

文章编号: 1004-4051(2024)01-0147-08

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20230864

深部地质构造区冲击地压时空监测预警技术

韩正灿¹, 石翔元¹, 申银朋¹, 张晓雷¹, 陈海龙¹, 朱广安²

(1. 陕西郭家河煤业有限责任公司, 陕西 宝鸡 721500;

2. 西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 针对郭家河煤矿 1309 工作面复杂地质构造开采条件, 根据微震监测数据, 分析工作面开采期间矿震频次、能量变化及震源时空演化特征, 获取工作面开采期间冲击地压危险前兆信息; 针对性提出了将矿震时空演化中长期动态预警与冲击变形能短临时空预警相结合的冲击地压监测预警方法: 通过矿震时空演化指标对工作面冲击危险做出周期性动态评价, 预测下一时段的强矿震及动力显现位置, 并进行后续卸压效果检验; 冲击变形能指数在时序上实时反映监测区冲击危险状态, 并实时预测工作面动力显现与强矿震发生时间, 提供及时的冲击危险预警信息, 指导现场采取相应防治对策, 实现对郭家河煤矿深部地质构造应力集中区冲击地压危险区域的动态探测与(半)定量预警。

关键词: 构造应力集中; 冲击地压; 微震监测; 冲击变形能; 动态预警

中图分类号: TD324 **文献标识码:** A

Spatio-temporal monitoring and pre-warning technology for rockburst in deep geological structure areas

HAN Zhengcan¹, SHI Xiangyuan¹, SHEN Yinpeng¹, ZHANG Xiaolei¹,
CHEN Hailong¹, ZHU Guangan²

(1. Shaanxi Guojiahe Coal Industry Co., Ltd., Baoji 721500, China;

2. College of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In response to the complex geological structure of 1309 working face in Guojiahe Coal Mine, based on the microseismic monitoring data, the frequency of mining tremors and energy change, and spatio-temporal evolution characteristics of mining tremors focus during mining are analyzed, to obtain the precursor information of rockburst hazards. A targeted combining approach bursting strain energy used for short-term spatial-temporal monitoring and spatio-temporal evolution of mining tremors used for long-term dynamic pre-warning is proposed. By using the spatio-temporal evolution index of mining tremors, a periodic dynamic evaluation of rockburst risk of the working face is made, and the location of strong mining tremors and dynamic manifestations in the next period is predicted, and subsequent pressure relief effect inspection is conducted. The bursting strain energy index reflects the real-time rockburst risk status in time series, predicts the dynamic manifestation and the occurrence time of strong mining tremors in real-time, provides timely rockburst risk pre-warning information, and

收稿日期: 2023-11-29 责任编辑: 刘硕

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(编号: 51904235)

第一作者简介: 韩正灿(1987—), 男, 汉族, 江苏徐州人, 工程师, 主要从事冲击地压防控研究, E-mail: 289676246@qq.com。

通讯作者简介: 朱广安(1989—), 男, 汉族, 江苏盐城人, 博士, 副教授, 主要从事冲击地压防控研究, E-mail: zhuguangan@163.com。

引用格式: 韩正灿, 石翔元, 申银朋, 等. 深部地质构造区冲击地压时空监测预警技术[J]. 中国矿业, 2024, 33(1): 147-154.

HAN Zhengcan, SHI Xiangyuan, SHEN Yinpeng, et al. Spatio-temporal monitoring and pre-warning technology for rockburst in deep geological structure areas[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(1): 147-154.

guides the on-site implementation of corresponding prevention and control measures, which realizes dynamic detection and(semi) quantitative warning of rockburst risk areas in the deep geological structure stress concentration area of Guojiahe Coal Mine.

Keywords: structural stress concentration; rockburst; microseismic monitoring; bursting strain energy; dynamic pre-warning

0 引言

随着开采深度的增加,受复杂构造、高地应力等因素影响,厚煤层诱发冲击、强矿震的危险性较高,大大增加了冲击地压防控工作难度。根据相关研究,冲击地压影响因素可分为地质构造和开采技术两部分,其中,地质构造影响因素包括断层、褶曲、煤岩相变等^[1-2]。断层、褶曲等构造区经历漫长地质作用后本身应力集中程度高,受采动影响,地质构造影响范围扩大,导致冲击危险进一步升高。

在地质构造应力集中诱发冲击机理及防治研究方面,曹安业等^[3]、井广成等^[4]基于数值模拟和现场实测方法分析了褶皱构造区工作面回采期间顶板、煤层和底板的应力演化特征,探讨了褶皱构造区冲击地压发生机理。赵耀中等^[5]基于地应力测试结果,分析了矿区地应力场类型及与构造分布的关系,反演了矿区地应力场的分布规律。贺虎等^[6]根据华亭煤矿250102工作面开采过程中微震监测数据,得出强矿震大部分发生在向斜轴部,向斜轴处冲击动力灾害危险高于其他位置。姜耀东等^[7]通过数值模拟研究分析了断层附近矿山压力分布规律,断层面正应力变化总是早于剪应力,工作面距离断层越近或者下盘开采时,断层滑移危险程度越高。李振雷等^[8]建立了断层煤柱型冲击地压力学模型,研究了断层区采动诱冲机制,并提出了针对性的防控措施。朱广安等^[9]建立断层赋存条件下的孤岛工作面开采的数值模型,确定了断层滑移失稳的判定准则,总结了断层滑移失稳与冲击危险之间的关系。

上述研究为深部地质构造区冲击危险的监测预警提供了理论基础^[10-12]。目前冲击地压监测预警采用区域监测和局部监测相结合的方式:区域监测主要采用微震监测;局部监测包括钻屑、应力、地音和电磁辐射等^[13-16]。由于冲击动力灾害的复杂性,单一监测预警方法无法满足冲击动力灾害监测预警的需要,因此,多参量综合监测是目前应用较广泛的一种监测预警模式,将岩石力学与地球物理方法相结合^[17-19]。

本文基于郭家河煤矿1309工作面开采过程中微震分布规律,首先分析工作面开采期间矿震频次、能量变化及震源时空演化特征,进而分析冲击变形能指数时序演化规律,最终构建矿震时空演化中长期

动态预警与冲击变形能短临时空预警相结合的冲击地压监测预警方法,以期为矿井后续工作面地质构造应力集中区冲击地压监测预警提供参考。

1 工程背景

1309综放工作面位于郭家河煤矿I盘区东翼,+820 m水平,开采3#煤层。该工作面设计可采走向长度1 078 m,工作面长度为225 m(平距)。井下位置北侧为1307工作面采空区,南侧靠近零点边界,西侧为1301工作面采空区,东侧为II盘区未开采区。1309工作面布置情况如图1所示。

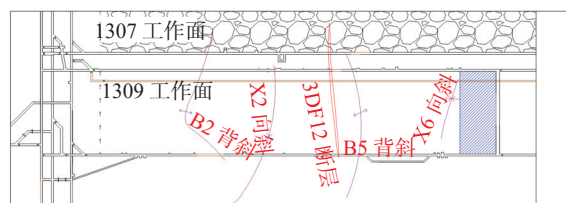


图1 1309工作面布置平面图

Fig. 1 Layout plan of 1309 working face

1309工作面地质构造复杂,根据三维地震勘探资料和掘进情况分析,工作面有1条断层(3DF12断层),横贯整个工作面,对回采有一定影响;褶曲发育较多,起伏较大,共有2个背斜(B2背斜、B5背斜),2个向斜(X2向斜、X6向斜)。

2 矿震活动时空分布规律

目前,郭家河煤矿装备了SOS微震监测系统,可根据连续记录煤岩体内出现的动力现象,预测煤矿动力现象危险状态。根据1309工作面回采过程中地质构造附近的微震分布情况,为工作面地质构造区冲击危险预测提供依据。

2.1 微震时间序列分布

1)断层。1309工作面内3DF12断层地理位置及工作面过断层前后微震区域总能量-频次分布情况,如图2所示。3DF12断层(落差0~15 m)后方附近动载扰动较小,能量与频次均较低,而距离3DF12断层前方200~300 m处,能量与频次均达到峰值,对工作面回采影响较大,应及时采取卸压措施。

2)褶曲。1309工作面褶曲位置及过X6向斜、B5背斜、X2向斜和B2背斜区域能量-频次分布如图3所示。由图3(b)可知,由于X6向斜位于工作面

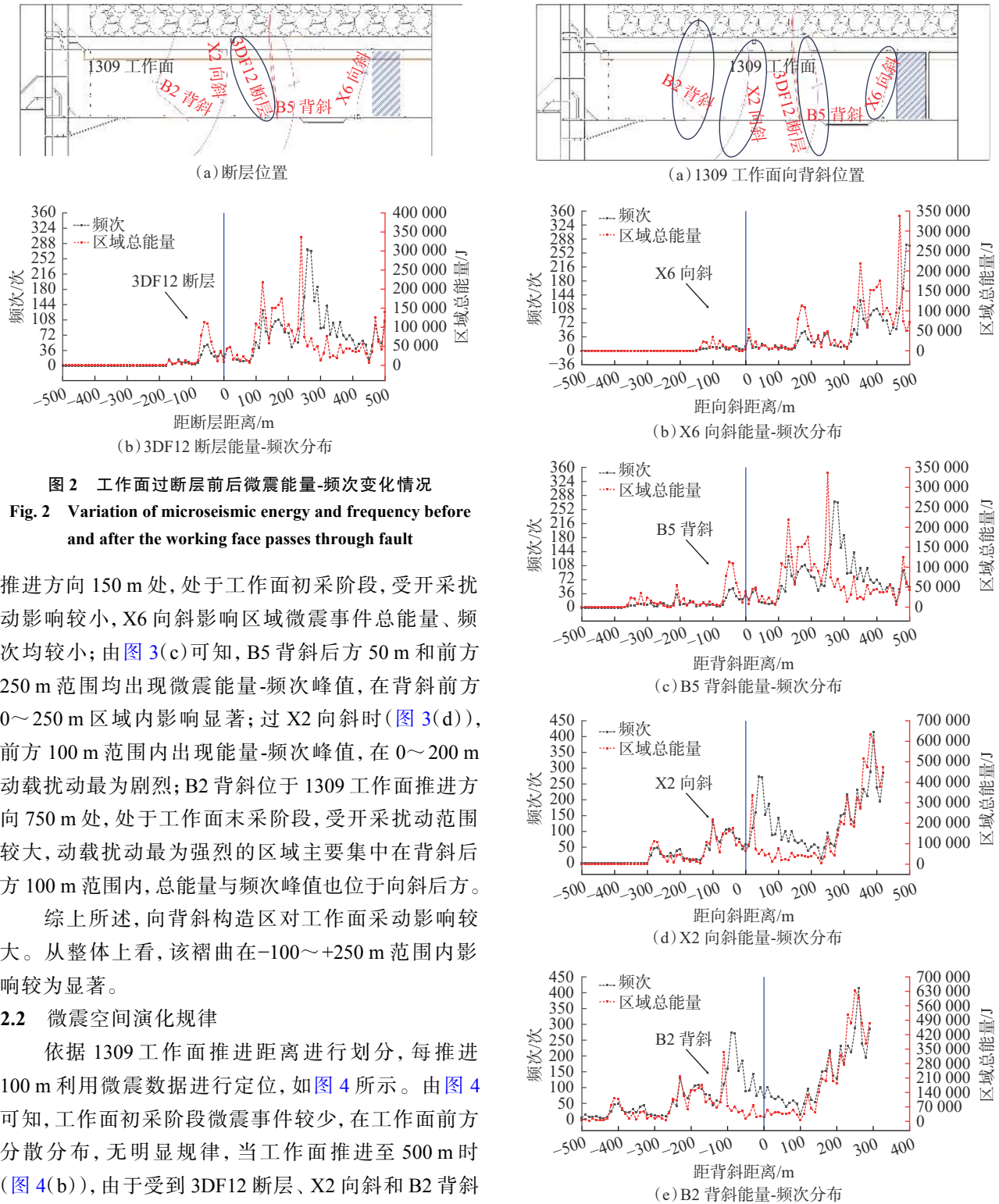


图2 工作面过断层前后微震能量-频次变化情况

Fig. 2 Variation of microseismic energy and frequency before and after the working face passes through fault

推进方向 150 m 处, 处于工作面初采阶段, 受开采扰动影响较小, X6 向斜影响区域微震事件总能量、频次均较小; 由图 3(c) 可知, B5 背斜后方 50 m 和前方 250 m 范围均出现微震能量-频次峰值, 在背斜前方 0~250 m 区域内影响显著; 过 X2 向斜时 (图 3(d)), 前方 100 m 范围内出现能量-频次峰值, 在 0~200 m 动载扰动最为剧烈; B2 背斜位于 1309 工作面推进方向 750 m 处, 处于工作面末采阶段, 受开采扰动范围较大, 动载扰动最为强烈的区域主要集中在背斜后方 100 m 范围内, 总能量与频次峰值也位于向斜后方。

综上所述, 向背斜构造区对工作面采动影响较大。从整体上看, 该褶皱在 -100~+250 m 范围内影响较为显著。

2.2 微震空间演化规律

依据 1309 工作面推进距离进行划分, 每推进 100 m 利用微震数据进行定位, 如图 4 所示。由图 4 可知, 工作面初采阶段微震事件较少, 在工作面前方分散分布, 无明显规律, 当工作面推进至 500 m 时 (图 4(b)), 由于受到 3DF12 断层、X2 向斜和 B2 背斜地质构造复合影响, 微震事件在工作面前方明显增多; 当工作面推进至 600 m 时 (图 4(c)), B2 背斜构造附近微震事件集中, 主要集中在 B2 背斜与巷道的交叉位置, 多数为 10^2 J 微震事件和 10^3 J 微震事件; 当工作面推进至 900 m 时 (图 4(d)), 由于工作面为末采阶段受回采扰动和 B2 背斜的影响, 在停采线附近巷道交叉区域出现应力集中现象, 微震事件分布密集, 10^3 J 微震事件占总事件的 24.93%, 10^2 J 微震事件

图3 工作面过褶皱前后微震能量-频次变化情况

Fig. 3 Variation of microseismic energy and frequency before and after the working face passes through the fold

的能量占总能量的 85.38%。

3 冲击变形能时空短临监测预警

本文提出了时间序列的冲击变形能预警指标 W_e , 从时间上对当前冲击地压危险进行预警, 指标构建

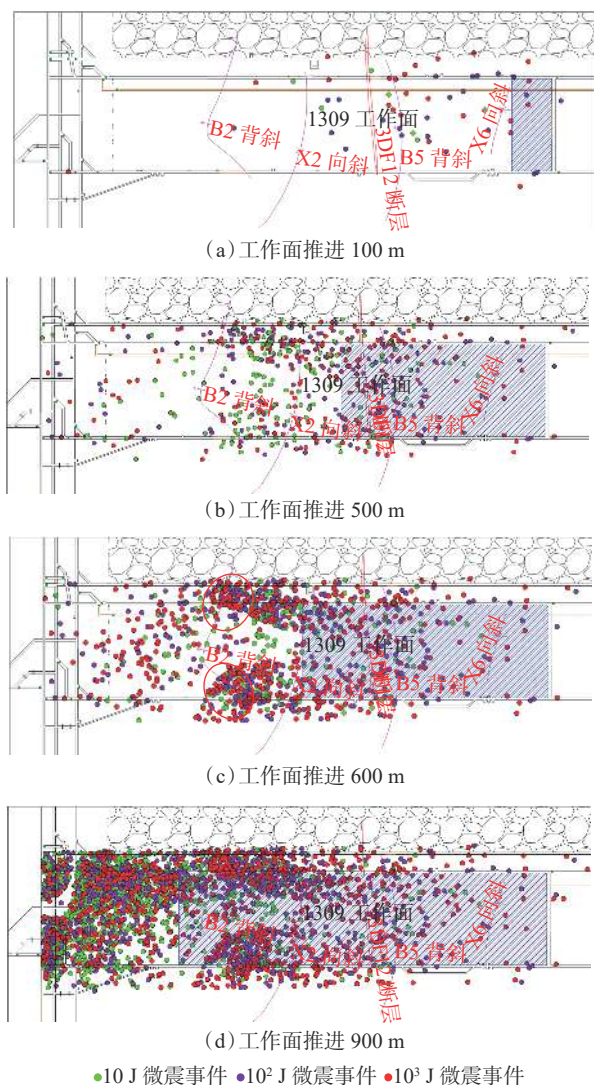


图4 1309工作面回采期间平面震源分布

Fig. 4 Microseismic distribution during the mining period of 1309 working face

见式(1)和式(2)^[20]。

$$W_e = \frac{E_{et} - E_0}{E_{et} - E_0} \quad (1)$$

$$E_{et} = \sum_{i=1}^N \sqrt{E_i} \quad (2)$$

式中: N 为上一次宏观破裂之后矿震事件总数, 个; E_i 为上一次宏观破裂之后第 i 次矿震事件所释放的能量, J; E_{et} 为冲击变形能的当前值, J; E_{et} 为冲击变形能的临界值, J; E_0 为冲击变形能的初始值, J, 其默认设置为 0。 $W_e=0\sim 1$, 且当 W_e 分别处于 $0\sim <0.25$ 、 $0.25\sim <0.50$ 、 $0.50\sim <0.75$ 、 $0.75\sim <1$ 时, 对应冲击危险等级分别为无、弱、中等与强。

3.1 冲击变形能时序演化规律分析

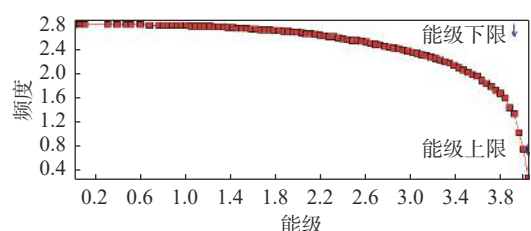
对于工作面尺度的微震事件, 当事件足够多时,

工作面微震事件的能量及频次满足 G-R 幂率关系, 见式(3)。

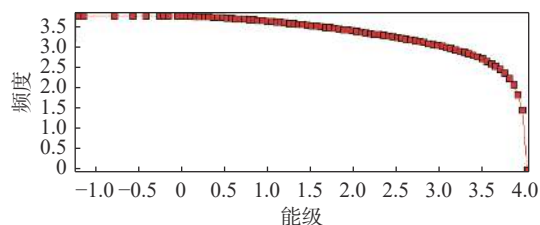
$$\lg N = a - b \lg E \quad (3)$$

式中: N 为微震事件能量大于或等于 E 的微震事件频次, 次; $\lg N$ 为微震事件的频度; E 为微震事件能量, J; $\lg E$ 为微震事件的能级; a 、 b 为常数。

取 1309 工作面自开采以来至工作面回采前 1 000 m 的微震事件进行分析 (2021-03-30—2021-12-17), 工作面每推进 500 m 统计微震事件的能级-频度关系曲线, 如图 5 所示。



(a) 工作面回采前 500 m (2021-03-08—2021-07-03)



(b) 工作面回采 500~<1 000 m (2021-07-04—2021-12-17)

图5 1309工作面回采前 1 000 m 能级/频度曲线

Fig. 5 Energy level/frequency curves for mining 1 000 m of 1309 working face

由图 5 可知, 1309 工作面回采前 1 000 m 以来, 微震事件能级/频度基本满足负相关关系, 即微震事件的能级越高, 该能级微震事件发生的次数越少。微震事件的能级-频度适中, 曲线基本呈线性分布, 斜率和截距基本恒定, 微震事件能级最高为 1.4×10^4 J, 无 10^5 J 级别大微震事件出现。由此可见, 1310 工作面回采期间能量释放平稳, 以工作面回采期间出现的最高能量的微震事件作为临界值, 进行冲击变形能演化规律分析。绘制 1310 工作面回采前 1 000 m 微震事件的冲击变形能时序曲线进行分析, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 若以 9 790 J 级别微震事件作为评判工作面高能量释放的临界值, 1310 工作面回采前 500 m 整体位于冲击变形能预警阈值以下, 仅有 1 个时段达到了 1.0 的预警阈值, 为 4 月 19 日, 所对应工作面推进度为 319 m, 但预警时段内工作面未出现 10^4 J 以上微震事件, 这表明 1310 实体煤工作面回采前 500 m 矿压非常平稳。

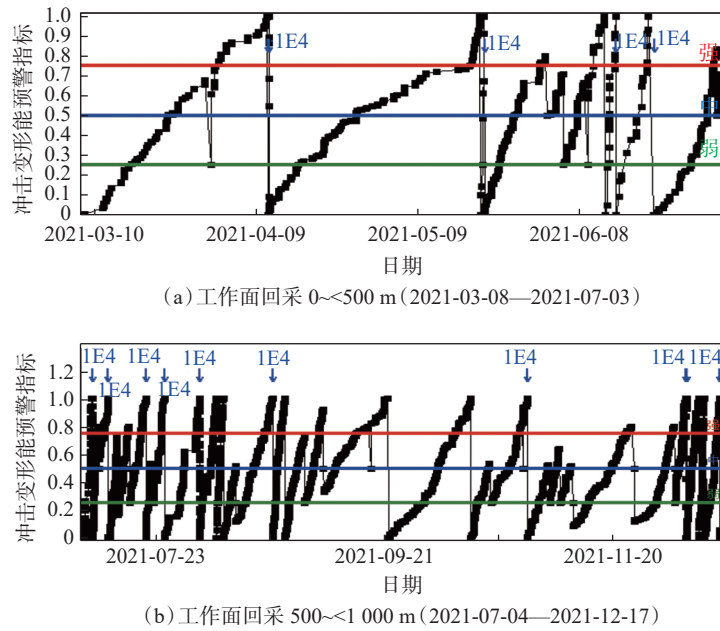


图6 1309工作面回采前1 000 m冲击变形能时序曲线

Fig. 6 Time series curve of bursting strain index for mining 1 000 m of 1309 working face

1310工作面回采前500~<1 000 m时,同样只有1个时段达到了冲击变形能预警阈值,为10月11日,所对应工作面推进度为744.6 m,工作面出现了9 930 J较大能量微震事件,且在后续10月17日,工作面又出现了8 680 J较大能量的微震事件,对应采掘工程平面图,这段时间为工作面由实体煤回采进入临空工作面的外错区域,受拐角煤柱区域的应力叠加影响,大能量事件的出现次数明显高于前期实体煤回采区域,表明10月11日—10月17日这段时间是一个能量积聚期,工作面受到的动力扰动能量和频次均明显提高,可以将此项指标用于工作面外错等应力异常区域的冲击危险性分析。

3.2 冲击变形能空间演化规律分析

定义空间上的冲击变形能指数为单位面积、单位时间内的应变能量总和,可通过该指标来描述微震事件造成的区域震动场能量积聚程度。同时为了使结果更为精细化,便于定量描述,对最终结果进行对数处理,见式(4)。

$$\varepsilon_E = \lg\left(\frac{\sum \sqrt{E_i}}{ST}\right) \quad (4)$$

式中: E_i 为落入统计区域内第 i 个矿震的能量, J; S 为统计区域面积, m^2 ; T 为统计时间, d。

为统计1309工作面在向斜、背斜、断层等构造异常区域的能量释放情况,绘制工作面每推进50 m的冲击变形能指数云图,统计区域与震源定位区域相同,统计滑移半径取30 m,网格划分间距取10 m。得到1309工作面推进前1 000 m(2021年3月8日—

2021年12月17日)的冲击变形能空间演化云图,如图7所示。

由图7可知,1309工作面回采期间能量积聚规律如下所述。①4月8日—4月17日,1309工作面推进度为150~<200 m,能量释放集中区位于B5向斜轴部和X2向斜轴部区域,工作面整体能量释放集中区面积相比之前增大,推测主要受超前支承压力与褶曲轴部应力集中影响。分析表明,1309工作面推进150~<200 m无来压现象,B5向斜轴部和X2向斜区域为相对高应力区。②4月28日—5月12日,1309工作面推进度为250~<300 m,工作面当前推进区域与褶曲、断层距离较远,推进区域及褶曲、断层区域均无明显能量释放,工作面整体能量释放集中区面积较小。③5月13日—5月26日,1309工作面推进度为300~<350 m,工作面当前推进区域位于B5背斜前50 m,3DF12断层前80 m,工作面推进区域及B5背斜、3DF12断层区域和X2向斜轴部均出现了大面积应力集中区,高应力区面积相比上一阶段明显增加。④5月27日~6月4日,1309工作面推进度为350~<400 m,工作面过B5背斜轴部,与3DF12断层距离约为30 m。工作面当前推进区域与3DF12断层前50 m、B2背斜轴部区域均出现了大面积应力集中区,3DF12断层前应力集中程度升高,但工作面整体高应力区面积相比上一阶段减小。该推进度下能量释放集中区主要集中于工作面中部,以及工作面靠近临空侧的宽煤柱区域。⑤7月4日—7月14日,1309工作面推进度为500~<550 m,工作面当前推进

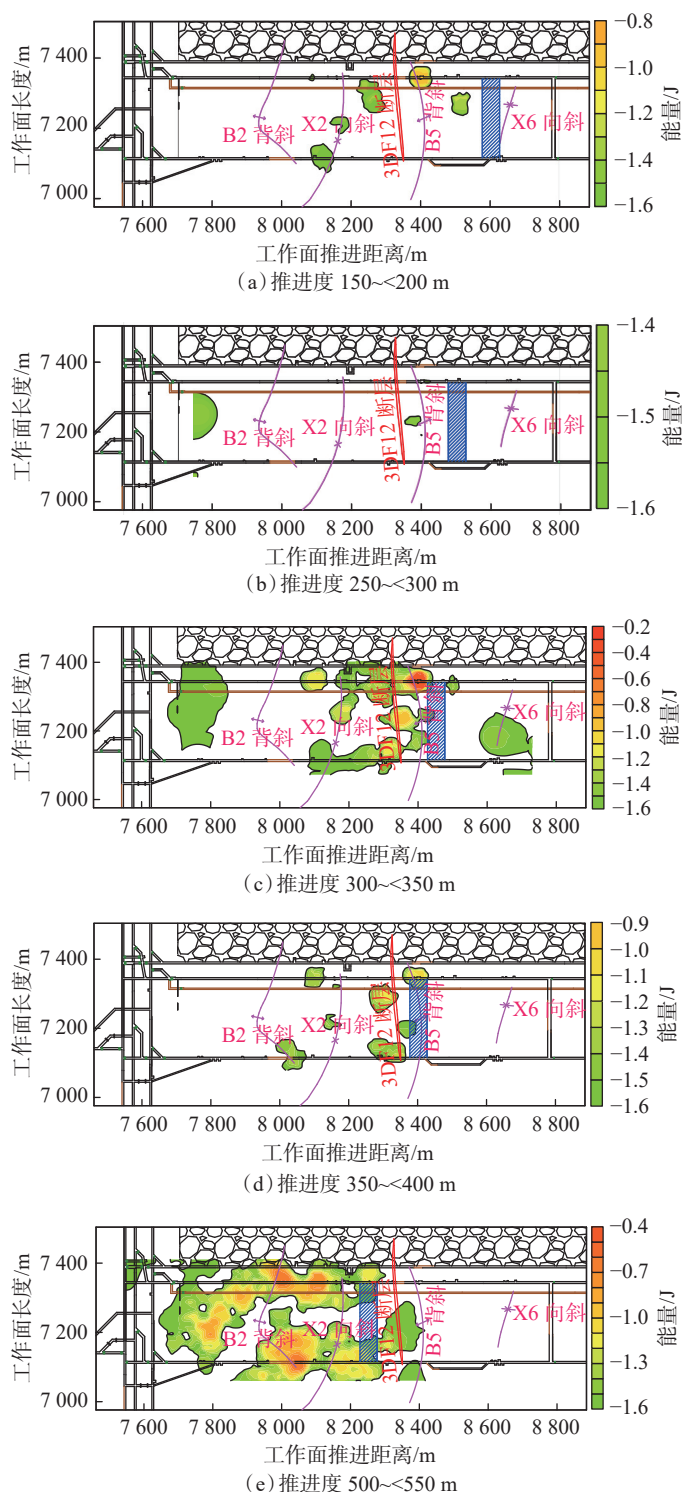


图7 1309工作面回采过褶曲和断层期间冲击变形能空间分布云图

Fig. 7 Spatial distribution of bursting strain energy when 1309 working face passing through the fault and fold

区域位于X2向斜前50 m, B2背斜前200 m。工作面当前推进区域与X2向斜前后50 m、B2背斜轴部、翼部区域均出现了大面积应力集中区,工作面整体高应力区面积相比上一阶段急剧增加。

4 结论

1)提出了一种将矿震时空演化中长期动态预警与冲击变形能短临时空预警相结合的冲击地压监测

预警方法,可实现深部地质构造应力集中区冲击危险的有效监测预警。

2)微震时空分布规律表明,落差15 m左右的断层在褶曲构造的叠加影响下,影响范围可达到80 m,褶曲、断层影响范围内工作面可出现较为明显的应力异常区。

3)冲击变形能空间分布规律表明,X2向斜应力

集中区影响范围约为 50 m; 倾角较大的 B2 背斜应力集中区影响范围可达到 200 m; 背斜、向斜与超前支承压力、采空区侧向支承压力叠加后, 会造成工作面大面积来压, 出现大面积应力异常区。

参考文献(References):

- [1] 姜耀东, 赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状: 机制、预警与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2188-2204.
JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188-2204.
- [2] 李剑锋, 罗武贤, 李兵, 等. 千米埋深工作面煤层合并区应力演化与防冲技术[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(10): 44-49.
LI Jianfeng, LUO Wuxian, LI Bing, et al. Stress evolution and rock-burst control technology in coal seam composite zone of kilometer working face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10): 44-49.
- [3] 曹安业, 薛成春, 吴芸, 等. 煤矿褶皱构造区冲击地压机理研究及防治实践[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 82-87.
CAO Anye, XUE Chengchun, WU Yun, et al. Study on mechanism of rock burst in fold structure area of coal mine and its prevention practice[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 82-87.
- [4] 井广成, 曹安业, 窦林名, 等. 煤矿褶皱构造区冲击地压震源机制[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 203-211.
JING Guangcheng, CAO Anye, DOU Linming, et al. Focal mechanism of rockburst in folded region in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 203-211.
- [5] 赵耀东, 张宁博, 邓志刚, 等. 褶曲构造型矿区地应力场分布特征与冲击机制[J]. 煤矿安全, 2019, 50(5): 23-26, 30.
ZHAO Yaozhong, ZHANG Ningbo, DENG Zhigang, et al. Distribution characteristics and impact mechanism of in-situ stress field in fold tectonic mining area[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(5): 23-26, 30.
- [6] 贺虎, 窦林名, 巩思园, 等. 高构造应力区矿震规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(1): 7-13.
HE Hu, DOU Linming, GONG Siyuan, et al. Study of mining shock in high tectonic stress zones[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2011, 40(1): 7-13.
- [7] 姜耀东, 王涛, 赵毅鑫, 等. 采动影响下断层活化规律的数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(1): 1-5.
JIANG Yaodong, WANG Tao, ZHAO Yixin, et al. Numerical simulation of fault activation pattern induced by coal extraction[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 42(1): 1-5.
- [8] 李振雷, 窦林名, 蔡武, 等. 深部厚煤层断层煤柱型冲击地压机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 333-342.
LI Zhenlei, DOU Linming, CAI Wu, et al. Fault-pillar induced rock burst mechanism of thick coal seam in deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 333-342.
- [9] 朱广安, 窦林名, 王红胜, 等. 临断层孤岛面冲击危险与断层滑移数值反演: 以朝阳煤矿 3108 工作面为例[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 533-541.
ZHU Guangan, DOU Linming, WANG Hongsheng, et al. Back analysis of rock burst risk and fault slip due to mining in the island panel along fault: a case study of island panel 3108 in Chaoyang Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 533-541.
- [10] 陈绍杰, 夏治国, 郭惟嘉, 等. 断层影响下岩体采动灾变响应研究现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(1): 20-27.
CHEN Shaojie, XIA Zhiguo, GUO Weijia, et al. Research status and prospect of mining catastrophic response of rock mass under the influence of fault[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 20-27.
- [11] 武泉森, 蒋力帅, 孔朋, 等. 断层煤柱及倾角对采动应力及能量分布的影响特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 708-716.
WU Quansen, JIANG Lishuai, KONG Peng, et al. Effects characteristics of fault pillar and its dip angle on mining-induced stress and energy distribution[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 708-716.
- [12] 刘畅, 张宇, 宋洁, 等. 褶曲构造带临空巷道围岩应力演化及冲击地压防治技术[J]. 煤矿安全, 2023, 54(2): 100-106.
LIU Chang, ZHANG Yu, SONG Jie, et al. Stress evolution of surrounding rock and rock burst prevention technology of gob-side roadway in folded structural belt[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(2): 100-106.
- [13] 曲效成, 姜福兴, 于正兴, 等. 基于当量钻屑法的冲击地压监测预警技术研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2346-2351.
QU Xiaocheng, JIANG Fuxing, YU Zhengxing, et al. Rockburst monitoring and precaution technology based on equivalent drilling research and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2346-2351.
- [14] HE X Q, CHEN W X, NIE B S, et al. Electromagnetic emission theory and its application to dynamic phenomena in coal-rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(8): 1352-1358.
- [15] 潘一山, 唐治, 李忠华, 等. 不同加载速率下煤岩单轴压缩电荷感应规律研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 1043-1048.
PAN Yishan, TANG Zhi, LI Zhonghua, et al. Research on the charge inducing regularity of coal rock at different loading rate in uniaxial compression tests[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 56(3): 1043-1048.
- [16] 窦林名, 蔡武, 巩思园, 等. 冲击危险性动态预测的震动波CT技术研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 238-244.
DOU Linming, CAI Wu, GONG Siyuan, et al. Dynamic risk assessment of rock burst based on the technology of seismic computed tomography detection[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 238-244.
- [17] 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.
- [18] 窦林名, 姜耀东, 曹安业, 等. 煤矿冲击地压动静载的“应力场-震动波场”监测预警技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2017,

- 36(4): 803-811.
- DOU Linming, JIANG Yaodong, CAO Anye, et al. Monitoring and pre-warning of rockburst hazard with technology of stress field and wave field in underground coalmines[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 803-811.
- [19] 刘金海, 翟明华, 郭信山, 等. 震动场、应力场联合监测冲地压的理论与应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 353-363.
- LIU Jinhai, ZHAI Minghua, GUO Xinshan, et al. Theory of coal burst monitoring using technology of vibration field combined with stress field and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 353-363.
- [20] CAI W, DOU L M, GONG S Y, et al. Quantitative analysis of seismic velocity tomography in rock burst hazard assessment[J]. [Natural Hazards](#), 2015, 75(3): 2453-2465.