量分别为 2 、 10 GPa , 取煤岩冲击破坏时初速度为 10 m/s 。计算得出乌东煤矿煤体发生冲击地压的临界能量密度为 $9.0 \times 10^4 \text{ J/m}^3$, 岩体发生冲击地压的能量密度为 $2.15 \times 10^5 \text{ J/m}^3$, 因此以 $9.0 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ 作为乌东煤矿+400 水平冲击地压发生的临界能量。冲击地压发生存在 2 种形式: ① 纯静载型, 当静载能量达到冲击临界能量时, 发生冲击; ② 动静载叠加型, 当静载能量接近冲击临界能量时, 在动载作用下诱发冲击。因此静载是冲击发生的必要条件, 防冲应从弱化静载出发, 释放积聚在煤岩体内的能量, 使其低于

冲击临界能量。

5 急倾斜煤层开采冲击危险性评估

5.1 基于应力集中的冲击危险性评估

岩柱是冲击危险来源的地质大结构,岩柱撬动应力是诱发冲击地压的主要力源,因此评估冲击危险性首先考虑岩柱的撬动效应。煤柱、断裂带等特殊空间结构内应力集中程度更高,且其边缘应力异常,是诱发冲击地压的局部力源,因此评估冲击危险性重点考虑特殊结构应力集中和异常。由于煤层厚度仅为 40 m,倾向方向危险性无明显差异,因此评估冲击危险性只考虑走向。由记录的矿震及冲击事件震源位置与岩柱应力集中系数的对应关系,见表 3,可作为初步划分冲击危险区域的依据,求出其应力集中系数 r 平均值 \bar{r} 为 1.494,且 3 次冲击事故震源位置处应力集中系数均在 1.5 以上,因此考虑将 1.5 作为中等冲击危险划分的阈值,具体划分冲击危险性为

$$r = \begin{cases} r \leq 1.0 & \text{(无冲击危险)} \\ 1.0 < r \leq 1.5 & \text{(弱冲击危险)} \\ 1.5 < r \leq 2.0 & \text{(中等冲击危险)} \\ r > 2.0 & \text{(强冲击危险)} \end{cases} \quad (22)$$

煤柱、断裂带等特殊空间结构区域应力集中及异常,因此其冲击危险性升高一个等级,具体划分结果如图 22 所示。+450 水平 B3+6 煤层没有无冲击危险区域;弱冲击危险区域为 322~900、1 400~1 500 m;中等冲击危险区域为 272~322、900~1 400、1 500~1 950、2 323~2 500 m;强冲击危险区域为 1 950~2 323 m,以及 900、1 950、2 360 m 等 3 处岩柱应力拐点区域

表 3 急倾斜煤层开采矿震及冲击事故记录

Table 3 Record of mining earthquake and impact accident in steep seam

事件时间(年-月-日)	煤层走向位置/m	震源能量/MJ	应力集中系数 r
2016-11-24	1 946.26	9.50	1.59
2016-12-23	1 931.79	5.20	1.58
2017-02-01	1 852.81	210.00	1.55
2017-03-10	1 652.58	3.40	1.47
2017-03-21	1 731.54	39.00	1.50
2017-04-04	1 656.89	0.42	1.47
2017-04-14	1 610.12	0.40	1.45
2017-04-26	1 408.14	2.20	1.39
2017-07-10	1 527.28	0.24	1.43

附近。10⁴ J 及以上事件是高能级微震事件,是煤岩较大尺度的破裂引起的,对煤层开采安全性具有重要的影响,如图 22 所示,10⁴ J 以上事件基本上全部在中等及强冲击危险区域。

5.2 未采工作面冲击危险性评估

由+450 水平 B3+6 煤层冲击危险性评估及大能级微震事件震源定位分布特征的分析,可知上述冲击危险性评估方式较为合理,可依此对未开采煤层进行冲击危险性评估,以便在采掘中提前实施合理的防控减灾措施,做到未雨绸缪。

现阶段正在掘进+400 水平 B3+6 煤层巷道,因此对+400 水平 B3+6 煤层的冲击危险区域进行划分,评估不同区域冲击危险性,并根据掘进过程的现场微震数据进行工程验证。采用数值模拟得出岩柱应力演

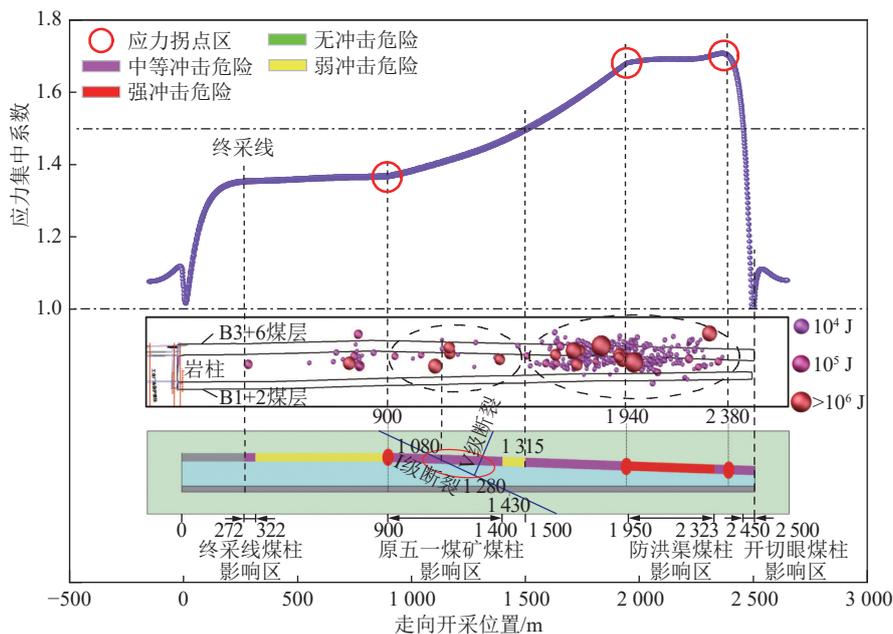


图 22 +450 水平 B3+6 煤层冲击危险性评估

Fig.22 Assessment of Impact Risk of B3+6 coal seam in +450 level

化特征,计算应力集中系数。结合特殊空间结构划分冲击危险区域,如图23所示。+400水平B3+6煤层没有无冲击危险区域;弱冲击危险区域为322~780 m;

中等冲击危险区域为272~322、780~1950、2323~2500 m;强冲击危险区域为1950~2323 m,以及900、1450、1850、2390 m等4处岩柱应力拐点附近。

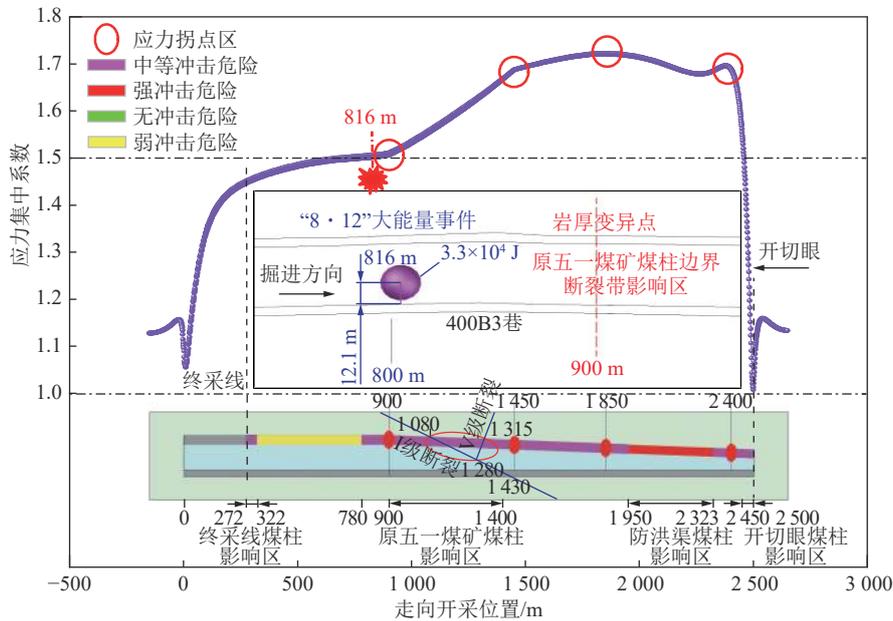


图23 +400水平B3+6煤层冲击危险性评估

Fig.23 Assessment of impact risk of B3+6 coal seam in +400 level

+400水平B3巷道掘进时,在2023-08-12发生1次大能量事件,工作面出现较大煤炮声,工作面有轻微扬尘,B3巷北帮煤体侧786~816 m出现底臃,平均底臃量40 cm,掘锚机、支护台车向南侧位移约40 cm。事件震源走向位置816 m,位于B3+6煤体中,震源能量 3.3×10^4 J,距B3巷12.1 m,位于掘进面后方11.5 m,如图23所示。

对比冲击危险区域划分结果,可知该事件发生区域为中等冲击危险区域。分析原因为该事件距离原五一煤矿煤柱边界(900 m岩厚变异点)仅84 m,且处于断裂带影响区,因此应力水平较高且存在异常突变情况,煤岩活动不稳定。巷道掘进使得煤岩卸荷,由三向应力状态转化为双向应力状态,抗压强度降低,因此在扰动作用下煤岩失稳快速破裂释放高能量。

+400水平B3巷掘进过程中该大能量事件发生表明对乌东煤矿复杂空间结构区域冲击危险性的评估较为合理,为后续掘进及回采时分区分级防控冲击危险提供科学依据,以便提前做好防控措施,将冲击危险性降到最低,避免人员伤亡、设备损毁,提高采掘效率。

6 结论

(1) 急倾斜巨厚煤层组岩柱应力异常具有明显尺寸效应,岩柱厚度更窄、出露高度更大其撬动效应更

强,应力水平更高。岩厚变异沿走向形成初采区、高应力区、应力梯度区、应力平稳区、未采区5个应力分区及3处应力拐点。B3+6煤层受顶板-岩柱双挤压作用,其开采使得B1+2煤层卸压释能。

(2) 岩厚变异区微震活动程度高于岩厚稳定区,且岩柱厚度更窄区域微震频次更多,能量更高,时空活动度更强,离散性更高。高应力区、应力梯度区、应力平稳区依次呈现“低频次-高能量”、“高频次-高能量”、“低频次-低能量”的微震响应特征。岩柱应力拐点处微震频次、能量及时空活动度、离散性异常突增。

(3) 遗留煤柱、断裂带等特殊空间结构区域微震事件簇集且能级增大,时空活动度及离散性陡增,且在结构边缘该特征更明显,能量积聚及释放速率增大,冲击地压发生的概率及强度更高。位于岩柱更窄区域的特殊空间结构内微震事件空间分布更集中,能级更大,时空活动度及离散性更高。

(4) 岩柱厚度越窄(煤柱高度越大)则岩柱向深的弯矩及能量增长速率越快,同一水平下岩柱厚度与弯矩、能量呈非线性负相关,煤柱高度与弯矩、能量呈非线性正相关。依据结构面强度效应推断出断裂带发生滑移错动,是能量积聚与释放的优势区域。揭示冲击地压发生机理为高静载及低临界载荷共同作用。基于应力集中特征评估不同区域的冲击危险性,工程

验证其划分合理有效,可作为后续采掘中冲击地压防控的科学依据。

参考文献(References):

- [1] 姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [2] 窦林名,何学秋.冲击地压防治理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2002.
- [3] 齐庆新,王守光,李海涛,等.冲击地压应力流理论及数值实现[J].煤炭学报,2022,47(1):172-179.
QI Qingxin, WANG Shouguang, LI Haitao, et al. Stress flow theory for coal bump and its numerical implementation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 172-179.
- [4] 潘一山,肖永惠,罗浩,等.冲击地压矿井安全性研究[J].煤炭学报,2023,48(5):1846-1860.
PAN Yishan, XIAO Yonghui, LUO Hao, et al. Study on safety of rockburst mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1846-1860.
- [5] 窦林名,贺虎,何江,等.冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法[J].煤炭学报,2018,43(2):327-332.
DOU Linming, HE Hu, HE Jiang, et al. New method of rock burst risk assessment using relative stress concentration factor superposition[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 327-332.
- [6] 姜福兴,舒湊先,王存文.基于应力叠加回采工作面冲击危险性评价[J].岩石力学与工程学报,2015,34(12):2428-2435.
JIANG Fuxing, SHU Couxian, WANG Cunwen. Impact risk appraisal of stope working faces based on stress superimposition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(12): 2428-2435.
- [7] 谭云亮,张修峰,肖自义,等.冲击地压主控因素及孕灾机制[J].煤炭学报,2024,49(1):367-379.
TAN Yunliang, ZHANG Xiufeng, XIAO Ziyi, et al. Analysis of main control factors of rock burst and disaster mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 367-379.
- [8] 曹安业,白贤栖,蔡武,等.覆岩厚度变化应力异常机制及冲击矿压诱发机理[J].岩土工程学报,2023,45(3):512-520.
CAO Anye, BAI Xianxi, CAI Wu, et al. Mechanism for stress abnormality and rock burst in variation zone of roof-stratum thickness[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(3): 512-520.
- [9] 赵同彬,郭伟耀,谭云亮,等.煤厚变异区开采冲击地压发生的力学机制[J].煤炭学报,2016,41(7):1659-1666.
ZHAO Tongbin, GUO Weiyao, TAN Yunliang, et al. Mechanics mechanism of rock burst caused by mining in the variable region of coal thickness[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1659-1666.
- [10] ZHU G G, DOU L M, LI Z L, et al. Mining-induced stress changes and rock burst control in a variable-thickness coal seam[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(5): 365.
- [11] 张明建,李锋,杨柳.大厚度变异系数煤层综放开采合理采放比研究[J].煤炭科学技术,2022,50(8):8-15.
ZHANG Mingjian, LI Feng, YANG Liu. Study on reasonable mining and caving ratio in fully-mechanized top-coal caving mining of coal seam with large thickness variation coefficient[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(8): 8-15.
- [12] 王宏伟,王晴,石瑞明,等.煤矿冲击地压与断层构造失稳的多物理场互馈机制研究进展[J].煤炭学报,2022,47(2):762-790.
WANG Hongwei, WANG Qing, SHI Ruiming, et al. A review on the interaction mechanism between coal bursts and fault structure instability from the perspective of multi-physical field[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 762-790.
- [13] 张宇博,单仁亮,赵善坤,等.卸载条件下逆冲断层滑移实验研究[J].煤炭学报,2021,46(12):3794-3804.
ZHANG Ningbo, SHAN Renliang, ZHAO Shankun, et al. Experiment of thrust fault slipping under unloading[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3794-3804.
- [14] 王同旭,曹明辉.采动影响下断层渐进破坏过程及能量释放规律研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(5):992-1001.
WANG Tongxu, CAO Minghui. Progressive failure process and energy release law of fault induced by coal exteaction[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(5): 992-1001.
- [15] 王联合,曹安业,郭文豪,等.“断层-褶皱”构造区巷道冲击地压机理及失稳规律[J].采矿与安全工程学报,2023,40(1):69-90.
WANG Lianhe, CAO Anye, GUO Wenhao, et al. Rock burst meachanism and characteristics of roadway in “fault-fold” structure area[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(1): 69-90.
- [16] 冯国瑞,白锦文,史旭东,等.遗留煤柱群链式失稳的关键柱理论及其应用展望[J].煤炭学报,2021,46(1):164-179.
FENG Guorui, BAI Jinwen, SHI Xudong, et al. Key pillar theory in the chain failure of residual coal pillars and its application prospect[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 164-179.
- [17] 杨伟利,姜福兴,温经林,等.遗留煤柱诱发冲击地压机理及其防治技术研究[J].采矿与安全工程学报,2014,31(6):876-887.
YANG Weili, JIANG Fuxing, WEN Jinglin, et al. Study on mechanisms of rock burst induced by a left coal pillar and prevention technology[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(6): 876-887.
- [18] 杨欢,郑凯歌,李彬刚,等.工作面过上覆遗留煤柱致灾机理及超前区域防治技术研究[J].煤炭科学技术,2023,51(9):46-54.
YANG Huan, ZHENG Kaige, LI Bingang, et al. Disaster mechanism during passing of working face under overlying remnant coal pillar and advanced regional prevention technology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 46-54.
- [19] 岳喜占,涂敏,李迎富,等.近距离煤层开采遗留边界煤柱下底板巷道采动附加应力计算[J].采矿与安全工程学报,2021,38(2):246-259.
YUE Xizhan, TU Min, LI Yingfu, et al. Calculation of subsidiary mining stress in floor roadway under the remaining boundary pillar of close coal seam mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(2): 246-259.
- [20] 崔峰,张随林,来兴平,等.急倾斜巨厚煤层组开采煤岩体联动诱冲机制与防冲调控[J].岩石力学与工程学报,2023,42(S1):3226-3241.
CUI Feng, ZHANG Suilin, LAI Xingping, et al. Coal and rock mass linkage induced impact mechanism and prevention and control rock burst in steeply-inclined and extremely-thick coal seam group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S1): 3226-3241.

- [21] 来兴平, 许慧聪, 陈建强, 等. 急斜采动夹持岩柱能量化特征及其调控方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(3): 429-438.
LAI Xingping, XU Huicong, CHEN Jianqiang, et al. Research on energy dissipation characteristics and control method of sandwiched rock pillar by steeply inclined mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(3): 429-438.
- [22] 蓝航. 近直立特厚煤层同采冲击地压机理及防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S2): 308-315.
LAN Hang. Rock-burst mechanism and prevention in mining suberect and extremely-thick coal seam with horizontal slicing method[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 308-315.
- [23] 杜涛涛, 李康, 蓝航, 等. 近直立特厚煤层冲击地压致灾过程分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 140-145.
DU Taotao, LI Kang, LAN Hang, et al. Rockburst process analysis in steeply-inclined extremely-thick coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(1): 140-145.
- [24] 高明仕, 赵一超, 高晓君, 等. 近直立特厚煤层组中间岩板诱发冲击矿压机理及防治[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 298-305.
GAO Mingshi, ZHAO Yichao, GAO Xiaojun, et al. Study on the mechanism of rock bursts caused by rock plates between subvertical extra-thick coal seams and its prevention and treatment[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(2): 298-305.
- [25] 吴振华, 潘鹏志, 赵善坤, 等. 近直立特厚煤层组“顶板-岩柱”诱冲机理及防控实践[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S1): 49-62.
WU Zhenhua, PAN Pengzhi, ZHAO Shankun, et al. Mechanism of rock bursts caused by “Roof-Rock pillar” in mining steeply-inclined and its prevention and treatment[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 49-62.
- [26] 李东辉, 何学秋, 陈建强, 等. 乌东煤矿近直立煤层冲击地压机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(5): 835-843.
LI Donghui, HE Xueqiu, CHEN Jianqiang, et al. Inducing mechanism of rockburst occurring in steeply-inclined coal seam of WUdong coal mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(5): 835-843.
- [27] 何学秋, 陈建强, 宋大钊, 等. 典型近直立煤层群冲击地压机理及监测预警研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 13-22.
HE Xueqiu, CHEN Jianqiang, SONG Dazhao, et al. Study on mechanism of rock burst and early warning of typical steeply inclined coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 13-22.
- [28] HE Shengquan, SONG Dazhao, HE Xueqiu, et al. Coupled mechanism of compression and prying-induced rock burst in steeply inclined coal seams and principles for its prevention[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 98: 103327.
- [29] 李安宁, 窦林名, 王正义, 等. 近直立煤层水平分段开采夹持煤体冲击机理及防治[J]. 煤炭学报, 2018, 43(12): 3302-3308.
LI Anning, DOU Linming, WANG Zhengyi, et al. Rock-burst mechanism and prevention of clamping coal in mining near-vertical coal seam with horizontal slice method[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12): 3302-3308.
- [30] 张宏伟, 荣海, 陈建强, 等. 基于地质动力区划的近直立特厚煤层冲击冲击地压危险性评价[J]. 煤炭学报, 2015, 40(12): 2755-2762.
ZHANG Hongwei, RONG Hai, CHEN Jianqiang, et al. Risk assessment of rockburst based on geo-dynamic division method in suberect and extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2755-2762.
- [31] 何生全. 近直立煤层群综放开采冲击地压机理及预警技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
HE Shengquan. Study on mechanism of rockburst and early warning technology in steeply inclined coal seams under fully mechanized top-coal caving mining[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [32] 闫瑞兵. 急倾斜煤层残留煤柱下综放工作面动力灾害防治研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
YAN Ruiqing. Study on dynamic disaster prevention under fully-mechanized mining face of the residual pillar of steeply inclined coal seam[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [33] 崔峰, 张随林, 来兴平, 等. 急倾斜巨厚煤层矿震诱冲机制及时空特征研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(S2): 449-463.
CUI Feng, ZHANG Suilin, LAI Xingping, et al. Study on the mechanism of rock burst induced by mine earthquake and the time-space characteristics of in steep and extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(S2): 449-463.
- [34] HE Shengquan, SONG Dazhao, HANI MITRI, et al. Integrated rockburst early warning model based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 142: 104767.
- [35] XU Huicong, LAI Xingping, ZHANG Shuai, et al. Precursor information recognition of rockburst in the coal-rock mass of meizoseismal area based on multiplex microseismic information fusion and its application: A case study of Wudong Coal Mine[J]. *Lithosphere*, 2022, 11: 7349759.
- [36] SHAN Peifeng, YAN Zhongming, LAI Xingping, et al. An analytical methodology of rock burst with fully mechanized top-coal caving mining in steeply inclined thick coal seam.[J]. *Scientific reports*, 2024, 14: 651.
- [37] 谷继成, 魏富胜. 论地震活动性的量化地震活动度[J]. 中国地震, 1987, 10(3): 14-24.
GU Jicheng, WEI Fusheng. Quantification of seismic activity: Seismic activity[J]. *Earthquake Research in China*, 1987, 10(3): 14-24.
- [38] 王书文. 矿井微震信号 b 值计算样本及参数选取研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(12): 51-56.
WANG Shuwen. Study on calculation sample and parameter selection of mine microseism signal b value[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(12): 51-56.
- [39] 张党育, 盖秋凯, 黄磊, 等. 工作面过废弃巷顶板微震时空演化机制及危险性分区[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3805-3818.
ZHANG Dangyu, GAI Qiukai, HUANG Lei, et al. Temporal and spatial evolution mechanism and risk zoning of microseisms in working face passing through the roof of old roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 3805-3818.
- [40] 蔡美峰, 何满朝, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [41] 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.