



移动扫码阅读

赵 丞, 王 永, 李志深, 等. 千米深井大能量事件多因素耦合分析[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 45–52.
ZHAO Cheng, WANG Yong, LI Zhishen, *et al.* Multi-factor coupling analysis of large-energy events in a kilometer deep mine[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 45–52.

千米深井大能量事件多因素耦合分析

赵 丞¹, 王 永², 李志深², 王 涛², 王维斌², 盖德成¹, 于海峰³, 王存文⁴, 陈 洋⁴, 董春雨⁴, 吴陈贺²

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 山东李楼煤业有限公司, 山东 菏泽 274900; 3. 济宁矿业集团公司 安居煤矿, 山东 济宁 272059; 4. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250014)

摘 要:以山东李楼煤矿为研究背景, 采用现场调研、工程对比、现场监测等方法, 对李楼煤矿 2020 年以来发生的大能量事件展开研究, 得出如下结论: ①系统分析了支承压力分布、工作面“见方”、过断层以及回采速度等 4 个影响因素与大能量微震事件的关系以及大能量事件的诱发原因。1302(上)工作面采动影响范围约为工作面后方 30 m 至工作面前方 170 m, 超前应力峰值约为工作面前方 70 m, 而侧向微震事件主要分布在沿空巷道附近, 整体向采空区一侧偏移; 1303 工作面微震事件在工作面推进方向的分布范围为工作面后 15 m 至工作面前 200 m, 超前应力峰值约为工作面前 80 m, 1303 工作面微震事件在侧向分布形态呈双峰型, 向运输巷一侧偏移, 受宽煤柱影响, 运输巷一侧应力集中程度高于回风巷一侧; 工作面“见方”前, 微震事件频次和能量逐渐增高, “见方”后趋于平稳; 在过断层前, 微震事件逐渐升高, 过断层期间急剧下降, 过断层后逐渐趋于平稳, 事件峰值位置距离“见方”前或断层前 40 m 左右; 当 1302(上)工作面回采速度为 50 m/月, 1303 工作面回采速度为 60 m/月时, 频次与能量最大。②通过分析大能量事件的诱发因素及发生位置, 可将大能量事件划分为 3 类: “能量积聚型”大能量事件、“断层活化型”大能量事件及“孤岛结构型”大能量事件, 并针对不同类事件提出具体的防控措施, 为周边类似地质因素和开采技术条件的矿井提供参考。

关键词:冲击地压; 微震监测; 大能量事件; 能量; 频次; 千米深井

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)05-0045-08

Multi-factor coupling analysis of large-energy events in a kilometer deep mine

ZHAO Cheng¹, WANG Yong², LI Zhishen², WANG Tao², WANG Weibin², GAI Decheng¹, YU Haifeng³, WANG Cunwen⁴, CHEN Yang⁴, DONG Chunyu⁴, WU Chenhe²

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Shandong Lilou Coal Industry Co., Ltd., Heze 274900, China; 3. Anju Coal Mine of Jining Mining Group Company, Jining 272059, China; 4. Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: Based on the research background of Shandong Lilou Coal Mine, this paper used methods such as on-site investigation, engineering comparison, and on-site monitoring to research on the high-energy events that have occurred in Lilou Coal Mine since 2020, and drew the following conclusions: ① Systematically analyzed the relationship between four influencing factors and high-energy microseismic events including the distribution of abutment pressure, working face “square”, crossing faults, and mining speed, and searched the causes of large energy events. The mining influence range of No.1302 (top) working face is about 30 m behind the face to 170 m in front, and the advanced stress peak is about 70 m in front. The lateral microseismic events are mainly distributed along the gob-side entry, and the whole is offset to the side of the goaf. The distribution of microseismic events at No.1303 working face in the advancing direction of the working face ranges from 15 m behind the face to 200 m in front of the face, and the advanced stress peak is about 80 m in front of the face. The microseismic event at the No.1303 working face is bimodal in the lateral distribution pattern, shifting to the belt grooves. Affected by the wide coal pillar, the stress concentration on the belt grooves is higher than that on the track tunnel. The frequency and energy

收稿日期: 2022-06-02 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0563

基金项目: 山东省重大科技创新工程资助项目(2019SDZY02)

作者简介: 赵 丞(1995—), 男, 山东滨州人, 硕士研究生。E-mail: zhaochenghero@163.com

of microseismic events gradually increased before the “square” of the work face, and stabilized after the “square”. Before crossing the fault, the microseismic events gradually increased, decreased sharply during the crossing, and gradually stabilized after crossing the fault. The peak position of the event was about 40 m in front of the “square” or before the fault. When the mining speed of 1302 (top) working face is 50 m/month and the 1303 working face is 60 m/month, the frequency and energy are the largest. ②By analyzing the inducing factors and locations of large-energy events, large-energy events can be divided into three categories: “energy accumulation type” high-energy events, “fault activation type” high-energy events, and “island structure type” high-energy events, and put forward specific prevention and control measures for different types. The research in this article will provide reference for surrounding mines with similar geological factors and mining technical conditions.

Key words: rockburst; microseismic monitoring; high-energy event; energy; frequency; kilometer deep wells

0 引言

冲击地压是严重威胁矿山安全生产的煤岩动力灾害之一,具有突发性、复杂性等特点^[1]。随着煤矿开采深度的增大,煤岩体的原岩应力水平逐渐增加,加之其他致灾因素,例如断层、褶曲等地质构造、开采强度、开采布局等的叠加影响,冲击地压的危险性越来越大,发生机理更加复杂,监测预警难度进一步增大^[2]。为此,基于微震监测结果^[3],分析诱发冲击地压的因素。

微地震监测技术^[4]的基本原理是:应力作用下的岩石破裂,产生微震和声波,通过在矿区顶底板上布置多组地震检波器,实时记录微地震数据。经过数据处理后,采用震动定位原理,确定断裂位置并显示在三维空间中。国内外众多学者对微震活动特征开展了卓有成效的研究^[5-14],姜福兴等^[15]利用微震监测技术揭示了采场覆岩空间破裂与采动应力场的关系,并提出了由微震事件分布推断区段煤柱稳定性的方法;夏永学等^[16]基于微震监测系统研究了微震活动与煤岩破裂及应力分布特征的关系,提出了微震预测预报冲击地压的5个指标;潘一山等^[17]对大型逆断层区域的微震事件进行科学的统计分析总结出了开采活动对断层活化的影响规律。窦林名等^[18]结合微震法的冲击危险性和定量评价方法,建立了冲击危险专家诊断系统,实现了通过矿震冲击灾害远程在线预警平台防治冲击地压。上述研究

表明,微震监测技术在冲击地压的发生机理,预测防治领域取得了显著的成果,但针对微震大能量事件诱发冲击地压的发生涉及较少。基于千米深井厚煤层工作面发生的大能量事件开展微震活动规律的研究,研究结果对类似条件下的冲击煤层安全回采具有借鉴意义。

1 矿井概况

山东某矿冲击危险区域共安排2个采煤工作面生产、2个掘进工作面掘进,分别为1303工作面、1302(上)工作面、1306运输巷、一采区辅助联络巷。共发生能量 10^2 J以上微震事件12921个,各区域微震频率分布为1302(上)工作面5326次,1303工作面6633次,1306工作面412次,其他地点412次,具体分布如图1所示。主要以研究1302(上)及1303工作面为主。1302(上)工作面平均采深740m;1303工作面平均采深950m,两工作面采用综放开采,工作面布置如图2所示。

2 大能量事件影响因素分析

根据现场监测分析可知,诱发大能量事件的因素主要有:支承压力、工作面“见方”、断层及回采速度等影响,以下作详细分析。

2.1 微震事件能量、频次与支承压力的关系

对2个工作面支承压力分布规律研究主要采用微震监测,具体分析如图3、4所示。1302(上)工作

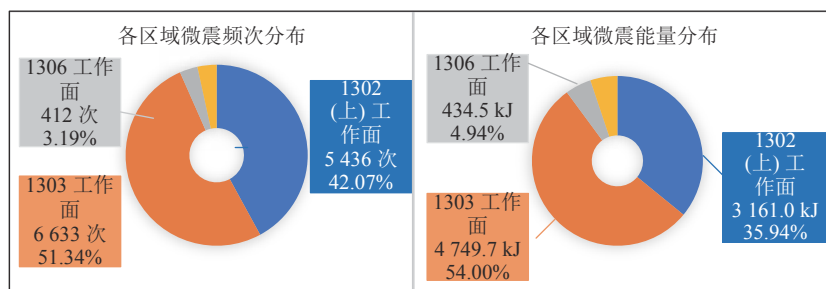


图1 各区域微震事件频次及能量分布情况

Fig.1 Frequency and energy distribution of microseismic events in various regions

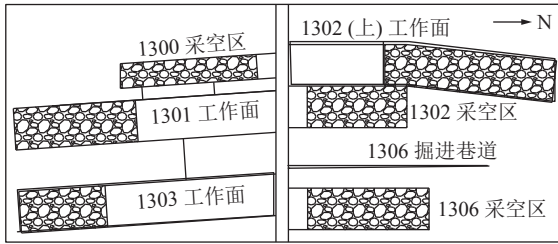


图 2 工作面布置

Fig.2 Plan view of working face position

面采动影响范围约为 170 m, 超前应力峰值约为 70 m。根据图 3b 可知, 微震事件主要分布在沿空巷道附近, 整体向采空区一侧偏移, 说明微震事件的发生受临近采空区的影响十分明显, 沿空侧煤体应力明显高于实体煤侧。1303 工作面超前支承压力影响范围 200 m, 峰值约为 80 m 位置。根据图 4b 可知侧向分布形态呈双峰型, 沿空侧应力集中程度高于实体煤一侧。

2.2 微震事件能量、频次与回采位置和断层的关系

1302(上)工作面过断层前, 大于 10^4 J 大能量微震事件在频次和能量上有所上升, 10^2 J、 10^3 J 级小能

量事件则有所降低; 1303 工作面见方前, 微震事件频次和能量逐渐增高, 见方后趋于平稳; 在过断层前, 微震事件逐渐升高, 过断层期间急剧下降, 过断层后逐渐趋于平稳。具体如图 5 所示。

2.3 微震事件频次、能量与回采速度的关系

为了增加区分度, 回采速度放大十倍进行展现。图 6 可知, 在排除“见方”和过断层期间大能量事件下, 随着回采速度的提高, 累计能量逐渐升高, 说明推进速度与释放能量成正比。当 1302(上)回采速度为 50 m/月, 1303 工作面回采速度为 60 m/月时, 频次与能量最大, 因此为减少大能量事件的发生, 后续生产中 1302(上)与 1303 工作面的回采速度应控制在 50 m/月与 60 m/月以内。

3 多因素耦合分析

3.1 大能量事件发生位置

2020 年 1302(上)工作面发生 10^4 J 以上微震事件 19 次; 自 2020 年至 2021 年 2 月 28 日, 1303 工作面发生 10^4 J 以上微震事件 31 次。在工作面推进方向上, 1302(上)工作面(一侧采空)大能量事件发生在

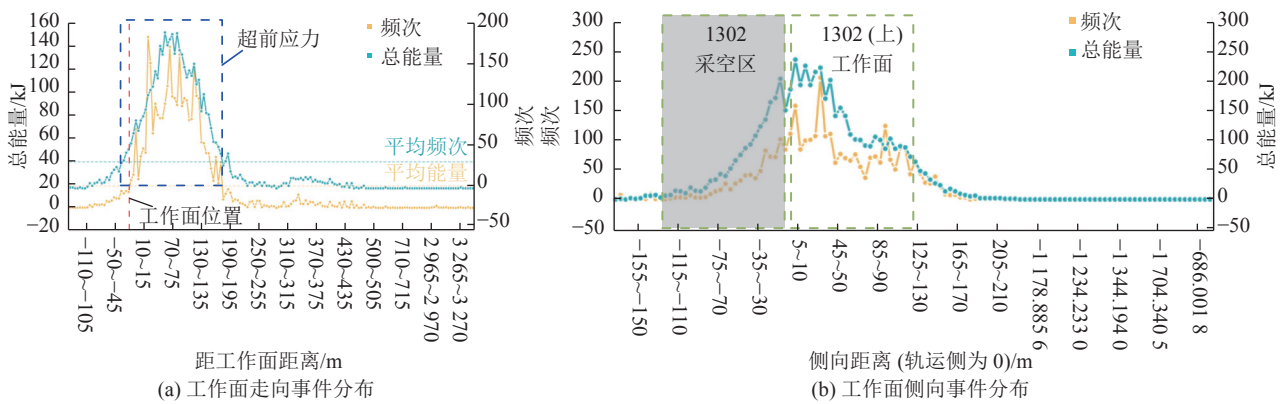


图 3 1302(上)工作面微震能量与频次分布规律

Fig.3 Law of microseismic energy and frequency distribution at 1302 (top) working face

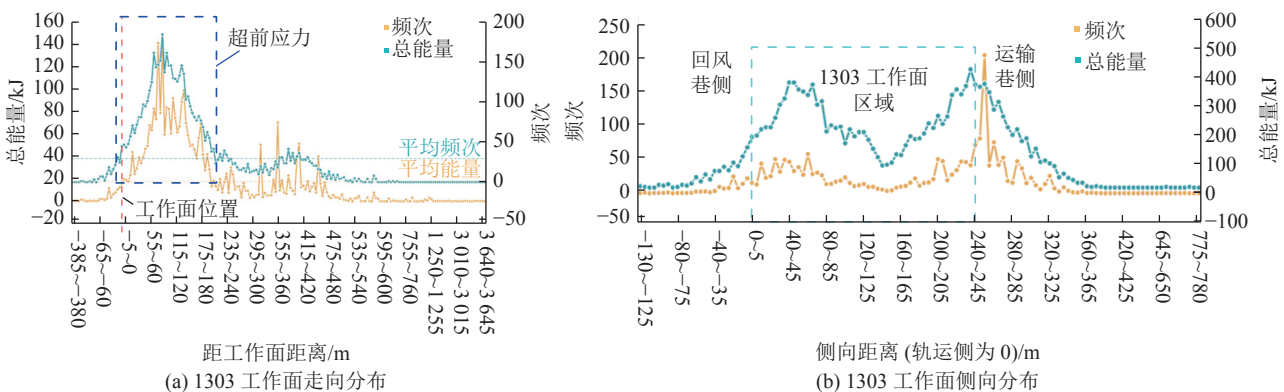


图 4 1303 工作面微震能量与频次分布规律

Fig.4 Law of microseismic energy and frequency distribution at 1303 working face

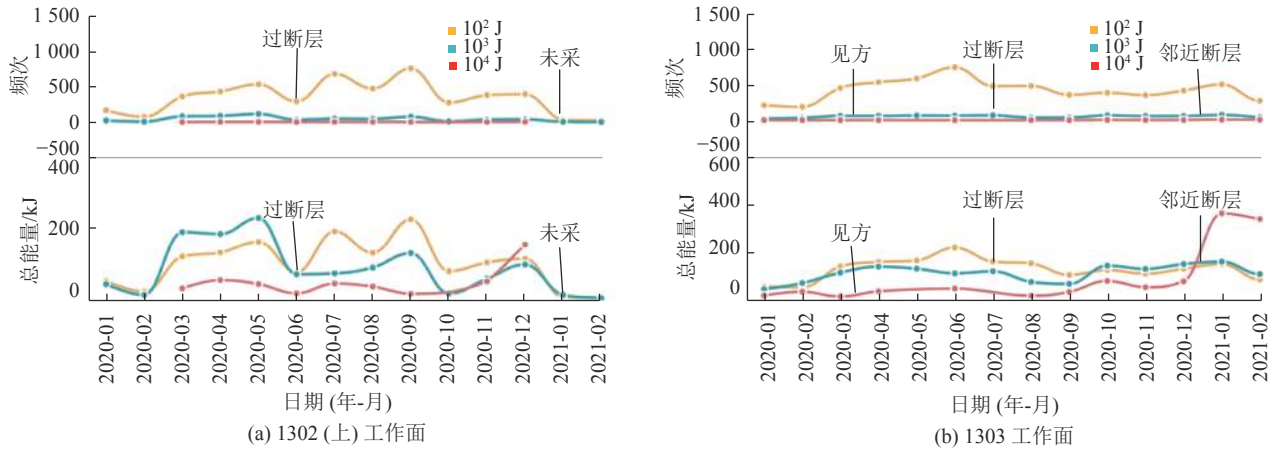


图5 回采过程中能量与频次的分布

Fig.5 Distribution of energy and frequency in the process of mining

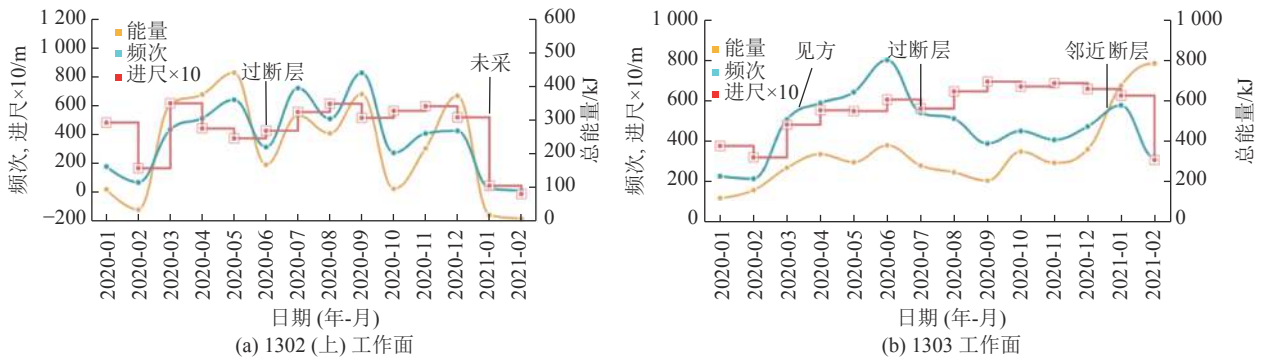


图6 微震能量及频次与回采速度的关系

Fig.6 Relationship between microseismic energy and frequency and mining speed

工作面前方 170 m 范围内; 1303 工作面(两侧实体)大能量事件基本在工作面前方 200 m 范围内, 受煤层大直径钻孔预卸压施工扰动影响, 发生了 5 次大能量事件。

3.2 能量积聚型大能量事件分析

震源超前 1302(上)工作面 21 m, 位于胶带巷道里侧 35 m, 距离 FJ34 断层距离为 132 m, 震源标高-774 m, 位于底板下 6 m 处, 能量 3.3×10^4 J。

根据图 7 所示的能量演化规律, “03-01”大能量事件的诱发是由于工作面停产 6 d 造成采场周边能量积聚, 恢复时能量突然释放。

为防止能量积聚型大能量事件的发生, 在工作面恢复生产前应采取大直径钻孔卸压, 如图 8 所示。施工参数为自停采处, 沿区段平巷两帮, 距当前停采处工作面以外 200 m 范围内实施大直径卸压钻孔, 每帮钻孔沿煤层单排布置, 钻孔直径为 125 mm, 孔深为 25 m, 钻孔间距 D 为 1 m, 卸压钻孔至巷道底板的距离为 1.5 m。大直径钻孔卸压后, 利用钻屑法检测卸压效果。若仍存在冲击危险, 可在两个钻孔中间补打大直径卸压钻孔。补打大直径钻孔卸压后,

若危险仍无法解除, 则采用爆破卸压。同时在复产初期, 回采速度不应过大, 应逐渐提高回采速度, 并分析微震、应力在线等监测数据, 逐渐达到合理的回采速度。

3.3 断层活化型大能量事件分析

震源超前 1303 工作面 71 m, 位于胶带巷道外侧 13 m, 距离 Yf19 断层最近距离为 71 m, 震源标高-919 m, 位于煤层中, 能量 4.8×10^4 J。大能量事件发生位置如图 9 所示。

“06-29”大能量事件其诱发是由于该区域处于 Yf19 断层、Yf9 断层尖灭区域, 断层残余构造应力造成 1301 工作面、1303 工作面煤柱应力集中; 且 1303 工作面处于周期来压阶段, 基本项的周期性断裂造成上覆岩层压力向工作面前方转移, 诱发了大能量事件(图 10)。

为了防止此类大能量事件的发生, 针对断层影响区域制定预卸压措施, 布置方式如图 11 所示。具体布置参数如下: 超前工作面 200 m, 对断层以里 100 m 和断层以外 30 m 范围内巷道两帮实施大直径钻孔预卸压, 钻孔直径为 150 mm, 钻孔间距 1 m, 钻

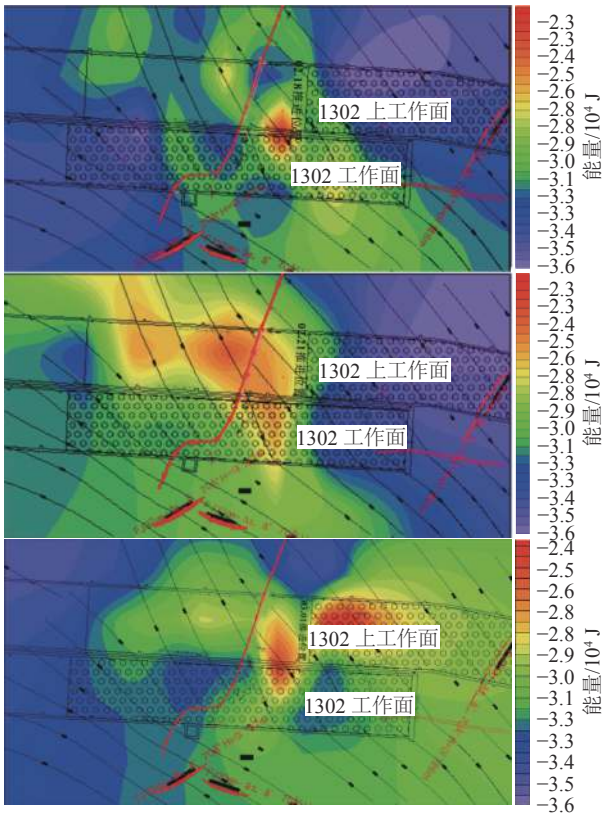


图 7 “03-01”事件微震能量场演化规律
Fig.7 The evolution law of the microseismic energy field of the “03-01” event

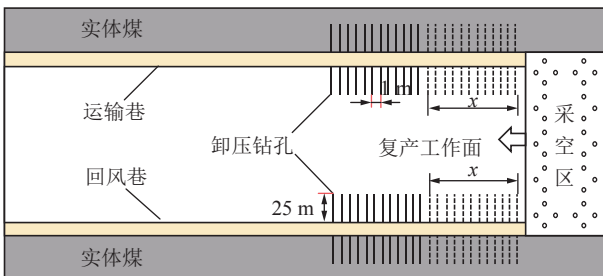


图 8 能量积聚型事件防控布置
Fig.8 Layout of the prevention and control of energy accumulation events

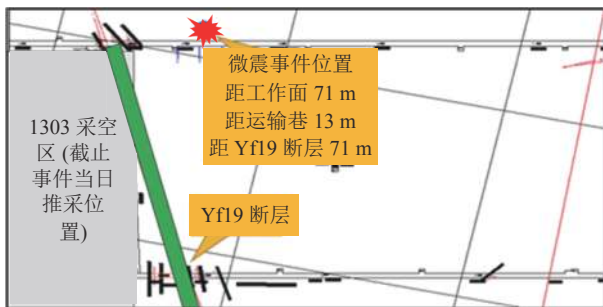


图 9 “06-29”大能量事件发生位置
Fig.9 Location of “6-29” large-energy event

孔深度 30 m, 卸压钻孔至巷道底板的距离为 1.5 m, 同时加强断层区域支护和监测。

3.4 孤岛结构型大能量事件分析

第一次发生在 2020 年 12 月 18 日, 震源超前 1302(上)工作面 15 m, 位于轨道巷道里侧 25 m, 距离 FY12 断层最近距离为 70 m, 震源标高为-817 m, 位于煤层中, 能量为 8.7×10^4 J。第二次发生在 2020 年 12 月 15 日, 震源超前 1303 工作面 294 m, 位于运输巷外侧 70 m, 距离 Yf18 断层最近距离 32 m, 震源标高-949 m, 位于底板下 24 m, 能量 4.8×10^4 J。第三次发生在 2021 年 2 月 8 日, 震源超前 1303 工作面 93 m, 位于运输巷外侧 1 m, 距离 2 号联络巷最近距离为 84 m, 震源标高-922 m, 位于顶板上 12 m, 能量 2.5×10^5 J。

结合其能量场演化规律, 如图 12 所示, 分析三次

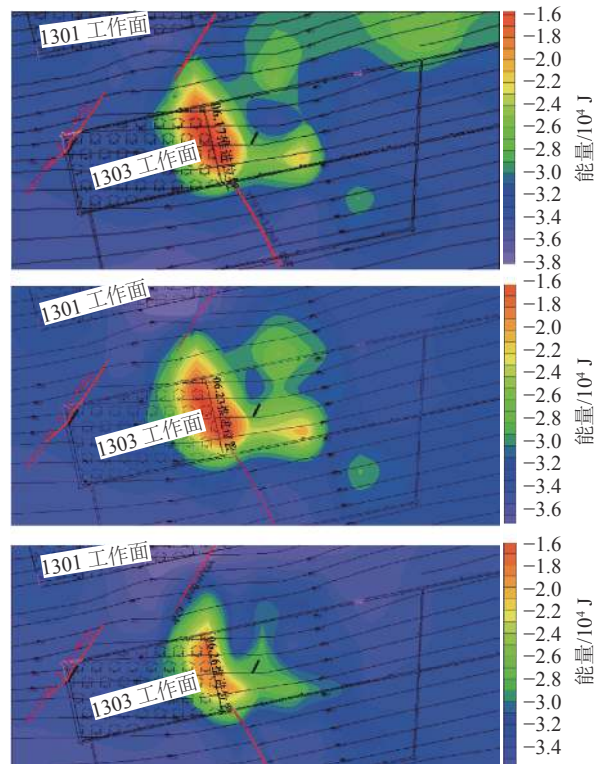


图 10 “06-29”事件微震能量场演化规律
Fig.10 The evolution law of the microseismic energy field of the “06-29” event

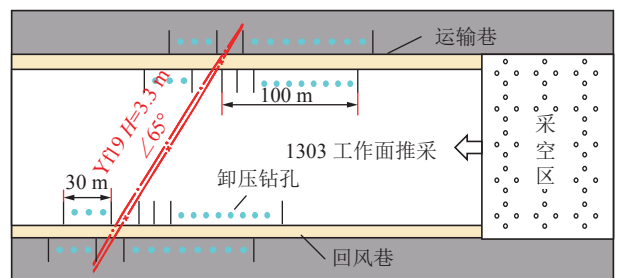


图 11 断层活化型事件防控布置
Fig.11 Layout of the prevention and control of fault-activated events

大能量事件的诱发原因。“12·18”大能量事件主要分布在1302(上)工作面前方邻近1302工作面终采线附近,分析其诱发是由于1302(上)工作面回采位置距离1302采空区的停采线仅剩余24 m,1302(上)、1302与FY12断层形成类孤岛煤体,随着工作面的推进,类孤岛煤体的面积减小,而总应力不变,单位面积上的应力增加,造成前方煤岩体应力集中程度增大,致使前方煤体产生剪拉混合破裂。“12·15”大能量事件主要分布在1303工作面前方两巷道、Yf18断层以及2号联络巷形成的孤岛结构内,其诱发原因是由于1303工作面两巷道、Yf18断层与2号联络巷形成

孤岛结构,与工作面超前支承压力叠加,形成高应力区。“02·08”大能量事件主要分布在工作面前方Yf18断层、2号联络巷等形成的孤岛结构内,分析其诱发原因主要有两方面,一是1303工作面地应力水平高。工作面埋深-980~-1 025 m,自重应力高;一采区位于八里庄断层与田桥断层控制的地垒构造内,区域构造应力集中;区域主水平应力为34.5 MPa,与巷道夹角为75°。二是区域采动应力高,工作面两巷道、Yf18断层与2号联络巷形成应力孤岛结构,与工作面超前支承压力叠加,形成高应力区。

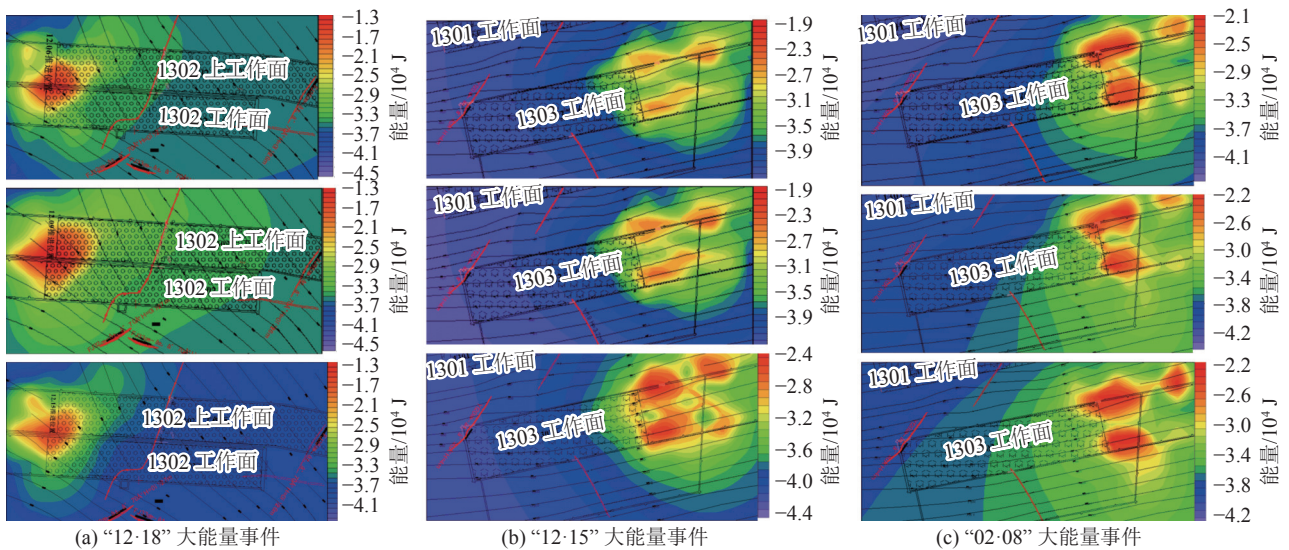


图12 孤岛结构型大能量事件能量场演化规律

Fig.12 Evolution law of the energy field of island structured large-energy events

对于孤岛结构型大能量事件的防控从降低围岩应力和软化煤岩物理力学性质两个方面着手。具体为在孤岛结构煤体区域,沿两巷道回采帮,实施大直径钻孔卸压。每帮钻孔沿煤层单排布置,钻孔直径为150 mm,孔深为30 m,钻孔间距 D 为3 m,卸压钻孔至巷道底板的距离为1.5 m。同时在卸压孔之间布置爆破孔,爆破孔直径为42 mm,深度为20 m,距离底板为1.5 m,布置参数如图13所示。

3.5 大能量事件震源机制分析

对选择的5个代表性大能量微震事件的震源破裂机制^[19-20]进行了分析,分析事件的破裂方式、角度以及破裂半径,大能量微震事件微震机制解及参数见表1,得出李楼煤矿大部分的大能量事件发生在超前支承压力影响范围内,部分大能量事件见方效应与超前支承压力相互作用、超前支承压力和断层相互耦合作用诱发,具体可划分为:断层附近顶板岩层

的张拉断裂,工作面前方煤体的剪切、剪拉混合破裂,底板岩层的张拉、剪切断裂等。

结合其震源定位,见表2,在走向方向上,5次大能量事件均发生在工作面前方。最近的发生在超前工作面15 m处的煤层中,1302(上)工作面回采接近1302采空区终采线位置,1302未完全回转下沉的高位岩梁与1302(上)采空区覆岩联动,形成“S”型覆

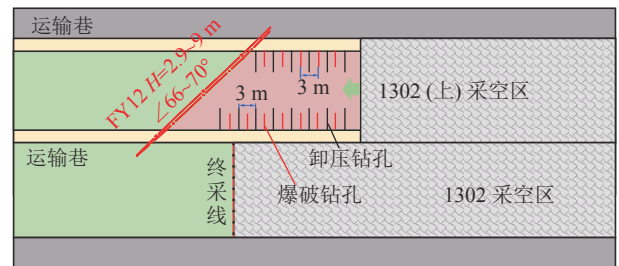


图13 孤岛结构型事件防控布置

Fig.13 Layout of island structure type events prevention and control

岩结构,应力向 1302(上)工作面运输巷位置转移,由于前方 FY12 断层的阻隔,造成该处煤体应力集中,引发了此次大能量事件;最远位置处于超前工作面

294 m 处,由于钻孔卸压及断顶爆破的影响,顶板断裂下沉,应力向工作面前方转移,致使 Yf18 断层活化,造成应力释放,引发此次大能量事件。

表 1 大能量微震事件微震机制解及参数

Table 1 Microseismic mechanism solutions and parameters of high-energy microseismic events

事件	ISO	DC	CLVD	倾角/(°)	走向距离/m	破裂类型
“03-01”大能量事件	8.486	69.906	21.608	88.974 70	118.552	剪切破裂
“12-18”大能量事件	16.400	50.470	33.130	81.000 0	142.000	混合破裂
“06-29”大能量事件	2.410	92.220	5.370	86.000 00	356.000	剪切破裂
“12-15”大能量事件	32.700	1.089	66.211	6.842 21	145.665	张拉破裂-缩
“02-08”大能量事件	33.200	0.360	66.440	75.000 00	196.000	张拉破裂-扩

表 2 代表性微震大能量事件清单

Table 2 List of representative microseismic large-energy events

序号	日期	标高/m	能量/ 10^4 J	超前工作面距离/m	层位	至巷道距离
1	2020-03-01	-774	3.30	21	底板下6 m	运输巷内35 m
2	2020-12-18	-817	8.70	15	煤层	回风巷内25 m
3	2020-06-29	-919	4.80	71	煤层	运输巷内13 m
4	2020-12-15	-949	3.70	294	底板下10 m	运输巷内70 m
5	2021-02-08	-922	2.50	93	顶板上12 m	运输巷内1 m

4 结 论

1)1302(上)工作面采动影响范围约为工作面后方 30 m 至工作面前方 170 m,超前应力峰值约为工作面前方 70 m,侧向上整体向采空区一侧偏移;1303 工作面采动影响范围为工作面后方 15 m 至工作面前方 200 m,超前应力峰值约为工作面前方 80 m,受宽煤柱影响,侧向上运输巷应力集中程度较高。

2)工作面“见方”或前方遇断层时,存在应力异常区域。工作面“见方”前,微震事件频次和能量逐渐增高,“见方”后趋于平稳;在过断层前,微震事件逐渐升高,过断层期间急剧下降,过断层后逐渐趋于平稳,事件峰值位置距离“见方”前或断层前 40 m 左右。

3)当 1302(上)回采速度为 50 m/月,1303 工作面回采速度为 60 m/月时,频次与能量最大,为减少大能量事件的发生,后续生产回采速度应不超过极限开采速度。

4)大部分的大能量事件发生在超前支承压力影响范围内,部分大能量事件见方效应与超前支承压力相互作用、超前支承压力和断层相互耦合作用诱发,具体可划分为:断层附近顶板岩层的张拉断裂,工作面前方煤体的剪切、剪拉混合破裂,底板岩层的

张拉、剪切断裂等。根据诱发条件可将大能量事件划分为“能量积聚型”、“断层活化型”及“孤岛结构型”大能量事件。

参考文献(References):

- [1] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等.我国煤矿冲击地压发展70年:理论与技术体系的建立与思考[J].煤炭科学技术,2019,47(9):1-40.
QI Qingxin, LI Yizhe, ZHAO Shankun, *et al.* Seventy years development of coal mine rockburst in China: establishment and consideration of theory and technology system[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(9): 1-40.
- [2] 张俊文,宋治祥,刘金亮,等.煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构[J].煤炭科学技术,2022,50(2):27-36.
ZHANG Junwen, SONG Zhixiang, LIU Jinliang, *et al.* Architecture of structural regulation technology for rock burst disaster in deep mining of coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 27-36.
- [3] 姜福兴,杨淑华.微地震监测揭示的采场围岩空间破裂形态[J].煤炭学报,2003,28(4):357-360.
JIANG Fuxing, YANG Shuhua. Spatial fracturing progresses of surrounding rock masses in longwall face monitored by microseismic monitoring techniques[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(4): 357-360.
- [4] 姜福兴,杨淑华,成云海,等.煤矿冲击地压的微地震监测研究[J].地球物理学报,2006,49(5):1511-1516.

- JIANG Fuxing, YANG Shuhua, CHENG Yunhai, *et al.* A study on microseismic monitoring of rock burst in coal mine[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1511–1516.
- [5] 肖鹏, 韩凯, 双海清, 等. 基于微震监测的覆岩裂隙演化规律相似模拟试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(9): 48–56.
- XIAO Peng, HAN Kai, SHUANG Haiging, *et al.* Similar material simulation test study on evolution law of overburden fracture based on microseismic monitoring[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(9): 48–56.
- [6] 曲效成, 徐旭, 辛崇伟, 等. 近水平厚煤层微震垂向定位优化及实践[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 81–86.
- QU Xiaocheng, XU Xu, XIN Chongwei, *et al.* Optimization and field practice of microseismic vertical positioning in near-level horizontal thick coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11): 81–86.
- [7] 姜福兴, 苗小虎, 王存文, 等. 构造控制型冲击地压的微地震监测预警研究与实践[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 900–903.
- JIANG Fuxing, MIAO Xiaohu, WANG Cunwen, *et al.* Predicting research and practice of tectonic-controlled coal burst by microseismic monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 900–903.
- [8] 王春秋, 蒋邦友, 顾士坦, 等. 孤岛综放面冲击地压前兆信息识别及多参数预警研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3523–3530.
- WANG Chunqiu, JIANG Bangyou, GU Shitan, *et al.* Study of precursor information recognition and multiparameter early warning before rockburst of island fully mechanized caving face[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3523–3530.
- [9] 孟祥军, 赵鹏翔, 王绪友, 等. 大倾角高瓦斯煤层采动覆岩“三带”微震监测及瓦斯抽采效果[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 177–185.
- MENG Xiangjun, ZHAO Pengxiang, WANG Xuyou, *et al.* "Three zones" microseismic monitoring and analysis of gas drainage effect of overlying strata in gob of high dip high gas seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 177–185.
- [10] 崔峰, 杨彦斌, 来兴平, 等. 基于微震监测关键层破断诱发冲击地压的物理相似材料模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 803–814.
- CUI Feng, YANG Yanbin, LAI Xingping, *et al.* Similar material simulation experimental study on rockbursts induced by key stratum breaking based on microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 803–814.
- [11] 李楠, 王恩元, 葛茂辰. 微震监测技术及其在煤矿的应用现状与展望[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 83–96.
- LI Nan, WANG Enyuan, GE Maochen. Microseismic monitoring technique and its applications at coal mines present status and future prospects[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 83–96.
- [12] 张宏伟, 李胜, 韩军, 等. 地质动力区划及其在冲击地压研究中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 191–202.
- ZHANG Hongwei, LI Sheng, HAN Jun, *et al.* Geo-dynamic division and its application in study of rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 191–202.
- [13] 王桂峰, 窦林名, 蔡武, 等. 冲击地压的不稳定能量触发机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 190–196.
- WANG Guifeng, DOU Linming, CAI Wu, *et al.* Unstable energy triggering mechanism of rock burst[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1): 190–196.
- [14] 蓝航, 杜涛涛. 急倾斜特厚煤层开采冲击地压发生过程监测与分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 78–82.
- LAN Hang, DU Taotao. Monitoring and analysis of rock burst process during steeply inclined and ultra thick seam mining[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 78–82.
- [15] 姜福兴, XUN Luo, 杨淑华. 采场覆岩空间破裂与采动应力场的微震探测研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 23–25.
- JIANG Fuxing, XUN Luo, YANG Shuhua. Study on microseismic monitoring for spatial structure of overlying strata and mining pressure field in longwall face[J]. Chinese Journal of Geotechnique Engineering, 2003, 25(1): 23–25.
- [16] 夏永学, 康立军, 齐庆新, 等. 基于微震监测的5个指标及其在冲击地压预测中的应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2011–2016.
- XIA Yongxue, KANG Lijun, QI Qingxin, *et al.* Five indexes of microseismic and their application in rock burst forecast[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2011–2016.
- [17] 潘一山. 巨厚砾岩影响下大型逆冲断层区域微震时空演化规律研究[C]. 第十届全国采矿学术会议. 中国内蒙古自治区鄂尔多斯: 2015.
- [18] 窦林名, 巩思园, 刘鹏, 等. 矿震冲击灾害远程在线预警平台[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(6): 48–53.
- DOU Linming, GONG Siyuan, LIU Peng, *et al.* Remote online early warning platform of mine seismic and bump disaster[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(6): 48–53.
- [19] 陈栋. 煤矿微震震源参数反演及震源破裂机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [20] 曹安业, 窦林名. 采场顶板破断型震源机制及其分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 3833–3839.
- CAO Anye, DOU Linming. Analysis of focal mechanism caused by rupture of stope roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 3833–3839.