



大范围采动影响下特大断层构造区微震活动规律及调控方法

郭伟耀 张悦颖 谷雪斌 公绪飞 郭传清 郭文静 张骞 张磊

引用本文:

郭伟耀, 张悦颖, 谷雪斌, 等. 大范围采动影响下特大断层构造区微震活动规律及调控方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 260–272.

GUO Weiyao, ZHANG Yueying, GU Xuebin. Microseismic activity law and control methods in mega-fault structure area under the influence of extensive mining[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 260–272.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1477>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

井下断层活动的定量监测及其对冲击地压的影响研究

Research on quantitative monitoring of underground fault activity and its influence on rock burst

煤炭科学技术. 2024, 52(2): 10–22 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1140>

采动影响下突出煤层地质异常区域的微震特征规律研究

Study on microseismic characteristics of geologic anomaly region in coal and gas outburst seam induced by roadway excavation

煤炭科学技术. 2019(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ff0a21e0-2654-41d2-9b45-b8b6e0c9b7e0>

采动影响下断层活化失稳及能量释放规律研究

Study on law of fault activation, failure and energy release under influence of mining

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 75–83 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/def8c440-b2f2-42a1-8128-263b30c3ebb3>

微震定位精度影响下采场裂隙表征与冲击地压预警

Fractures characterization in mining field considering seismic location accuracy and its application on pre-warning coal burst hazards

煤炭科学技术. 2024, 52(2): 1–9 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1968>

防冲击煤柱宽度变化期间微震活动规律研究

Study on microseismic activity law during change of anti-rockburst coal pillar width

煤炭科学技术. 2020, 48(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2f0fba49-4246-4f5b-a180-bd56e06b4e39>

采动影响下断层稳定性的力学机理及其控制研究

Study on mechanics mechanism and control of fault stability under mining-induced influence

煤炭科学技术. 2019(9) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a7257cce-60a4-4329-a81f-040d9cd6d04c>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

采矿科学与工程



移动扫码阅读

郭伟耀, 张悦颖, 谷雪斌, 等. 大范围采动影响下特大断层构造区微震活动规律及调控方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(11): 260–272.

GUO Weiyao, ZHANG Yueying, GU Xuebin, *et al.* Microseismic activity law and control methods in mega-fault structure area under the influence of extensive mining[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 260–272.

大范围采动影响下特大断层构造区微震活动规律及
调控方法

郭伟耀^{1,2}, 张悦颖¹, 谷雪斌¹, 公绪飞¹, 郭传清³, 郭文静¹, 张 骞^{2,4}, 张 磊⁵

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 长崎大学 工学研究科, 日本 长崎 852–8521; 3. 兖矿能源集团股份有限公司 济宁二号煤矿, 山东 济宁 370800; 4. 石家庄铁道大学 大型结构健康诊断与控制研究所, 河北 石家庄 050043; 5. 山西大同大学 煤炭工程学院, 山西 大同 037003)

摘 要: 为大范围采动影响下特大断层构造区冲击地压防控提供参考, 以济宁二号煤矿落差达百米级八里铺断层构造区为工程背景, 研究了全矿井及八里铺断层上下盘采区的微震活动规律, 基于微震累积能量分析了八里铺断层活动性, 探讨了特大断层构造区微震活动调控方法, 同时进行了工程实践。研究表明: 大范围采动影响下, 济宁二号煤矿微震事件以均匀分布于工作面及巷道区域的低能量量级事件为主, 主要来源于顶板岩层运动; 沿八里铺断层面没有产生集中、连续、大范围分布的微震事件, 但微震事件随着工作面与断层距离减小而增加, 即开采对断层具有明显扰动效应, 但目前采动强度不足以造成八里铺断层活动; 断层构造区微震最高累积能量整体呈稳定趋势, 但集中位置随采掘状态改变而不断变化, 尤其受工作面回采速度及强度影响较为明显; 留设大宽度保护煤柱是调控特大断层构造区微震活动的有效方法, 同时辅以顶板预裂和煤体卸压, 能够实现特大断层构造区域煤层安全开采。基于不同类型断层在回采过程中的冲击地压防控思路, 针对八里铺断层构造区 103_F03 工作面进行了工程实践, 发现回采过程中工作面微震活动强度明显减弱, 单日微震总能量降低, 而单日微震频次增加, 即能量释放呈多次低能释放的特征。

关键词: 大范围采动; 特大断层; 微震; 冲击地压; 防控

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)11-0260-13

Microseismic activity law and control methods in mega-fault structure area under
the influence of extensive mining

GUO Weiyao^{1,2}, ZHANG Yueying¹, GU Xuebin¹, GONG Xufei¹, GUO Chuanqing³, GUO Wenjing¹,
ZHANG Qian^{2,4}, ZHANG Lei⁵

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Graduate School of Engineering, Nagasaki University, Nagasaki 852-8521, Japan; 3. Jining No. 2 Coal Mine, YanKuang Energy Group company limited, JiNing 370800, China; 4. Structural Health Monitoring and Control Institute, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 5. College of Coal Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China)

Abstract: To provide a reference for rock burst prevention and control in mega-fault structure area under the influence of extensive mining, the Balipu Fault (i.e. the drop reaches up to 100 meters) in Jining No. 2 Coal Mine has been selected as the engineering background

收稿日期: 2023-10-15

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 李雅楠

DOI: 10.12438/cst.2023-1477

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52274086); 国家自然科学基金青年基金资助项目(52304095); 山东省泰山学者工程项目经费资助项目(tstp20221126)

作者简介: 郭伟耀(1990—), 男, 山西朔州人, 教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: 363216782@qq.com

通讯作者: 谷雪斌(1995—), 男, 山东滨州人, 博士研究生。E-mail: gxb_wy2021@163.com

for the study. The microseismic behavior of the entire mine as well as the footwall and hanging wall of the Balipu Fault was studied, and the fault activity was analyzed based on the accumulated microseismic energy. Additionally, the control methods of microseismic activities in mega-fault structure area were explored, and then the engineering application was carried out. Results show that: Under the influence of extensive mining, low-energy-level microseismic events were uniformly distributed in the mining face and roadway areas in the Jining No. 2 Coal Mine, which principally come from regular roof strata movement. There were no concentrated, continuous, and widely distributed microseismic events observed along the Balipu Fault plane. The microseismic events increased with the decrease of distance between the mining face and fault plane. It means that the mining can disturb the fault plane, but the current mining intensity was not enough to induce the fault activation. The highest cumulative energy of microseismic in the fault structure area exhibited an overall stable trend, but the concentrating position continuously varied as changing the mining conditions, particularly influenced by the mining speed and intensity. The effective solution is to leave a wide protective coal pillar for mitigating microseismic activity and achieving safe mining in mega-fault structure area, accompanied with reasonable roof pre-fracturing and coal pressure relief. Engineering practice was carried out in the 103_{lower}03 mining face of the Balipu Fault area based on the rock burst control strategy of different fault types. It was observed that the intensity of microseismic activity was noticeably weakened during the mining process. The total microseismic energy of one day decreased, while the microseismic frequency increased, indicating that a high frequency-low intensity of energy release.

Key words: extensive mining; mega-fault; microseismic; rock burst; prevention and control

0 引 言

冲击地压指井巷或工作面周围煤(岩)体, 由于弹性变性能的瞬时释放而产生的突然、剧烈破坏的动力现象, 常伴有煤岩体抛出、巨响及气浪等现象。随着煤矿开采深度增加、开采强度增大, 冲击地压已成为我国最为严重的煤矿动力灾害之一。大量工程实践与研究表明, 埋深、断层、褶曲、相变、煤岩赋存特征、煤岩冲击倾向性等地质因素对冲击地压发生具有重要影响作用^[1-3]。其中, 断层是煤矿最常见的地质构造, 而断层诱发型冲击地压具有发生频率高、释放能量高、冲击破坏强等特点^[4-5]。因此, 开展断层滑移型冲击地压研究具有重要的工程指导意义。

在断层滑移诱冲机制方面, 国内外学者采用理论分析、室内试验、数值模拟、工程实测等方法开展了大量研究。在理论研究方面, 学者们建立了断层黏滑失稳、折迭突变、黏滑-黏弹脆性体突变、多滑块-弹簧等断层失稳模型^[6-9], 提出了地应力判别准则和动静载叠加理论等一系列断层冲击地压诱冲机理^[10-12]; 为验证和优化理论模型, 学者们针对断层摩擦滑动特性开展了大量室内试验, 从能量场、应力场、断层倾角、内摩擦角、声发射参数等角度对断层结构面的物理力学特征和剪切滑移规律进行深入研究^[13-17]; 为进一步真实完全地反映天然粗糙结构面和工程的复杂性和多变性, 为此学者们基于数值模拟方法分析了应力变化、温度、开采方式、推进方向、开采深度、工作面距断层距离和断层特征参数对断层滑移失稳的影响^[18-25], 结合工程现场实测从矿震破裂机制、微震活动、地质构造、应力分布特征等角度进一步揭示了断层滑动发生机制^[26-29]。在断层诱

冲机制研究基础上, 学者们从室内试验和现场工程尺度上对断层活动特征及规律进行了大量探索, 获得了断层覆岩运动特征、开采扰动下断层裂隙带应力变化、断层活化能量释放、断层附近采场矿山应力时空分布等方面的规律^[30-35]。

综上所述, 针对断层活动规律与冲击地压的关系, 已从断层滑移特征、断层诱冲机理、断层活动规律等方面开展了广泛的研究。但目前断层活动规律的研究范围多局限于某个工作面, 而针对贯穿整个矿井的特大断层构造区微震活动规律研究较少, 且此类断层往往影响采区尺度的地层变化, 尤其在矿井开采中后期出现大范围采空区后, 加剧了此类断层活化的可能性。因此, 笔者以济宁二号煤矿落差达百米级八里铺断层构造区为工程背景, 分析了矿井八里铺断层上下盘采区微震活动规律, 基于微震累积能量分析了八里铺断层活动性, 探讨了特大断层构造区微震活动调控方法, 以期为大范围采动影响下特大断层构造区冲击地压防控提供工程参考。

1 工程背景

济宁二号煤矿位于山东省济宁市, 矿井面积约 87 km², 主要开采 3_上、3_下煤层, 煤层埋深为 494 ~ 900 m, 煤层倾角为 2° ~ 10°。图 1 为济宁二号煤矿矿井位置及主要构造示意, 该矿井当前最大开采深度已达 798 m, 断层分布密集, 地质条件复杂。截至 2019 年 6 月, 经勘探以及井巷工程揭露, 井田存在落差小于 5 m 的断点 2 548 个, 发现落差 5 m 及以上断层 193 条, 以高角度的正断层为主。其中, 八里铺断层及其支断层属于正断层, 位于井田中部偏东, 井田内延展长度约 9 600 m, 纵贯井田南北; 断层总体走向 165° ~

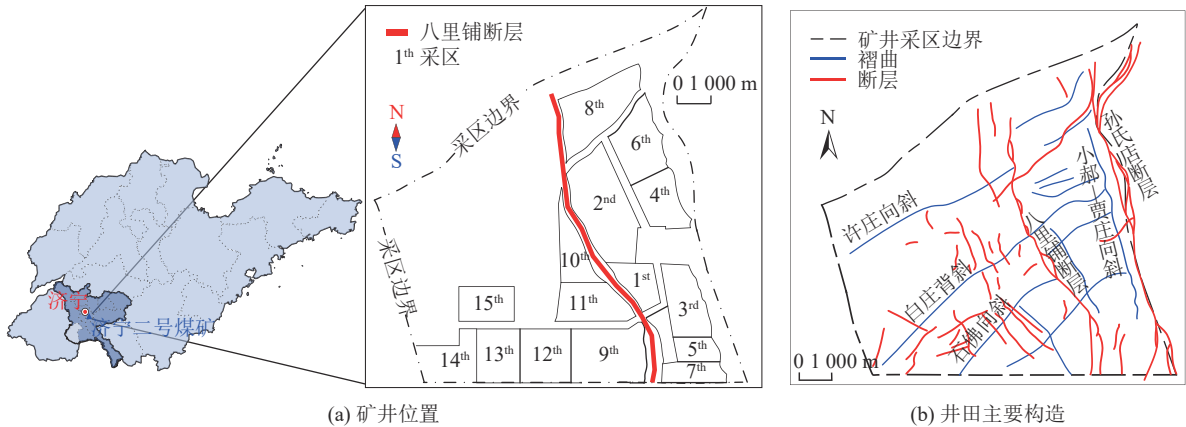


图 1 矿井位置及主要构造

Fig.1 Schematic diagram of the mine location and main geological formations

150°, 在南北两端折成南北向, 倾向 W, 倾角 70°; 断层落差 50 ~ 270 m, 多在 150 ~ 200 m。

矿井共设计布置 15 个采区, 矿井当前采掘活动主要集中在二、三、九、十、十二采区。为保持八里铺断层稳定性, 所有采区均在临近八里铺断层区域留设不同宽度的保护煤柱。其中, 临近八里铺断层的一、二、九、十一采区经过长期开采, 已形成较大范围采空区。十采区 103_F01 工作面 and 103_F03 工作面已回采完毕, 八里铺断层上盘采空区进一步增大。

矿井装备了 27 通道的 SOS 微震监测系统, 可对全矿范围内的微震活动事件进行监测。微震系统采用分区域监测的方式, 传感器布设位置将随矿井需要和工作面推进发生改变; 其中, 1 个通道布置在地面工业广场(22 号), 其余通道布置在井下, 每个生产工作面附近布设至少 4 个拾震传感器, 主要布设在工作面顺槽和周边巷道中。目前, 矿井的采掘活动范围主要集中在九、十采区, 现阶段矿井采掘情况及微震系统布置如图 2 所示。

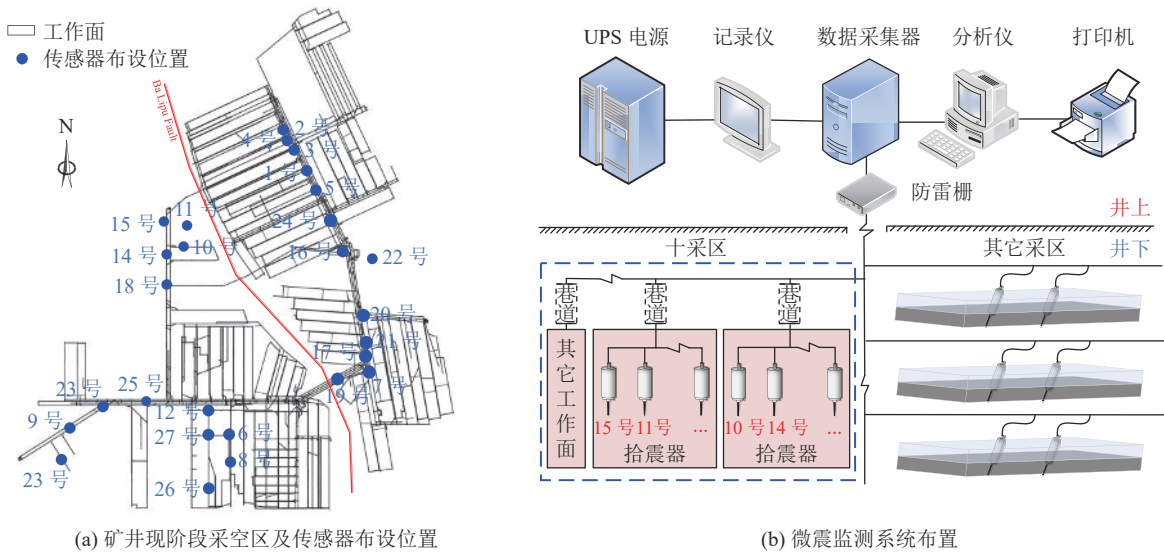


图 2 现阶段矿井采掘情况及微震系统布置

Fig.2 Mine excavation state and microseismic system layout at the present stage

2 全矿井及八里铺断层微震活动规律

2.1 全矿井微震活动规律

图 3 给出了 2012 年 6 月—2023 年 8 月矿井微震系统布置方案及全矿微震事件分布情况。2012 年后全矿范围内已监测到的微震事件分布位置主要位于二、三、九、十、十一采区, 与全矿范围内的开采活

动基本一致, 即工作面回采和巷道掘进区域产生了较多的微震活动事件。小范围微震事件发生位置在一定程度上与向斜、背斜、小断层等地质构造有一定关联性, 但在八里铺大断层附近并未显现聚集现象。通过进一步分析八里铺断层附近的微震事件发现, 临近断层有 2 个区域产生较多的微震事件。第 1 个

区域为八里铺断层与二采区及九采区毗邻区域的工作面附近,事件发生原因为工作面回采诱发的煤岩体破裂事件;第2个区域为十采区和十一采区东北

侧八里铺断层毗邻区域,这与采掘过程中高强度采掘施工作业有关。上述分析表明,矿井采掘期间八里铺断层构造区尚未监测到连续性的断层滑移活动。

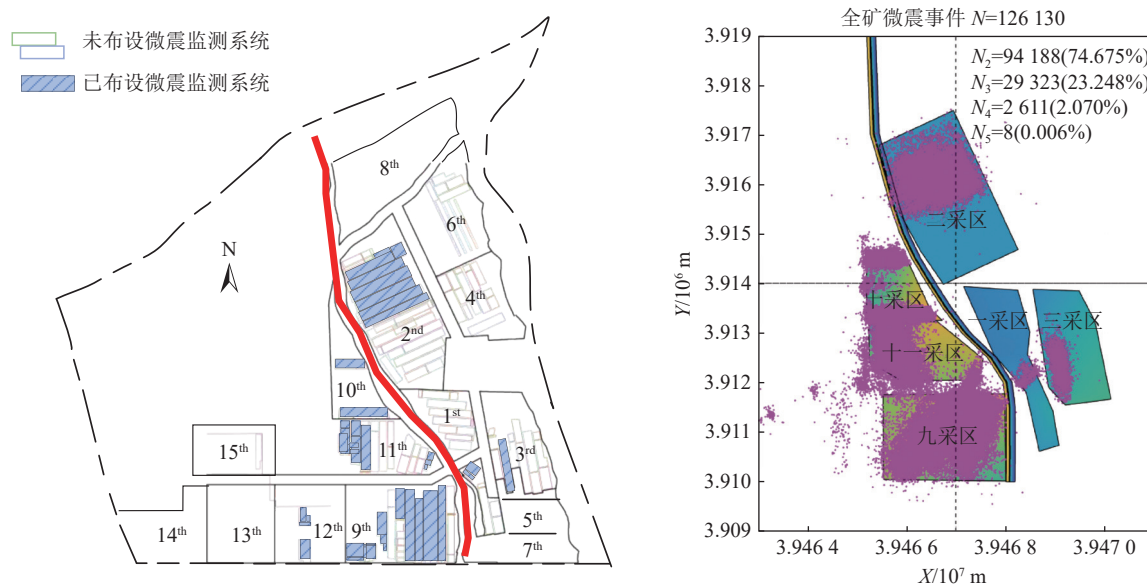


图3 矿井微震系统布置方案及全矿微震事件分布情况

Fig.3 Layout scheme of microseismic system and distribution of microseismic events in the mine

图4给出了全矿各能量量级微震事件数量统计情况。结合矿井实践经验,当微震能量在 10^3 J能量量级以下时,几乎不对矿井安全生产造成影响;可将该能量量级的事件描述为低能量量级微震事件。如图4所示,能量量级为 10^2 J、 10^3 J的事件数比例分别为74.68%、23.25%,而能量量级为 10^4 J和 10^5 J数量级事件分别占比2.07%和0.006%,初步表明全矿微震事件为低能量量级微震事件,全矿岩层破断情况整体上稳定。为进一步分析全矿井微震事件分布特征,图5给出了全矿井各能量量级微震事件平面分布图。由图5a可知,能量量级为 10^2 J量级事件分布较为广泛,主要位于二、九、十一采区,其分布范围与开采区域高度吻合;由图5b—图5c可知,量级为 10^3 J、 10^4 J的微震事件较 10^2 J量级事件分布稀疏,同时发现断层上盘的九、十、十一采区微震事件密度明显高于断层下盘的二采区,即断层上盘较下盘有更明显的活动性,这可能与煤层埋深大、地应力增大等因素有关;由图5d可知,能量量级为 10^5 J微震事件仅有8个,分布较为零散、无明显规律且远离八里铺断层,表明该量级事件可能与顶板岩层破断有关,而非八里铺断层产生活动。

综上所述,在大范围采掘活动影响下,现阶段工作面布置及保护煤柱留设使得各能量量级微震事件

未在八里铺断层大范围集中、连续分布,微震活动主要集中在采掘工作面及巷道区域,均为顶板岩层正常破断引起。

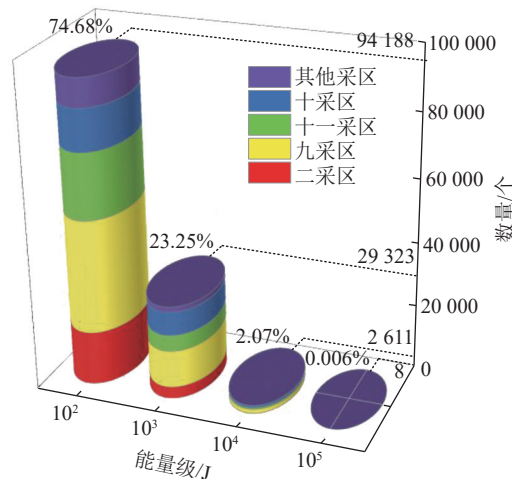


图4 各能量量级微震事件数据统计情况

Fig.4 The statistical analysis of microseismic events data by energy levels

2.2 八里铺断层两侧微震活动规律

通过将八里铺断层面面向东西两侧平移一定距离的方式,统计分析距断层面不同范围内沿断层走向的微震事件分布特征,进而获得大范围采动影响下八里铺断层区域微震活动规律,具体分析方法如

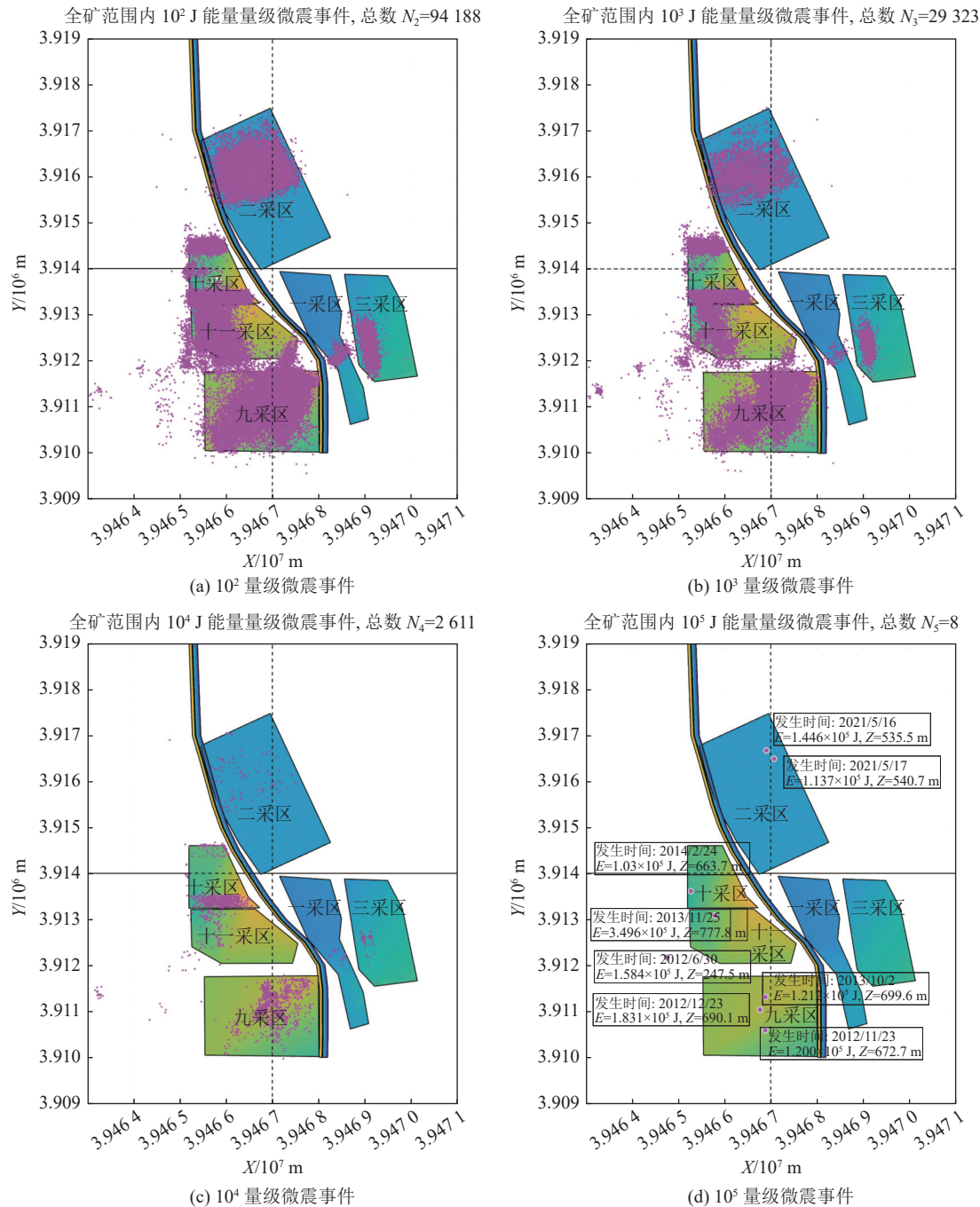


图 5 全矿井各能量量级微震事件平面分布
Fig.5 The plane distribution map of microseismic events at different energy levels in the mine

图 6 所示。由于八里铺断层附近工作面保护煤柱宽度一般在 100 m 左右,因此,选取距八里铺断层面 20、50、100 m 范围内的微震事件分布情况进行了统计,结果如图 7 所示。由图 7a 可知,距八里铺断层面 20 m 范围内,共统计到微震事件 61 个,集中在二采区影响区域,以低能量量级事件为主;由图 7b 可知,距八里铺断层面 50 m 范围内,分别新增能量量级为 10^2 、 10^3 、 10^4 J 数量级事件 50、50、5 个,且新增微震事件仍主要集中在二采区附近,同时在九、十、

十一采区也开始有少量微震事件出现,但未呈现明显连续性;由图 7c 可知,距八里铺断层面 100 m 范围内,总微震事件数增至 347 个,仍主要集中在二采区与八里铺断层临近区域。从中可知,随着与断层面的距离增加,断层两层各能量量级微震事件均呈现增多趋势,但始终未产生大能量事件,且能量量级为 10^2 、 10^3 J 的微震事件增速更快,表明采掘活动未造成八里铺断层产生错动。

结合图 5 中全矿井各能量量级微震事件分布,

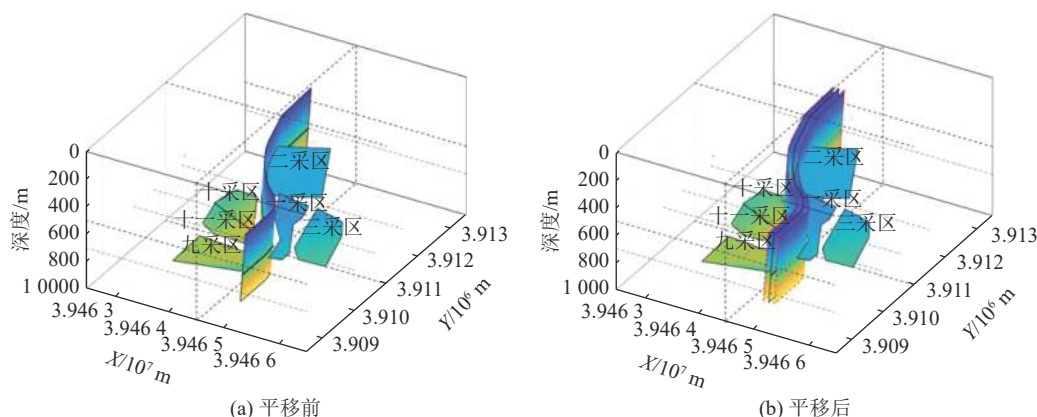


图 6 定距尺度下断层平移分析方法

Fig.6 Method of fault translation analysis at fixed distance scale

可以进一步发现能量量级为 10^2 、 10^3 J 的微震事件主要位于八里铺断层下盘的二采区西侧,在断层上盘的九、十一采区零散分布,且在断层两侧仅存在少量能量量级达 10^4 J 数量级微震事件。该现象表明,在八里铺断层附近区域,虽然九、十、十一采区开采深度大于二采区,但由于其位于断层上盘,顶板岩层活动区域距断层面较远,因此不易产生大能量微震事件,微震活动仅与采掘活动有关。

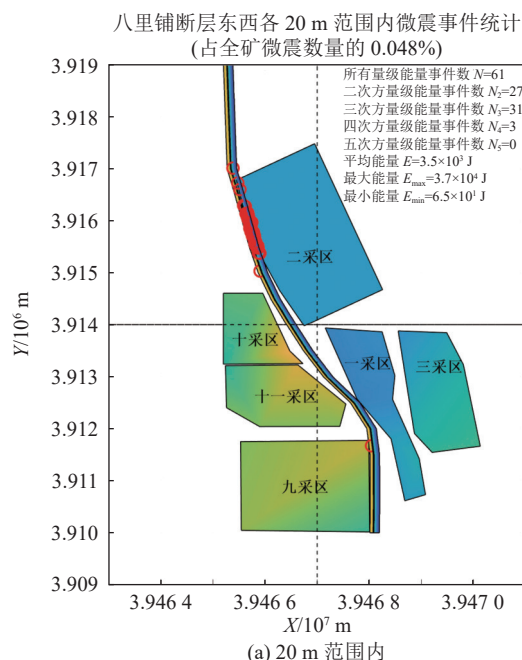
2.3 微震活动性与采动相关性

图 8 给出了八里铺断层东西两侧不同距离范围内微震事件分布统计。由图 8a 可知,八里铺断层百米范围内微震事件数量随距断层面距离增大呈倍数量增长趋势,但微震活动主要来自工作面采动最多的二采区,而在九、十、十一采区微震事件较少,即微震活动受采掘活动影响明显,且 3 个采区的微震事件

产生位置均位于距离断层 50 m 以外区域;由图 8b 可知,随着距断层面距离的增加,八里铺断层附近区域微震事件最高能量呈现增大趋势,但均未超过 10^5 J 数量级。且新增的微震事件以 10^2 J 能量量级为主,微震事件平均能量始终未超过 4×10^3 J,造成微震平均能量随着开采范围扩大呈先增大后减小趋势。根据现阶段对八里铺断层面在不同范围内微震累积能量统计分析发现,现阶段微震活动在空间分布上呈分散特点,八里铺断层附近区域微震活动是由正常采掘活动造成的煤岩体破裂。

3 基于微震累积能量的断层活动性评价

现场定位计算的微震事件为空间点数据,这使得煤岩体破裂呈现出能量大小与破裂尺度无关,这不能反映能量量级与破裂空间的分布关系。为了更



(a) 20 m 范围内

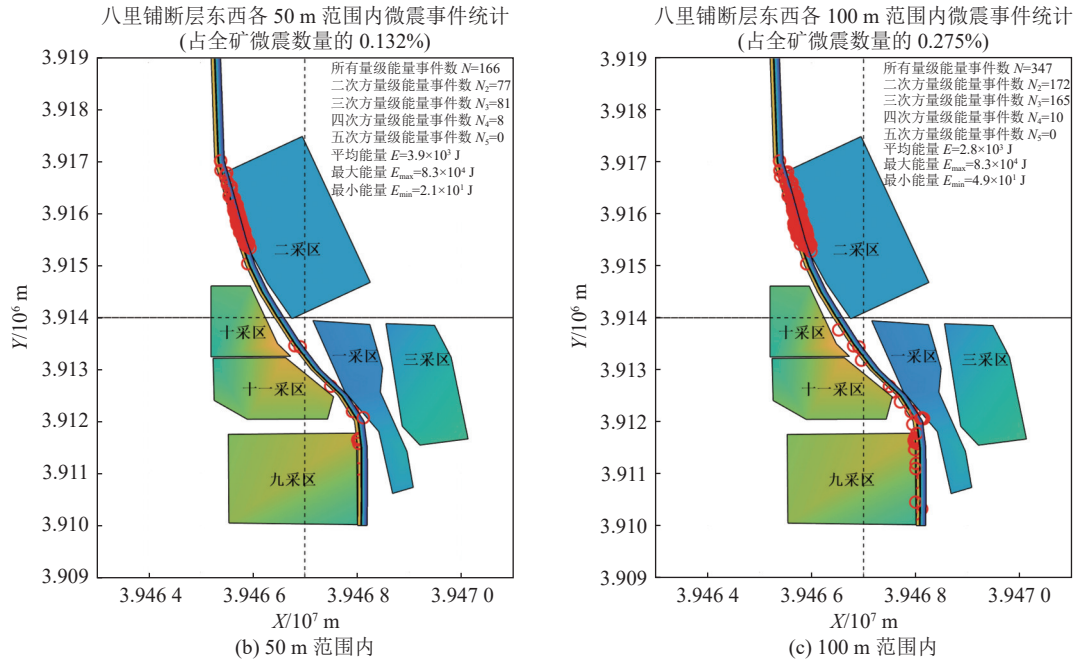


图7 八里铺断层东西 20~100 m 范围内微震事件平面分布

Fig.7 Plane distribution map of microseismic events at range of 20~100 m on east and west sides of Balipu Fault

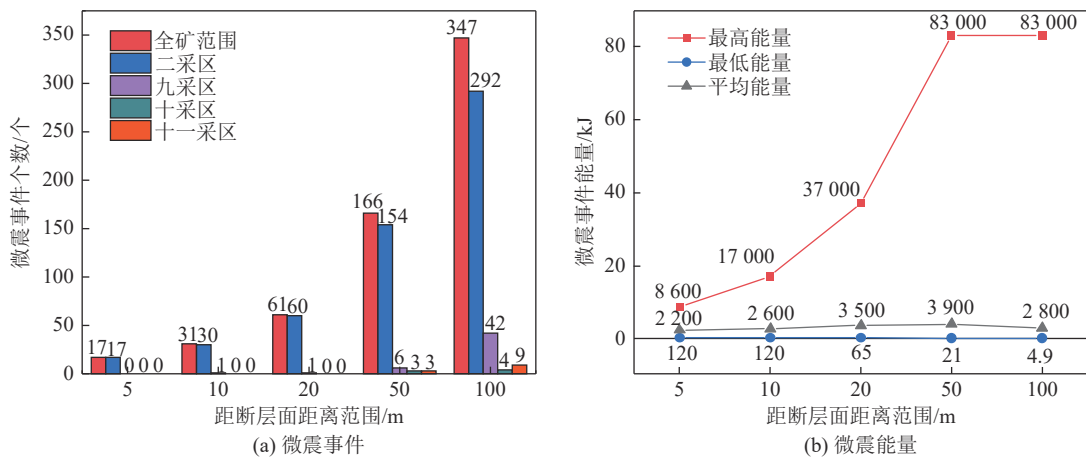


图8 八里铺断层东西两侧不同距离范围内微震事件分布统计

Fig.8 Statistical distribution chart of microseismic events at different distances on east and west sides of Balipu Fault

合理地使用微震监测数据表征地层活动性,定义地层微震活动强度指数,基于地层释放能量的空间分布,衡量不同位置的地层活动性。综合考虑微震能量的空间位置和破裂尺度等因素,定义如下的地层微震活动强度指数计算公式:

$$E(x, y, z) = \sum_{i=0}^N E_i e^{-\alpha^2 [(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2]}$$

式中: (x, y, z) 为被插值的周边空间的位置, (x_i, y_i, z_i) 为第 i 个微震事件的位置; E_i 为第 i 个微震事件的能量; N 为微震事件的总个数; α 为不同距离上的微震事件对于当前空间位置的贡献程度,通常取 0.1~0.5。

基于该评价方法,对八里铺断层构造区微震活

动的空间连续性进行评价。首先,根据地层微震活动强度指数计算公式,将点分布的微震能量插值为空间分布的微震能量;然后,将不同时间发生在同一空间位置的微震活动能量进行叠加得到微震累积能量分布云图,进而评价微震活动频繁发生的区域,直观地解释断层滑移程度。2012年6月—2023年8月八里铺断层临近区域采区的工作面布置及具体回采年度如图9所示。

沿八里铺断层区域各年度回采进程及微震累积能量分布如图10所示。由图10a可知,2012年八里铺断层面附近的微震累积能量集中于九采区及十一采区南侧,最高累积能量量级为 10^3 J;由图10b可知,2014年微震累积能量集中在九采区临近断层处和二

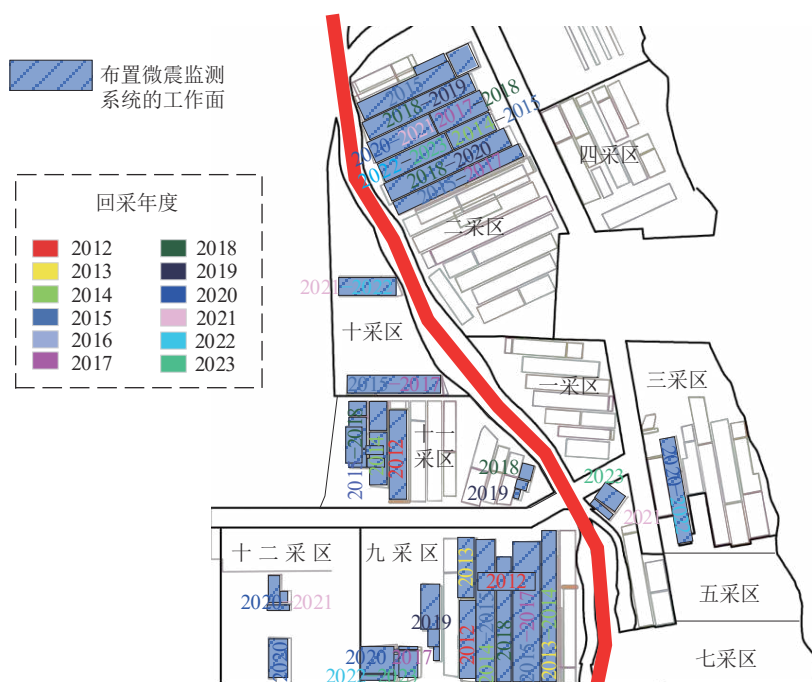


图9 各工作面的回采年度

Fig.9 Stopping year of each mining face

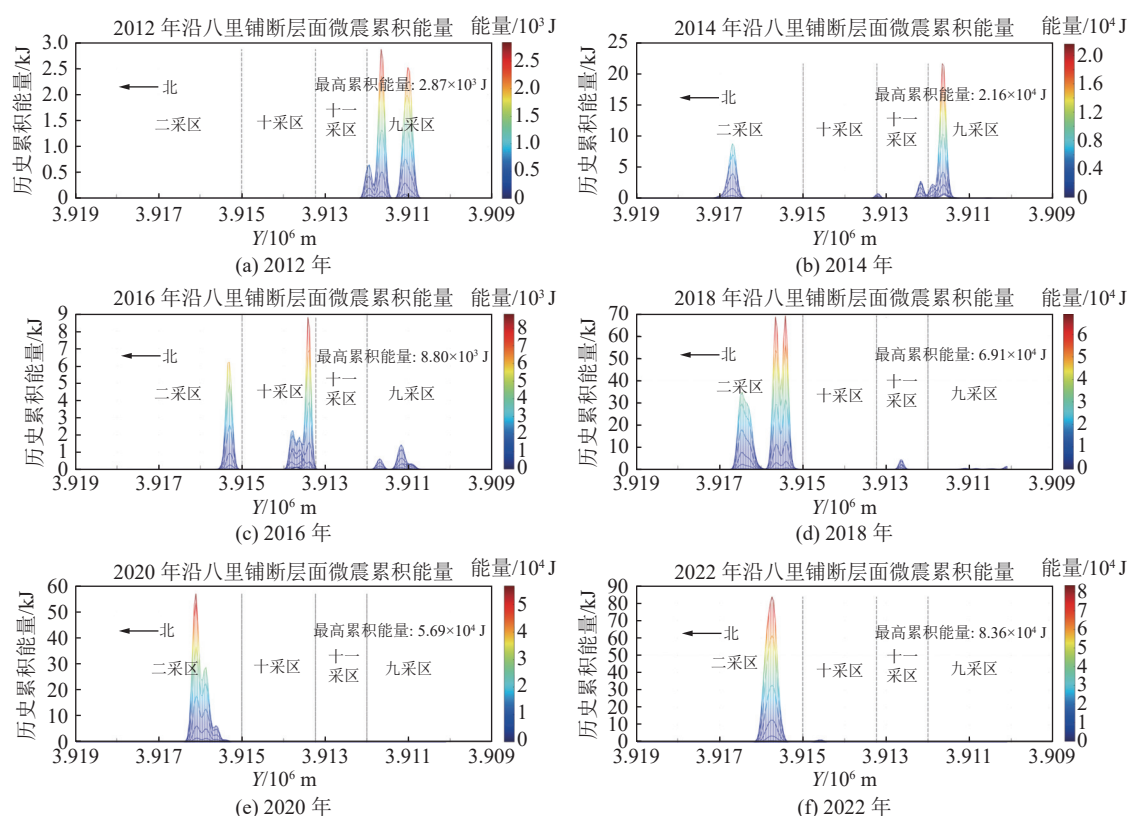


图10 沿八里铺断层区域各年度回采进程及微震累积能量分布

Fig.10 The annual mining progress and cumulative energy distribution of microseismic events in the vicinity of Balipu Fault

采区北部,九、二、十一采区的微震累积能量递减,最高微震累积能量量级达 10^4 J,与2012年相比增加一个数量级;由图10c可知,2016年微震累积能量集中

在十采区和二采区南部,九采区中、北部略有分布,最高累积能量数量级接近 10^4 J;由图10d可知,2018年微震累积能量主要分布于回采工作较多且距

离断层较近二采区中、南部,最高为 10^4 J能量量级,少量分布于十一采区中部和九采区;由图10e可知,2020年微震累积能量几乎仅分布于二采区中部,最高累积能量同样为 10^4 J数量级,但发生位置与2018年相比向北部偏移;由图10f可知,2022年微震累积能量主要集中于二采区,十采区虽也有少许分布,但最高累积能量 10^4 J数量级仍存在于二采区,仅分布位置与2020年相比向南侧移动。

结合上述分析可知,八里铺断层面附近微震活动随采掘活动区域改变而不断演化,且距离断层越近微震累积能量量级越高;八里铺断层面虽有微震事件发生,但微震累积强度分布未发生明显变化,即在煤层回采期间八里铺断层区域整体呈稳定趋势,仅在采掘活动期间有零散分布的少量低能量微震事件,且发生位置主要在高强度回采工作面,表明煤层开采导致的断层活动性具有可控性。

4 特大断层构造区微震活动调控方法探讨及工程实践

4.1 调控方法

在采矿活动中,大尺度断层区域通常伴生高构造应力,对采掘活动构成影响;一旦发生活化,将会释放大量弹性能,极易诱发冲击地压等动力灾害。因此,需要综合考虑工程地质特征、采掘条件等因素,制定合理的断层构造区开采微震活动调控与冲击地压防控方法。图11给出了基于断层类型的冲击地压防控思路。针对小型断层,其导致的应力异常与滑移可释放的能量较小,可不额外采取措施或仅利用锚杆、岩锚网、钢筋混凝土喷射等措施对巷道围岩进行支护^[36-37];针对中型断层,除采用锚杆等对巷道围岩进行加固支护之外,还可采用注浆等方式对断层面进行加固,降低采掘活动对断层的影响^[38-39];针对大型断层,一般已在矿井设计中将其作为采区或井田边界,在断层两侧留设一定宽度的保护煤柱以

保持断层稳定性,同时辅以其他卸压手段对断层附近受高应力影响的煤岩体进行应力转移和释放,防范高扰动能量聚集^[40-41]。

笔者研究的八里铺断层最大落差可达270 m,属特大型断层,其周边布设矿井存在大面积采空区,在该条件下断层面与采空区极可能存在能量积聚,如若产生滑移活化必然释放大量弹性能,极易诱发冲击地压、矿震等强动力灾害。其中,十采区位于济宁二号井田中部,是下一步矿井的主要生产采区之一;该采区位于八里铺断层上盘,且对应的下盘二采区已大面积采空。除上述条件外,十采区煤层埋深超过700 m,煤层上方100 m存在多组厚硬砂岩,且采区内存在一定数量断层,故十采区冲击地压地质影响因素可总结为埋藏深度、坚硬顶板和断层。因此,为保证特大断层构造影响区的煤层安全开采,以留设断层保护煤柱为前提,辅以顶板预裂和煤体卸压等技术措施,进而实现特大断层构造影响区的安全调控。

4.2 工程实践

4.2.1 工程概况

图12为十采区位置及其工作面布置。目前,十采区布置103_F01和103_F03工作面,工作面沿东西方向布置,开切眼端与八里铺断层相邻。其中,103_F01工作面位于十采区南部,距八里铺断层约180 m,为十采区首采工作面,面宽235 m,推采长度约为1100 m,煤层厚度8.41 m,倾角3°~17°,采用综采放顶煤开采方式,已于2017年9月回采完毕。103_F03工作面位于十采区中北部,南北西侧均存在大面积的实体煤,与103_F01工作面间隔875 m,该工作面面宽230 m,推采长度约680 m,煤层厚度9.3 m,倾角2°~8°,采用综采放顶煤开采方式,并于2022年7月完成回采。103_F01工作面和103_F03工作面开采条件较为接近,但在八里铺断层下盘大面积采空的条件下,两侧岩层应力分布不均,103_F03工作面回采

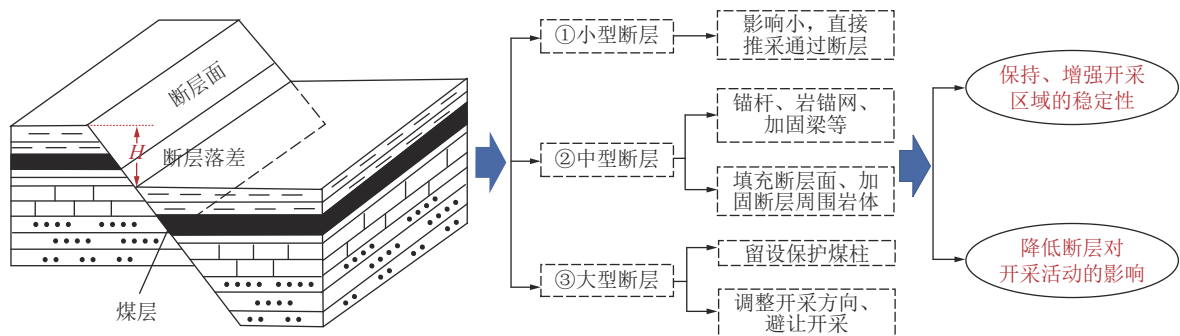


图11 基于断层类型的冲击地压防控思路

Fig.11 The strategy of rock burst prevention and control based on the fault type



图 12 十采区位置及工作面布置

Fig.12 The schematic diagram of No. 10 mining area location and layout of mining faces

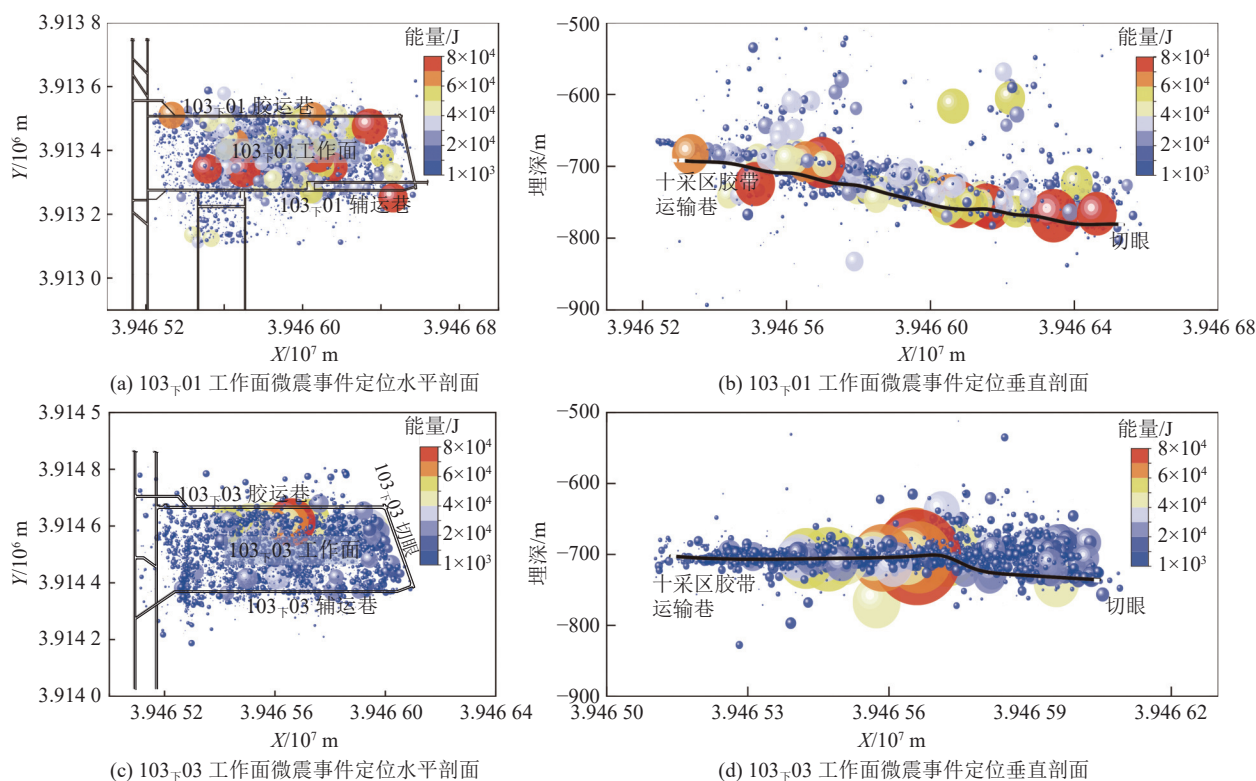
可能加剧八里铺断层活化风险。

因此考虑工作面受断层和厚层坚硬顶板影响,在 103_下03 工作面回采过程中实施了顶板预裂和煤体卸压。为防止构造应力突然释放产生冲击地压灾害,工作面回采前采取顶板预裂措施提前释放部分构造应力,回采中为确保顶板的下沉,避免断层构造应力转移继续实施顶板预裂;此外,顶板预裂也可降低动荷载对工作面及断层扰动。同时对煤层进行大直径钻孔卸压防止煤岩体应力集中,留设了宽度达

115 m 的保护煤柱综合降低冲击危险性,以实现工作面安全回采。

4.2.2 实践效果

图 13 给出了 103_下01 和 103_下03 工作面微震事件演化。在留设大宽度保护煤柱措施下,工作面回采及断层构造区域附近均未产生大能量微震事件,实现了微震活动有效调控及工作面安全开采。通过对比 2 个工作面的微震事件位置可知:相比于 103_下01 工作面,103_下03 工作面进行顶板预裂后,顶

图 13 103_下01 工作面和 103_下03 工作面微震演化Fig.13 Microseismic evolution of No.103_{lower}01 and No.103_{lower}03 mining faces

板中的高能量震动事件明显减少,且高能量事件的发生层位明显降低,表明顶板预裂可有效减弱煤层高位顶板的破坏强度,使得能量释放可控程度增强,降低工作面回采诱发顶板动荷载对断层稳定性的影响。

为量化说明工作面回采期间的微震活动规律,选取2个工作面回采期间的微震活动规律进行分析,综合调控前后工作面微震变化统计如图14所示。由图14a—图14b可知,103_F01工作面单日微震频次在0~60范围内,平均单日微震频次为17.44,工作面单日频次大于20次的比例为33.15%;103_F03工作面单日微震频次在0~67范围内,平均单日微震

震频次为23.42,工作面单日频次大于20次占比57.22%,即顶板预裂后的工作面平均单日微震次数增加,高频次天数增多。由图14c可知,103_F01工作面单日微震累计能量主要集中在 $0 \sim 2.5 \times 10^5$ J,平均单日微震能量为2355.47 J;由图14d可知,103_F03工作面微震累计能量主要以低能量量级为主,主要集中在 $0 \sim 1.5 \times 10^5$ J范围内,平均单日微震能量为2211.80 J。相比未进行顶板预裂的103_F01工作面,103_F03工作面进行顶板预裂后,工作面单日微震频次明显增加,但单日微震能量有降低趋势,表明顶板预裂后能量呈现多次低能释放的特征,对于降低顶板动荷载、保证断层稳定性具有重要工程意义。

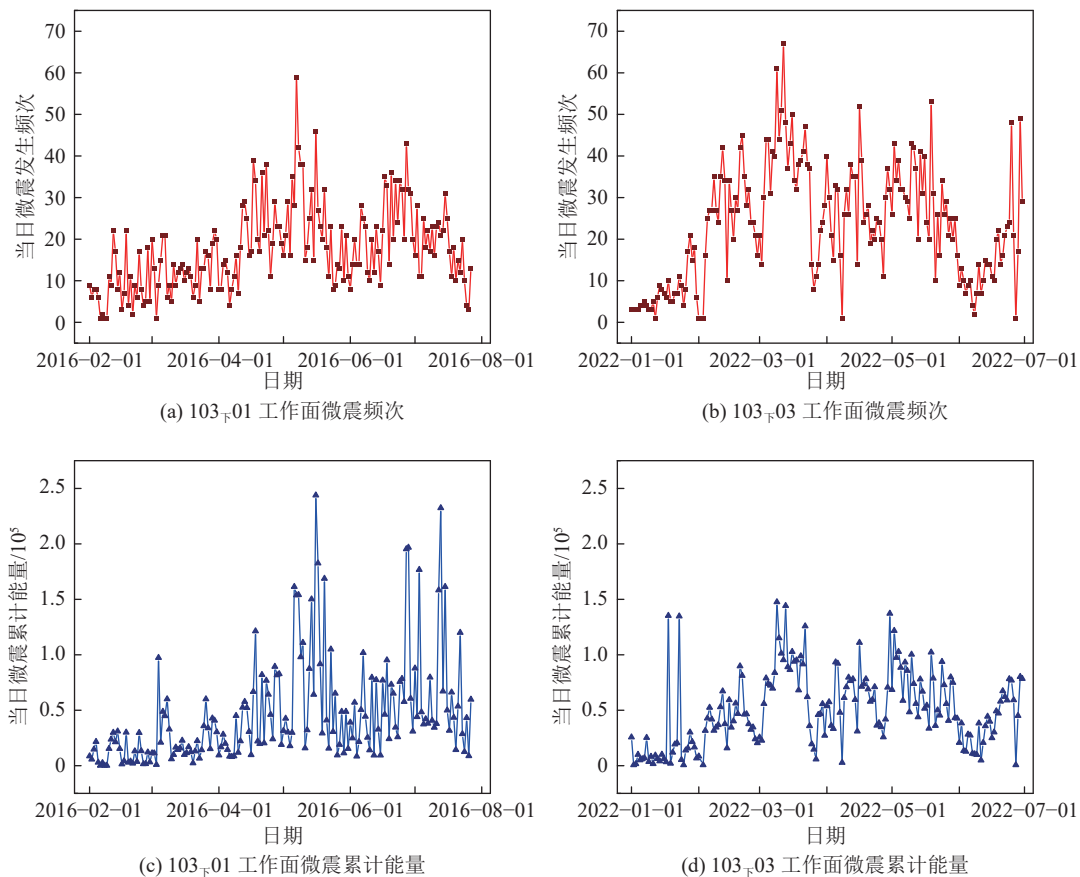


图14 综合调控前后工作面微震变化统计

Fig.14 Microseismic statistical variation of the mining faces before and after comprehensive control

5 结 论

1)在大范围采动影响下,济宁二号煤矿微震事件以均匀分布于工作面及巷道区域的低能量量级事件为主,即矿井微震事件均为煤层回采所导致的正常顶板岩层运动。

2)沿八里铺断层面没有产生集中、连续、大范围分布的微震事件,而微震事件数量随工作面与断层距离的减小而增加,即开采对断层具有明显扰动效

应,但目前采动强度不足以造成八里铺断层活动。

3)断层构造区微震最高累积能量整体呈稳定趋势,但集中位置随采掘状态改变而不断变化,尤其是受工作面回采速度及强度影响明显。

4)留设大宽度保护煤柱是调控特大断层构造区微震活动的有效方法,同时辅以顶板预裂和煤体卸压,可以增加能量释放的可控性,能够实现特大断层构造区域煤层安全开采。

参考文献(References):

- [1] 窦林名,田鑫元,曹安业,等.我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J].煤炭学报,2022,47(1):152-171.
DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171.
- [2] 姜福兴,张翔,朱斯陶.煤矿冲击地压防治体系中的关键问题探讨[J].煤炭科学技术,2023,51(1):203-213.
JIANG Fuxing, ZHANG Xiang, ZHU Sitao. Discussion on key problems in prevention and control system of coal mine rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 203-213.
- [3] 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.
- [4] 潘俊锋,齐庆新,刘少虹,等.我国煤炭深部开采冲击地压特征、类型及分源防控技术[J].煤炭学报,2020,45(1):111-121.
PAN Junfeng, QI Qingxin, LIU Shaohong, et al. Characteristics, types and prevention and control technology of rock burst in deep coal mining in China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 111-121.
- [5] 谭云亮,郭伟耀,辛恒奇,等.煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究[J].煤炭学报,2019,44(1):160-172.
TAN Yunliang, GUO Weiyao, XIN Hengqi, et al. Key technology of rock burst monitoring and control in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 160-172.
- [6] 潘一山,王来贵,章梦涛,等.断层冲击地压发生的理论与试验研究[J].岩石力学与工程学报,1998,17(6):642-649.
PAN Yishan, WANG Laigui, ZHANG Mengtao, et al. The theoretical and testing study of fault rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 642-649.
- [7] 潘岳,刘英,顾善发.矿井断层冲击地压的折迭突变模型[J].岩石力学与工程学报,2001,20(1):43-48.
PAN Yue, LIU Ying, GU Shanfa. Fold catastrophe model of mining fault rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 43-48.
- [8] 李志华,窦林名,曹安业,等.采动影响下断层滑移诱发煤岩冲击机理[J].煤炭学报,2011,36(S1):68-73.
LI Zhihua, DOU Linming, CAO Anye, et al. Mechanism of fault slip induced rockburst during mining[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 68-73.
- [9] 张宁博,赵善坤,邓志刚,等.动静载作用下逆冲断层力学失稳机制研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(6):1186-1192.
ZHANG Ningbo, ZHAO Shankun, DENG Zhigang, et al. Mechanical instability mechanism of thrust fault under static and dynamic loading[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1186-1192.
- [10] 夏永学,王金华,毛德兵.断层活化的地应力判别准则及诱发冲击地压的典型微震特征[J].煤炭学报,2016,41(12):3008-3015.
XIA Yongxue, WANG Jinhua, MAO Debing. Analysis of fault activation induced rock burst risk based on *in situ* stress measurements[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 3008-3015.
- [11] BAI J Z, DOU L M, LI J Z, et al. Mechanism of coal burst triggered by mining-induced fault slip under high-stress conditions: a case study[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 884974.
- [12] CAI W, DOU L M, SI G Y, et al. Fault-induced coal burst mechanism under mining-induced static and dynamic stresses[J]. Engineering, 2021, 7(5): 687-700.
- [13] 王宏伟,田政,王晴,等.采动诱发断层覆岩耦合失稳的突变效应[J].煤炭学报,2023,48(8):2961-2975.
WANG Hongwei, TIAN Zheng, WANG Qing, et al. Investigation on the mutation effect induced by the coupled destabilization of fault and overburden rock strata during coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 2961-2975.
- [14] WANG H W, SHI R M, DENG D X, et al. Characteristic of stress evolution on fault surface and coal bursts mechanism during the extraction of longwall face in Yima mining area, China[J]. Journal of Structural Geology, 2020, 136: 104071.
- [15] 王晓卿,高富强,李建忠,等.开挖诱导锁固断层滑移的实现方式及影响因素[J].煤炭学报,2021,46(S2):692-700.
WANG Xiaoqing, GAO Fuqiang, LI Jianzhong, et al. Realization mode and influencing factors of excavation-induced locking fault slip[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 692-700.
- [16] 蔡武,窦林名,王桂峰,等.煤层采掘活动引起断层活化的力学机制及其诱冲机理[J].采矿与安全工程学报,2019,36(6):1193-1202.
CAI Wu, DOU Linming, WANG Guifeng, et al. Mechanism of fault reactivation and its induced coal burst caused by coal mining activities[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(6): 1193-1202.
- [17] 兰世瑞,宋大钊,李振雷,等.基于损伤因子的断层滑移过程声发射特征试验研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2021,3(3):82-90.
LAN Shirui, SONG Dazhao, LI Zhenlei, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of fault slip process based on damage factor[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(3): 82-90.
- [18] 于秋鸽,张华兴,白志辉,等.采动影响下断层面应力与滑移特征研究[J].煤炭科学技术,2019,47(4):63-68.
YU Qiuge, ZHANG Huaxing, BAI Zhihui, et al. Study on stress and slip characteristics of fault plane under mining influence[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 63-68.
- [19] 赵永,赵乾百,王述红,等.不同温度场下断层黏滑失稳过程模拟[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(10):1453-1460.
ZHAO Yong, ZHAO Qianbai, WANG Shuhong, et al. Simulation of fault stick-slip instability processes under different temperature fields[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, 43(10): 1453-1460.
- [20] 韩科明,于秋鸽,张华兴,等.上下盘开采影响下断层滑移失稳力学机制[J].煤炭学报,2020,45(4):1327-1335.
HAN Keming, YU Qiuge, ZHANG Huaxing, et al. Mechanism of fault activation when mining on hanging-wall and foot-wall[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1327-1335.
- [21] 卢志国,鞠文君,赵毅鑫,等.采动诱发应力主轴偏转对断层稳定性影响分析[J].岩土力学,2019,40(11):4459-4466.
LU Zhiguo, JU Wenjun, ZHAO Yixin, et al. Analysis of the min-

- ing induced stress rotation influence on fault stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(11): 4459–4466.
- [22] 朱广安, 蒋启鹏, 伍永平, 等. 应力波扰动作用下断层滑移失稳的数值反演[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(2): 370–379. ZHU Guang'an, JIANG Qipeng, WU Yongping, et al. Numerical inversion of dynamic behavior of fault slip instability induced by stress waves[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(2): 370–379.
- [23] 焦振华, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 工作面过断层动态力学响应特征研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(1): 54–63. JIAO Zhenhua, JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, et al. Study of dynamic mechanical response characteristics of working face passing through reverse fault[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(1): 54–63.
- [24] JIANG L S, KONG P, ZHANG P P, et al. Dynamic analysis of the rock burst potential of a longwall panel intersecting with a fault[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(4): 1737–1754.
- [25] SAINOKI A, MITRI H S. Dynamic behaviour of mining-induced fault slip[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 66: 19–29.
- [26] 曹安业, 陈凡, 刘耀琪, 等. 冲击地压频发区矿震破裂机制与震源参量响应规律[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 722–733. CAO Anye, CHEN Fan, LIU Yaoqi, et al. Response characteristics of rupture mechanism and source parameters of mining tremors in frequent coal burst area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 722–733.
- [27] 谷雪斌, 张呈国, 郭伟耀, 等. 冲击地压矿井典型微震信号特征及其辨识研究[J]. *煤炭学报*: 1–19[3-12-26]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1237>. GU Xuebin, ZHANG Chengguo, GUO Weiyao, et al. Characteristics and recognition of typical microseismic signals in rock burst mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 1–19[2023-12-26]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1237>.
- [28] 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): 69–81, 90. WANG Lianhe, CAO Anye, GUO Wenhao, et al. Rock burst mechanism and characteristics of roadway in “fault-fold” structure area[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(1): 69–81, 90.
- [29] 谭云亮, 谭涛, 张修峰, 等. 正断层两盘动力灾害显现差异性及其机制[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 214–223. TAN Yunliang, TAN Tao, ZHANG Xiufeng, et al. Difference and mechanism of dynamic behaviors between two walls of normal fault[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 214–223.
- [30] 吴振华, 潘鹏志, 潘俊峰, 等. 地堑构造区冲击地压发生机制及矿震活动规律[J]. *岩土力学*, 2021, 42(8): 2225–2238. WU Zhenhua, PAN Pengzhi, PAN Junfeng, et al. Analysis of mechanism of rock burst and law of mining induced events in graben structural area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(8): 2225–2238.
- [31] 左建平, 陈忠辉, 王怀文, 等. 深部煤矿采动诱发断层活动规律[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(3): 305–309. ZUO Jianping, CHEN Zhonghui, WANG Huaiwen, et al. Experimental investigation on fault activation pattern under deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(3): 305–309.
- [32] 赵毅鑫, 王浩, 卢志国, 等. 开采扰动下断层库仑应力及诱发矿震时空演化特征[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(2): 340–347. ZHAO Yixin, WANG Hao, LU Zhiguo, et al. Characteristics of tremor time-space evolution and Coulomb stress distribution along the fault during workface excavation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 340–347.
- [33] 孙文斌, 薛延东, 杨辉, 等. 工作面回采对断层裂隙带应力扰动规律及注浆加固机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(11): 2668–2681. SUN Wenbin, XUE Yandong, YANG Hui, et al. Study on the law of stress disturbance in fault fissure zones caused by mining face and the mechanism of grouting reinforcement[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(11): 2668–2681.
- [34] 王同旭, 曹明辉, 江东海. 采动影响下断层活化失稳及能量释放规律研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(7): 75–83. WANG Tongxu, CAO Minghui, JIANG Donghai. Study on law of fault activation, failure and energy release under influence of mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 75–83.
- [35] 勾攀峰, 胡有光. 断层附近回采巷道顶板岩层运动特征研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2006, 23(3): 285–288. GOU Panfeng, HU Youguang. Effect of faults on movement of roof rock strata in gateway[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2006, 23(3): 285–288.
- [36] WANG Q, GAO H K, YU H C, et al. Method for measuring rock mass characteristics and evaluating the grouting-reinforced effect based on digital drilling[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(3): 841–851.
- [37] YIN Q, JING H W, SU H J, et al. Experimental study on mechanical properties and anchorage performances of rock mass in the fault fracture zone[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(7): 04018067.
- [38] 童仁剑, 郑士田, 吴燕军, 等. 地面定向孔超前预注浆掩护巷道穿断层破碎带关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(6): 196–203. TONG Renjian, ZHENG Shitian, WU Yanjun, et al. Key technology of advance pre-grouting of ground directional holes to shield roadway passing fault and broken zone[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 196–203.
- [39] 谢小平, 吴刚, 尉瑞, 等. 断层附近软岩巷道围岩破坏机理及控制研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(9): 195–202. XIE Xiaoping, WU Gang, YU Rui, et al. Study on the failure mechanism and control technology of surrounding rock of soft rock roadway near fault[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(9): 195–202.
- [40] 唐岳松, 孙文超, 李增强, 等. 冲击地压矿井充填开采工作面采动应力激增与跌落机制[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(S1): 22–35. TANG Yuesong, SUN Wenchao, LI Zengqiang, et al. Mechanism of mining stress surge and fall in filling mining face of rock burst mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(S1): 22–35.
- [41] 朱斯陶, 王博, 姜福兴, 等. 基于冲击地压-矿震协同控制的隔离煤柱合理宽度研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(6): 102–110. ZHU Sitao, WANG Bo, JIANG Fuxing, et al. Study on reasonable width of isolated coal pillar based on rock burst-mine earthquake coordinated control[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(6): 102–110.