

任文涛,王浩,于冰冰,等. 深部冲击地压矿井近断层高层位爆破卸压防冲技术[J]. 矿业科学学报,2024,9(6):943-952. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2024909

REN Wentao, WANG Hao, Yu Bingbing, et al. Pressure-relief and anti-impact technology of near-fault blasting by high-level roadway in deep pressure bumps mine[J]. Journal of Mining Science and Technology,2024,9(6):943-952. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2024909

## 深部冲击地压矿井近断层高层位爆破卸压防冲技术

任文涛<sup>1</sup>,王浩<sup>1</sup>,于冰冰<sup>2</sup>,左进京<sup>3</sup>,顾鹏<sup>1</sup>,张渊通<sup>3</sup>,郑兴博<sup>1</sup>,王波<sup>2</sup>,张斌<sup>1</sup>,万晓<sup>3</sup>

1. 山东能源集团有限公司,山东济南 250014;

2. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院,北京 100083;

3. 北京科技大学土木与资源工程学院,北京 100083

**摘要:**复杂地质条件下的冲击地压防治工作是现阶段矿业工程技术研究的焦点,以新巨龙煤矿 $10^6$ 能级的大能量微震事件和特殊位置断层的强冲击风险为背景,提出了一种基于近断层高层位爆破的新型卸压防冲技术,从多维度进行了综合评价。结果表明:原位监测的爆炸裂隙区最大扩展半径为1.5 m,据此设计的孔底距和装药量可以保证断层的破断效果; $10^4$ 能级的微震事件由停采前的5.2%降低到恢复推采的1.5%,并且未出现 $10^5$ 和 $10^6$ 能级事件;水平主导应力下巷道变形表现为帮部大于顶底板,覆岩层的压力转移至实体煤帮,导致实体侧变形大于采空侧;巷道的围岩应力波动范围由6~12.85 MPa降低至6~8.5 MPa,峰值显著降低40%。近断层高层位卸压爆破形成的破碎带区域有效地切断了断层与厚硬顶板的联系,削弱了“跷跷板”效应的影响程度,对防冲卸压工程实践以及冲击地压灾害治理具有重要的应用意义。

**关键词:**冲击地压;断层;高层位卸压爆破;原位监测;三维散射炮孔

中图分类号:TD 325

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2024)06-0943-10

## Pressure-relief and anti-impact technology of near-fault blasting by high-level roadway in deep pressure bumps mine

REN Wentao<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, YU Bingbing<sup>2</sup>, ZUO Jinjing<sup>3</sup>, GU Peng<sup>1</sup>, ZHANG Yuantong<sup>3</sup>,  
ZHENG Xingbo<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>2</sup>, ZHANG Bin<sup>1</sup>, WAN Xiao<sup>3</sup>

1. Shandong Energy Group, Jinan Shandong 250014, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

3. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

**Abstract:**The prevention and control of rockburst under complex geological conditions is the focus of research on mining technology at this stage. Based on the  $10^6$ -level high-energy microseismic events of Xinjulong Coal Mine and the high rockburst risk of faults in special positions, a new type of pressure-relief and anti-impact technology based on near-fault high-level blasting is proposed. Anti-rockburst effect of the new pressure relief blasting technology is comprehensively evaluated from multiple dimensions. The results show that: the maximum expansion radius of the explosive fracture zone obtained by in-situ monitoring was 1.5 m, and the hole bottom distance and the charge quantity designed accordingly can ensure the breaking effect of the fault; the microseismic event of  $10^4$  energy level decreased from 5.2% before stopping mining to 1.5% after recovering mining, and no  $10^5$  and  $10^6$  energy level events occurred. Under the horizontal principal stress, the deformation of the roadway was larger than that of the roof and floor, and the stress of the overlying strata was transferred to the solid coal side,

收稿日期:2024-05-07 修回日期:2024-10-17

基金项目:国家自然科学基金(52227805,52474026)

作者简介:任文涛(1985—),男,山东烟台人,本科,工程师,主要从事煤矿冲击地压灾害防治和管理方面的工作。E-mail: renwent1985@163.com

which led to the deformation of the solid side larger than that of the goaf side. The stress fluctuation range of the surrounding rock of the roadway was reduced from 6 ~ 12.85 MPa to 6 ~ 8.5 MPa, and the peak value was significantly reduced by 40%. The fracture zone area formed by the high-level near-fault pressure-relief blasting effectively cut off the connection between the fault and the thick and hard roof, weakened the influence of the “seesaw” effect. The result has important application significance for the practice of anti-rockburst and pressure-relief engineering and the treatment of rockburst disasters.

**Key words:** rockburst; fault; high-level pressure-relief blasting; in-situ monitoring; three-dimensional scattering blasthole

随着能源消耗量的增长,煤炭供需关系矛盾日益加剧,并且浅层的煤炭资源储量有限,无法满足企业开采煤炭的需求。目前,煤炭资源开采逐渐转向深部<sup>[1-4]</sup>,深部的高地应力和水平应力主导状态成为常态<sup>[5-6]</sup>,节理、层理、裂隙、断层、断裂带等广泛发育,岩体的应力环境和赋存条件极易诱发冲击地压灾害<sup>[7-9]</sup>。

近些年来,中国冲击地压矿井总数达到140余处,主要集中在华北地区(以山东为主),开采深度甚至超过了1 000 m<sup>[10-13]</sup>。随着开采深度的不断增加,冲击地压矿井的占比也在不断上升,以冲击地压为主的地质灾害发生概率大大提高<sup>[14-16]</sup>。如何保证煤炭资源的安全开采成为国内外学者关注的焦点。

采用爆破技术进行防冲卸压已经开展了大量研究,包括走向及倾向深孔爆破<sup>[17]</sup>、深浅孔组合爆破<sup>[18]</sup>、切缝药包聚能爆破<sup>[19]</sup>和整层预裂爆破<sup>[20]</sup>等。秦玄焯等<sup>[21]</sup>提出了深井预裂爆破定向切顶卸压的顶板围岩控制技术。高晓进等<sup>[22]</sup>提出了软岩巷道大变形双主动超前爆破预裂顶板防控技术。程敬义等<sup>[23]</sup>为解决深部高应力软岩巷道底鼓制约煤矿安全高效开采的问题,提出了基于底板爆破卸压的注浆加固底鼓联合控制技术。

上述研究对于复杂地质条件的顶板或断层仍然有一定的局限性。首先,煤矿采用的爆破卸压方案仍然局限在走向及倾向爆破或深浅孔组合爆破两种<sup>[24-25]</sup>,无法解决高层位的冲击地压隐患;然

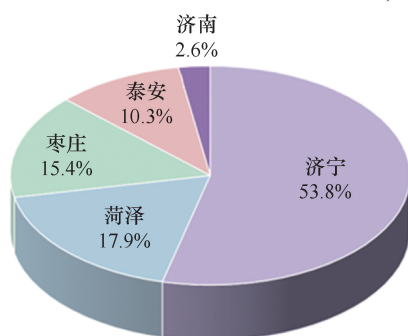
后,断层作为深部的不稳定因素威胁工作面的安全,尤其是贯穿采空区和开采区的断层问题;最后,考虑断层的爆破卸压技术并未从空间角度考虑断层区域的煤岩体失稳现象<sup>[26]</sup>,仅仅是改变爆破方式来弱化断层的影响<sup>[27]</sup>。

为探索特殊位置断层的卸压爆破技术,以菏泽新巨龙煤矿8302工作面为试验地点,根据现场地质条件,在巷道北段的巷道迎头处布设三维散射状炮孔,一方面削弱8301采空区的不完全垮落影响,另一方面尽可能地降低断层对于工作面的冲击倾向性风险。同时,借助现场监测数据综合评价新技术的卸压效果,验证现场三维散射炮孔布置的合理性和可靠性。该项工作是对解决特殊断层爆破卸压难题的一种尝试,有助于降低工作面顶板冲击倾向性,可为防冲卸压工程实践提供参考。

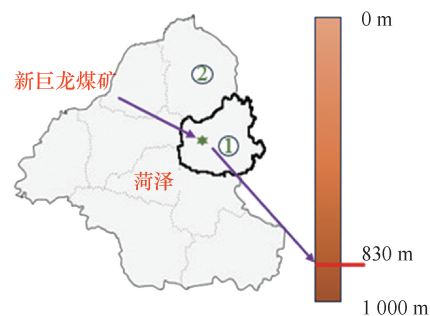
## 1 工程背景

### 1.1 试验地点

试验地点是山东省菏泽市的新巨龙煤矿。山东省作为华北地区煤炭的主要供应地,承担着京津冀地区的电煤需求保障。该地区的煤矿平均采深已经达到了1 000 m,拥有39处冲击地压矿井,在近10年发生了近20起冲击地压事故,新巨龙煤矿就是最典型的代表(图1)。新巨龙煤矿2305工作面于2020年2月22日发生严重的冲击地压事故,该矿目前的开采深度为800~1 100 m。



(a) 山东省冲击地压矿井分布情况



(b) 新巨龙煤矿冲击地压事故

图1 山东省冲击地压矿井现状及新巨龙煤矿具体情况

Fig. 1 Status quo of rockburst-prone mines in Shandong Province and specific situation of Xinjulung Coal Mine

### 1.2 工作面情况

8302工作面宽度为277 m,预计推采1 183 m,在2022年10月开始推采工作。北部为FG1断层和毕垓断层,煤层西北高东南低。相邻的8301工作面已于2020年推采完毕,自然垮落使得8301采空区的垮落程度成为未知数,直接影响8302工作面的安全推采(图2)。

8302工作面上覆40 m处存在厚度为9.5 m的厚硬顶板(中细砂岩层),上方赋存FG1断层(正

断层)。FG1断层紧邻8301回风巷、8302进风巷和开切眼巷,由8301采空区斜切入8302工作面上覆高位厚硬顶板,所处位置和空间分布造就了该断层的独特性。如图2所示,砂岩岩层自上而下交错布置,受到“三高一扰动”的影响,岩性偏软呈现弱胶结特性,且粉化较为严重,各岩层的稳定性和变形控制程度较弱。但是,与煤层相距40 m的厚硬顶板完整性较好,且强度高于其他岩层。岩性特点造成该区域具有强冲击地压倾向性。

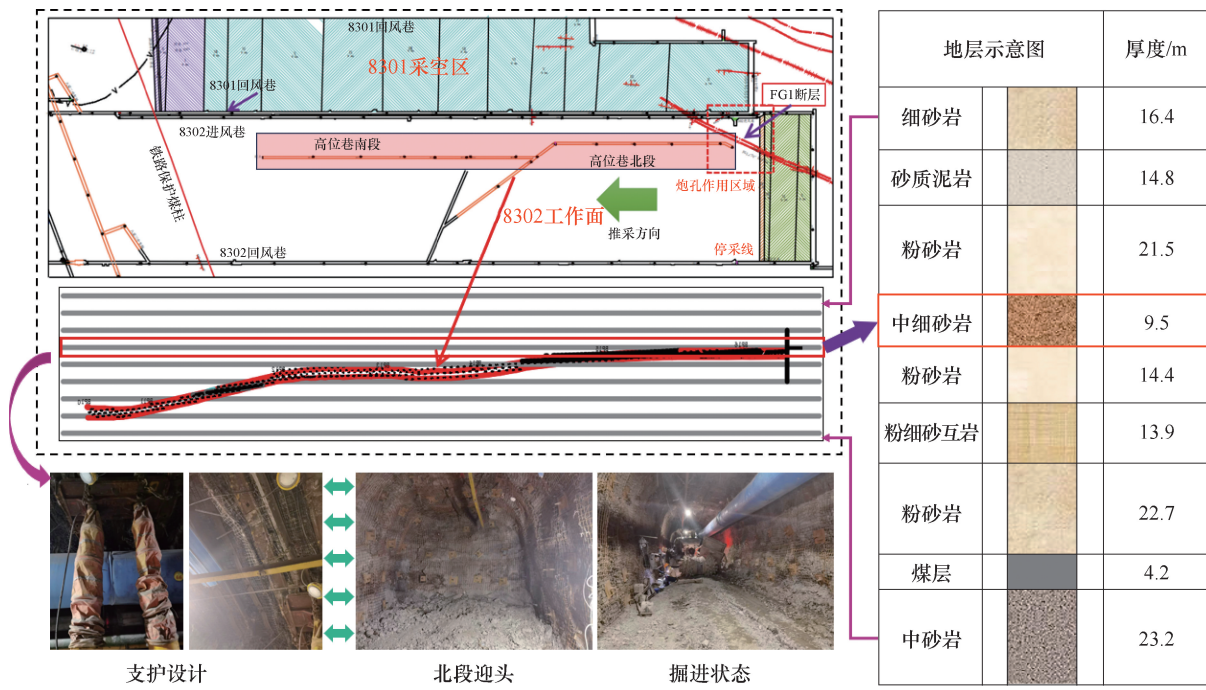


图2 8302工作面的具体工况及岩层信息

Fig. 2 Specific working conditions and rock stratum information of 8302 working face

### 1.3 存在问题

结合地质资料和现场调研,主要存在以下3个问题。

(1) 常规的爆破卸压方法无法处理高层位厚硬顶板(图3)。

(2) 断层、厚硬顶板和8301采空区的空间结构分布复杂。无论工作面开采扰动引起采空区松动垮落,还是触发断层活跃,都会干扰上覆岩层的应力重分布。

(3) 断层位于8301回风巷、8302进风巷和开切眼巷的交汇处,受断层影响极易产生应力集中,出现煤岩体失稳的问题。

断层的存在使得上覆岩层短时间内出现了多次大能量微震事件,并且在断层附近呈现聚集现象

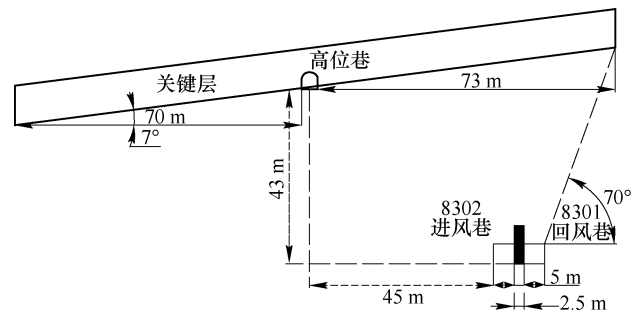


图3 高位厚硬顶板位置示意图

Fig. 3 High-level thick-hard roof position diagram

(图4)。因此,在处理高层位厚硬顶板的前提下,亟需新的卸压技术解决该工作面近断层的防冲卸压问题。

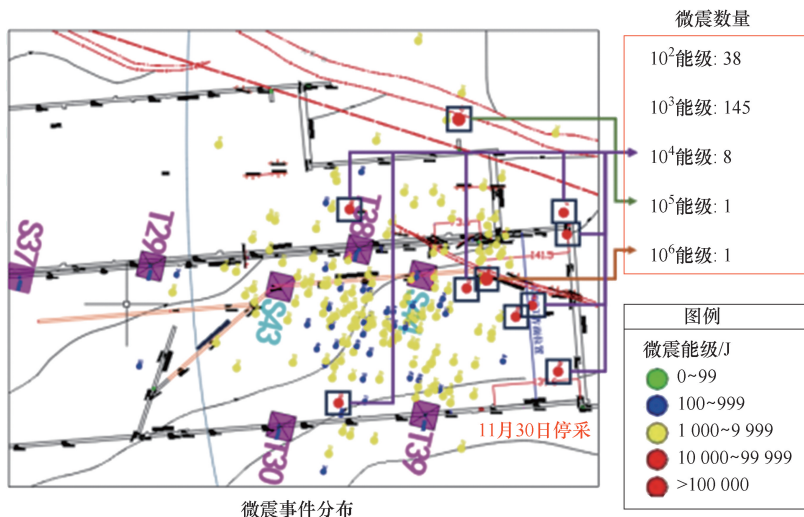


图4 8302工作面推进中微震事件记录

Fig. 4 Record of microseismic events of 8302 working face

## 2 爆破卸压方案设计

终采线距离 FG1 断层切入 8302 工作面的位置 131 m。将高位巷迎头布置在距离终采线水平垂距 62 m 处,按照爆破切块的方式处理 FG1 断层。考虑高位巷 7° 倾角,同时考虑炮孔的三维空

间位置,总计布置 7 组炮孔。

### 2.1 炮孔平面布置形式

断层发生偏转的位置在高程上靠近厚硬顶板,考虑到孔深不宜超过 80 m(塌孔现象频繁且装药困难),因此高位巷迎头的炮孔布置选择在该偏转处,结合高位巷和断层走向进行扇形布置,如图 5 所示。

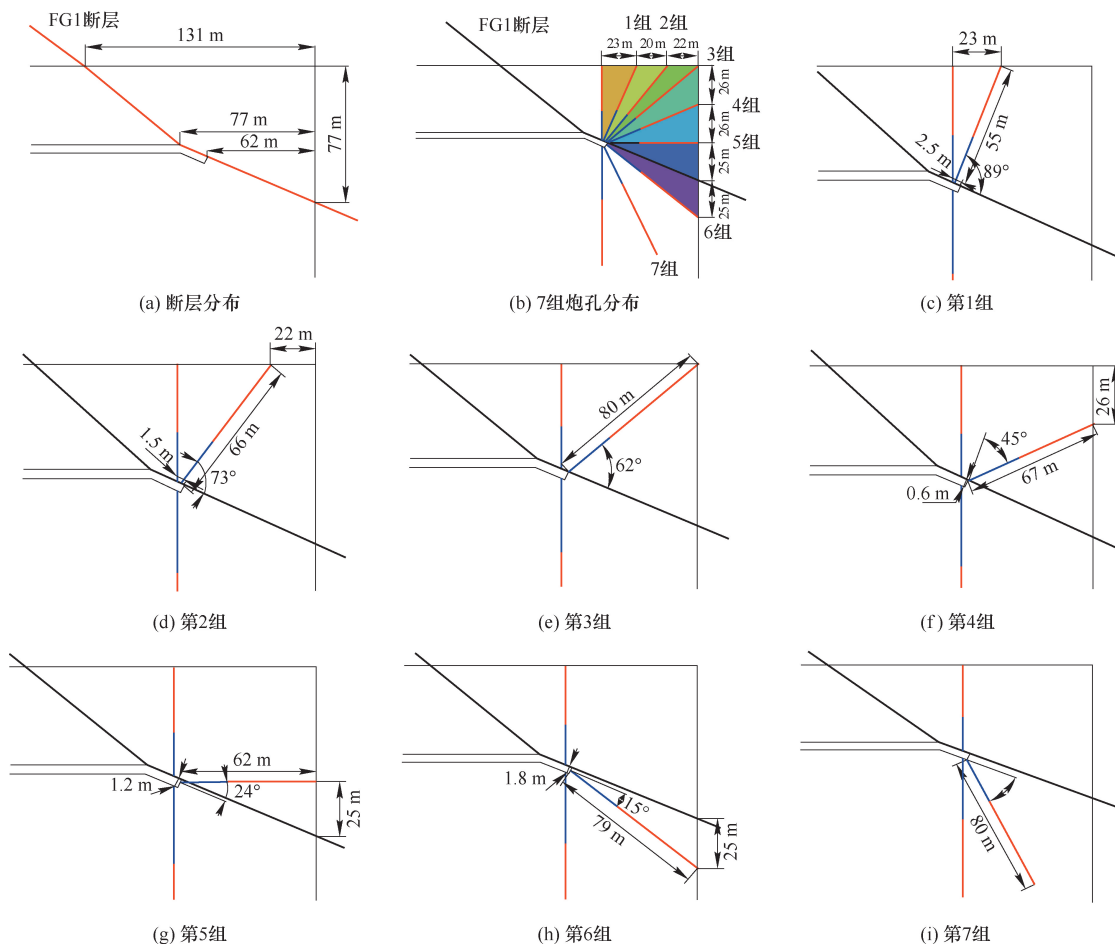


图5 北段巷道迎头爆破三维炮孔设计(俯视图)

Fig. 5 Three-dimensional blasthole design for head-on blasting in north section (plan view)

炮孔的平面布置需要考虑辐射角度与爆破扰动。为了处理断层以北的链式反应块体,巷道迎头靠向断层一侧设计5组;临近采空区一侧按照14°偏转角布置3组,靠巷道迎头一侧按照22°偏转角布置2组。

为了处理断层以南的厚硬顶板,该区域设计2组炮孔。第6组炮孔更靠近断层,夹角为15°,弱化断层扰动出现的滑移效应;第7组炮孔更多的是防止断层弱化爆破引起的厚硬顶板应力骤然释放。

### 2.2 炮孔参数设计

巷道迎头靠向断层一侧的1、2组炮孔,是切断8301采空区和断层的联系(多频次的微震预警);3、4和5组炮孔,在设计时应当尽量削弱断层与高位厚硬顶板的冲击地压威胁(大能量的骤然释放)。该5组炮孔的仰角最大可以限制到40°。

而另外侧6、7组炮孔,则是避免因采动影响传导至厚硬顶板过程中,深部应力重分布所产生的大能量微震事件,两组炮孔与顶板的倾向基本保持一致,最大仰角限制为30°。具体每组的炮孔设计如图6所示。

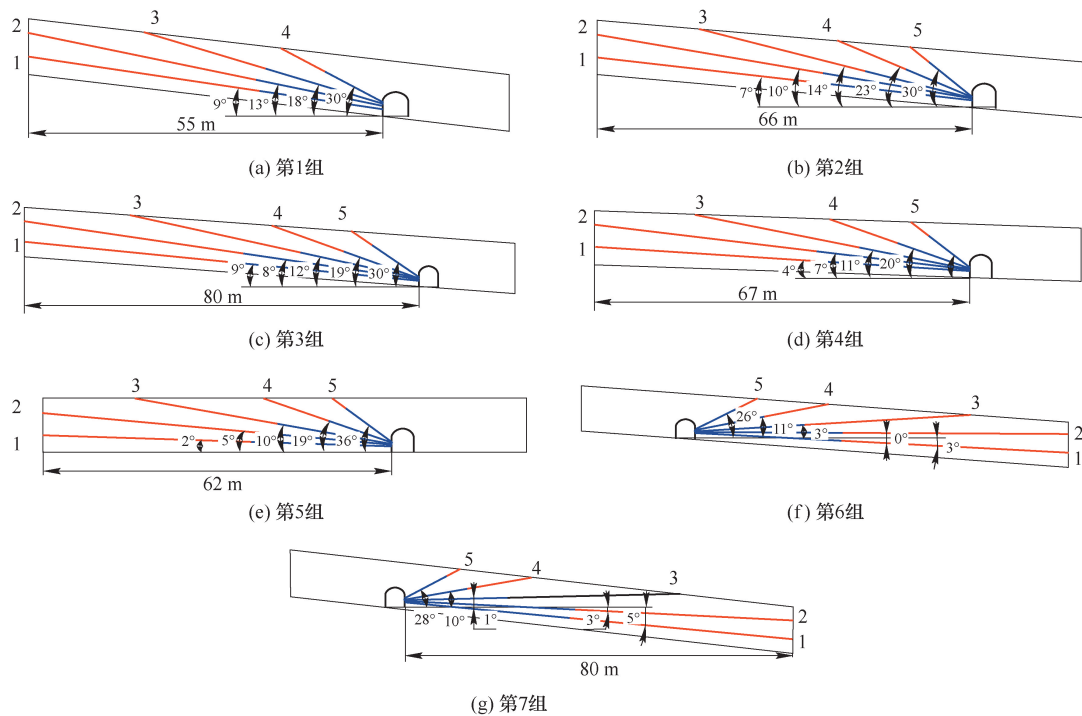


图6 北段巷道迎头爆破单排炮孔倾向布置

Fig.6 Layout of single-row blastholes for head-on blasting

### 2.3 炮孔装药量计算

现场卸压爆破采用大直径径向不耦合装药结构,炸药类型为矿用水胶炸药,直径为75mm,炮孔直径为114mm,为多节药柱捆绑的方式,可以将装药量的计算公式<sup>[28]</sup>整合为

$$Q = K(0.4 + 0.6n^3)q_L L \pi R^2 \quad (1)$$

式中, $Q$ 为单孔装药量; $n$ 为减弱爆破作用指数,0.75 <  $n$  < 1,取值为0.8; $q_L$ 为预裂爆破炸药单耗,范围在0.55~0.60 kg/m<sup>3</sup>,取值为0.60 kg/m<sup>3</sup>;  $L$ 为炮孔深度,m; $R$ 为裂隙区半径,m; $K$ 为修正系数,由于厚硬顶板的岩性较硬,修正系数取值为1.6。

图7为单孔10m不耦合装药爆破试验示意图,共4个钻孔窥视孔(1~4号,5~8号为取芯孔)。掘进机掘进过程中的断面拍摄结果显示,裂隙区半径最大为1.5m(图8)。

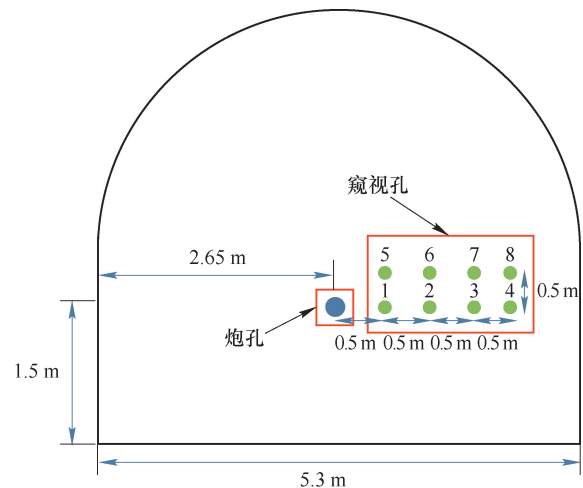


图7 单孔10m不耦合装药爆破试验示意图

Fig.7 Schematic diagram of single-hole 10 m uncoupled charge blasting test



图 8 掘进过程中断面的裂隙区最大半径  
 Fig. 8 Maximum radius of the fracture zone of the section during the excavation process

根据式(1)计算可得到各个炮孔的装药量。巷道迎头断层卸压爆破工程总计 34 个炮孔,施工炮孔总长度为 1 610 m,总计 4 380 kg 炸药。

### 3 卸压效果评价

8302 工作面自从 2022 年 11 月 30 日的  $10^6$  能级大事件后停采,在 2022 年 12 月 1 日—2023 年 7 月 16 日进行工作面北段的爆破卸压工程。每组的爆破卸压微震记录如图 9 所示。

红色的 7 处标记为巷道迎头卸压爆破微震信号,从炮孔影响区域来看,该技术实现了终采线以西工作面的全覆盖,对于降低大能量事件发生的概率、减少断层对工作面安全生产的威胁具有积极作用。

在后续的分析中,现场监测数据时间段为停采前的 2022 年 10—2022 年 11 月,以及恢复推采后的 2023 年 7—2023 年 9 月。结合微震事件<sup>[29]</sup>、巷

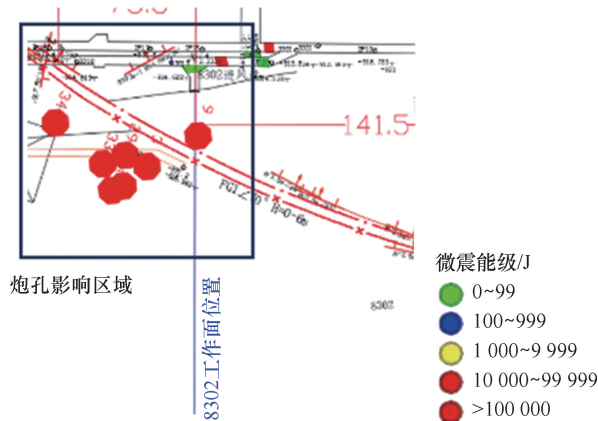


图 9 北段巷道迎头卸压爆破的微震事件分布  
 Fig. 9 Microseismic event distribution of head-on pressure-relief blasting in north section

道超前位移、钻孔应力和工作面液压支架工作阻力的动态监测数据,对 8302 高位巷北段巷道迎头的爆破卸压效果进行综合评价。

#### 3.1 微震监测

8302 工作面总计监测到有效微震事件 3 755 个(包括停采期间),整体呈现“弱双峰状”分布。停采前,工作面推采逐渐靠近断层与三巷交接位置, $10^4$  能量微震事件频次由 1.5% 上升至 4.2%。随着推采工作的恢复,巷道迎头近断层卸压爆破的效果逐步显现,区域性构造应力的运动参与较为明显,大能量事件占比下降(图 10)。

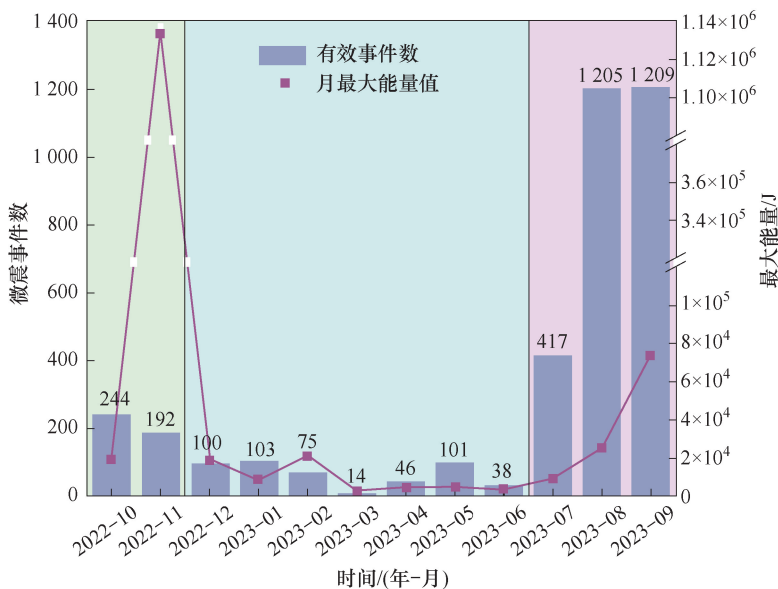


图 10 微震事件的能级分布  
 Fig. 10 Energy level distribution of microseismic events

8302 工作面停采前,微震 4 次方能量事件基本分布在 FG1 断层与毕垓断层之间的岩层结构体。恢复推采后,4 次方事件集中分布在高位巷附

近与 FG1 断层之间,处于“刀把”采空区影响范围,部分延伸至临近的 8301 采空区。采场能量整体趋于稳定,并未出现 5 次方及 6 次方的大能量事件以

及威胁工作面推采的事故。

### 3.2 巷道超前位移

以8302进风巷作为观测对象,在巷道内安装位移计来记录巷道的超前位移数据。为更加明显地比较巷道的变形程度,顶底板移进量、左右帮移进量如图11所示。由图11可看出,8302工作面在恢复推采工作后,巷道变形较为平缓,随着推采进入高位巷北段,巷道变形量增幅增加,进入北段巷道迎头范围(FG1断层)后达到峰值,随后推过FG1断层后逐步减少。

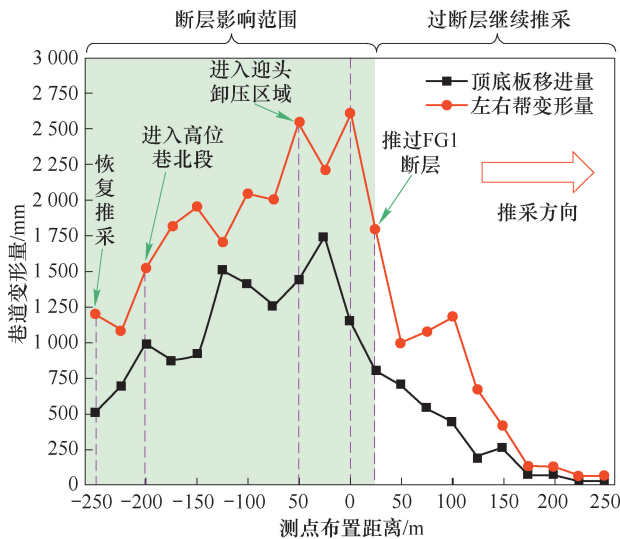


图11 8302进风巷变形情况

Fig. 11 Deformation of 8302 air intake roadway

由于终采线位置的特殊性,进风巷位于“断层-厚硬顶板-8301采空区”三者的链接区域,上覆岩层的应力重分布,进一步充分释放了链接区域岩石内部的能量,整体表现为帮部变形量大于顶底板移进量。巷道超前位移变形量说明,该位置顶板实现了较为充分的破碎和垮落,进一步证明了顶板近断层爆破卸压的有效性。

### 3.3 钻孔应力

应力计放置位置仍然选择8302进风巷的浅基点和深基点,来采集工作面采动过程中上覆岩层的应力演化数据。应力峰值波动范围分别为6.3~12.65 MPa、6.6~8.5 MPa,进风巷浅基点和深基点的应力波动程度较停采前有所减缓,巷道迎头近断层卸压爆破将“跷跷板”效应对工作面的影响程度大大降低,巷道应力波动趋于稳定。

### 3.4 液压支架工作阻力

8302工作面的液压支架的支撑状态和受力变化过程如图12所示。工作面从开始推采就受到断层的干扰,液压支架3个部位的受力一直处于上升趋势线内,在接近断层位置时出现短期高点(28×10<sup>3</sup> kN),后续削减开采频率(由每日3刀更改为平均每日1.5刀),工作阻力下降并维持在18×10<sup>3</sup>~24×10<sup>3</sup> kN。

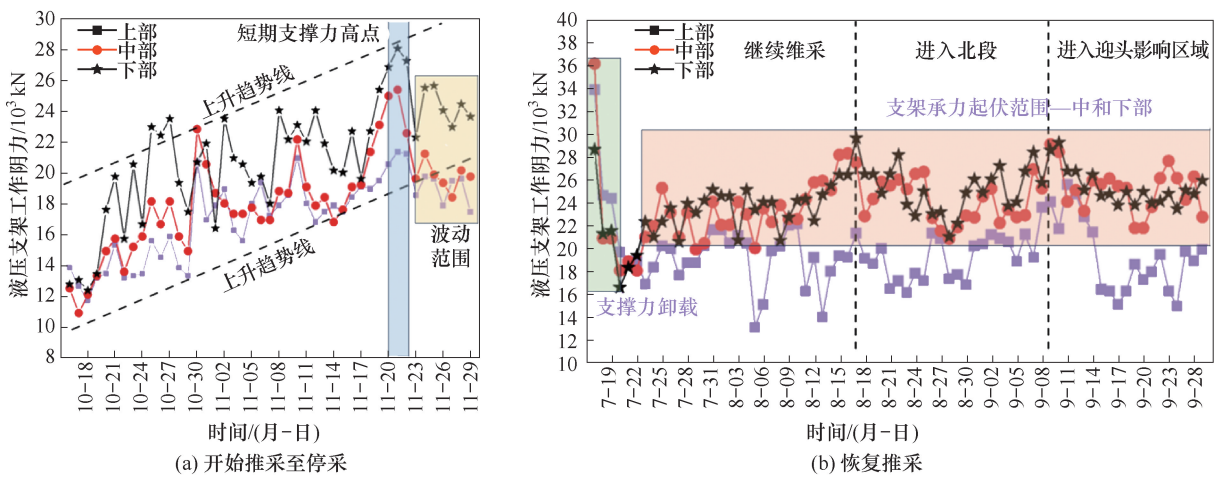


图12 液压支架工作阻力

Fig. 12 Working resistance of hydraulic support

在完成8302北段巷道迎头近断层卸压爆破后,工作面继续推采,液压支架工作阻力相比停采前略有上升,但是未出现骤增现象。液压支架工作阻力整体呈现“弓形”分布,顶部压力主要由中下部承接,基本维持在20×10<sup>3</sup>~28×10<sup>3</sup> kN。高位巷北段的爆破卸压将平均的来压步距由9.7 m增大

至13.2 m,但是并未增大工作面的矿压显现程度,保证了工作面推采工作的安全进行。

## 4 结论

(1) 提出了一种基于近断层高层位爆破的新型卸压防冲技术。借助高位巷接近断层位置,在巷

道迎头布设三维散射状炮孔,解决“断层—厚硬顶板—8301采空区”三者的链式反应问题,既削弱临近采空区的不完全垮落影响,又尽可能地减少断层赋存形态对于工作面的威胁,有助于降低断层对于工作面推采的冲击倾向性风险。

(2) 从微震事件来看,  $10^4$  能量的微震事件占比仍然由停采前的 4.2% 降低到 1.5%, 并且工作面推进过程并未出现  $10^5$  及  $10^6$  能量的微震事件。微震事件能级的降低说明近断层高层位卸压爆破的效果显现。

(3) 8302 进风巷作为首要监测对象, 整体表现为帮部变形量大于顶底板移进量。巷道超前位移变形量说明该位置顶板实现了较为充分的破碎和垮落, 进一步证明了近断层卸压爆破的有效性。

(4) 围岩应力峰值显著降低 40%, 应力波动范围由停采前的 6~12.8 MPa 降低至恢复推采的 6~8.5 MPa, 并且改变了液压支架工作阻力的上升趋势。虽然恢复推采使得来压步距由 9.7 m 增大至 13.2 m, 但是并未增大工作面的矿压显现程度。

## 参考文献

- [1] 蒋曙鸿, 师素珍, 赵康, 等. 深部煤及煤层气勘探前景及发展方向[J]. 科技导报, 2023, 41(7): 106-113.  
JIANG Shuhong, SHI Suzhen, ZHAO Kang, et al. Prospect and development direction of deep coal and coalbed methane exploration[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(7): 106-113.
- [2] 刘淑琴, 畅志兵, 刘金昌. 深部煤炭原位气化开采关键技术及发展前景[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(3): 261-270.  
LIU Shuqin, CHANG Zhibing, LIU Jinchang. Key technologies and prospect for in-situ gasification mining of deep coal resources[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(3): 261-270.
- [3] 何满潮, 马新根, 牛福龙, 等. 中厚煤层复合顶板快速无煤柱自成巷适应性研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2641-2654.  
HE Manchao, MA Xingen, NIU Fulong, et al. Adaptability research and application of rapid gob-side entry retaining formed by roof cutting and pressure releasing with composite roof and medium thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2641-2654.
- [4] 曾静伟, 景国勋, 朱崎峰. 煤矿深部开采领域研究现状可视化分析[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(6): 752-762.  
ZENG Jingwei, JING Guoxun, ZHU Qifeng. Visualization analysis of current research situation in field of deep coal mining[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(6): 752-762.
- [5] 鞠文君, 孙刘伟, 刘少虹, 等. 冲击地压巷道“卸-支”协同防控理念与实现路径[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 90-94.  
JU Wenjun, SUN Liuwei, LIU Shaohong, et al. Idea and implementation of “stress relief-support reinforcement” cooperative control in rockburst roadway[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 90-94.
- [6] 吕进国, 李守国, 赵洪瑞, 等. 高地应力条件下高压空气爆破卸压增透技术实验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1115-1128.  
LÜ Jinguo, LI Shouguo, ZHAO Hongrui, et al. Technology of pressure relief and permeability enhancement with high pressure air blasting under high geo-stress[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 1115-1128.
- [7] 王永法. 防隔水煤柱切顶卸压定向爆破参数设计及工程应用[J]. 煤炭工程, 2024, 56(2): 1-9.  
WANG Yongfa. Parameters design and engineering application of directional blasting for roof cutting pressure relief of waterproof coal pillar[J]. Coal Engineering, 2024, 56(2): 1-9.
- [8] 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.
- [9] 刘文超, 赵毅鑫. 红庆河矿典型工作面冲击地压灾变机理及防治[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(6): 803-816, 827.  
LIU Wenchao, ZHAO Yixin. Mechanism and prevention of typical coal burst disaster at the working face of Hongqinghe coal mine[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(6): 803-816, 827.
- [10] 张建民, 李全生, 张勇, 等. 煤炭深部开采界定及采动响应分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1314-1325.  
ZHANG Jianmin, LI Quansheng, ZHANG Yong, et al. Definition of deep coal mining and response analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1314-1325.
- [11] 孙强, 王琪, 姚腾飞, 等. 唐山矿深部孤岛工作面冲击地压预控技术研究[J]. 矿业科学学报, 2019, 4

- (5):410-416.  
SUN Qiang, WANG Qi, YAO Tengfei, et al. Study on the pre-control of rock burst in the isolated island face of Tangshan mine[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2019, 4(5):410-416.
- [12] 赵社会, 张广杰, 王文. 深埋薄基岩综放工作面切顶卸压沿空留巷围岩协同控制技术研究[J]. 河南理工大学学报:自然科学版, 2022, 41(1):29-42.  
ZHAO Shehui, ZHANG Guangjie, WANG Wen. Study on coordinated control technology of surrounding rock in self-made roadway without coal pillar in roof-cutting and pressure-relief of fully-mechanized caving face with deep buried thin bedrock[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2022, 41(1):29-42.
- [13] 刘旭东, 刘传义, 刘垚, 等. 近直立煤层深浅孔爆破卸压技术与效果分析[J]. 煤炭工程, 2022, 54(3):79-83.  
LIU Xudong, LIU Chuanyi, LIU Yao, et al. Analysis on pressure relief technology and effect of deep and shallow hole blasting in near-vertical coal seam[J]. Coal Engineering, 2022, 54(3):79-83.
- [14] 马宏源, 潘俊锋, 席国军, 等. 坚硬顶板强冲击工作面多巷交叉区域防冲技术[J]. 工矿自动化, 2022, 48(4):121-127.  
MA Hongyuan, PAN Junfeng, XI Guojun, et al. Rock burst prevention technology in multi-roadway intersection area of hard roof strong impact working face[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(4):121-127.
- [15] 朱文庆, 郝兵元, 刘世涛, 等. 工作面末采段深孔预裂切顶护巷技术研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(5):97-103.  
ZHU Wenqing, HAO Bingyuan, LIU Shitao, et al. Deep hole pre-split roof cutting and roadway protection in end mining of working face[J]. Coal Engineering, 2022, 54(5):97-103.
- [16] 季明, 郭红军, 周舟, 等. 断高位承压拱卸压技术在孤岛工作面回采中的应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(3):525-533.  
JI Ming, GUO Hongjun, ZHOU Zhou, et al. Application of pressure relief technology of breaking high-level pressure arch in an island working face mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(3):525-533.
- [17] 靖文青. 深孔预裂爆破切顶卸压护巷机理与实践[J]. 煤炭技术, 2023, 42(6):75-79.  
JING Wenqing. Mechanism and practice of deep hole pre-cracking blasting to cut roof and unload pressure to protect roadway[J]. Coal Technology, 2023, 42(6):75-79.
- [18] 张广辉, 蒋军军, 邓志刚, 等. 双巷掘进留小煤柱护巷下深浅孔组合爆破卸压技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(11):33-40.  
ZHANG Guanghui, JIANG Junjun, DENG Zhigang, et al. Research on pressure relief technology of deep and shallow hole combined blasting under retaining small coal pillar in double roadway excavation[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11):33-40.
- [19] 段宝福, 陈佳华, 柴明星, 等. 深孔聚能预裂爆破切顶卸压机理与应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2024, 43(1):1-10.  
DUAN Baofu, CHEN Jiahua, CHAI Mingxing, et al. Mechanism and application of roof cutting and pressure relief in deep-hole shaped charge presplit blasting[J]. Journal of Shandong University and Technology (Natural Science), 2024, 43(1):1-10.
- [20] 郝宪杰, 孙希奎, 唐忠义, 等. 覆岩高位整层爆破卸压“人造预裂层”源头防冲技术体系及应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3):1318-1331.  
HAO Xianjie, SUN Xikui, TANG Zhongyi, et al. Technology system and application of "artificial pre-fracture layer" by high level whole layer blasting for pressure releasing to source prevention and control of rockburst[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(3):1318-1331.
- [21] 秦玄焯, 张英华, 黄志安, 等. 深井薄煤层保护层坚硬顶板破断机理及控制技术[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2021, 52(11):4010-4020.  
QIN Xuanye, ZHANG Yinghua, HUANG Zhian, et al. Breaking mechanism and control technology of hard roof in deep and thin coal seam protective layer[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2021, 52(11):4010-4020.
- [22] 高晓进, 李煜炜, 张振金, 等. 软岩巷道大变形双主动超前爆破预裂顶板防控技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2):589-598.  
GAO Xiaojin, LI Yuwei, ZHANG Zhenjin, et al. Prevention and control technology of pre-splitting roof by dual active advanced blasting in soft rock large deformation roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2):589-598.
- [23] 程敬义, 魏泽捷, 白纪成, 等. 基于爆破卸压的深部构造应力富水软岩巷道底鼓控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7):117-126.  
CHENG Jingyi, WEI Zejie, BAI Jicheng, et al. Study on floor heave control technology of deep tectonic stress water-rich soft rock roadway based on blasting pressure relief[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7):117-126.

- 117-126.
- [24] 何春光,徐晓鼎,杨建辉,等. 厚硬顶板切顶卸压围岩变形控制技术研究[J]. 煤炭工程,2022,54(9):59-63.
- HE Chunguang, XU Xiaoding, YANG Jianhui, et al. Surrounding rock deformation control for roof cutting and pressure relief under thick and hard roof[J]. Coal Engineering,2022, 54(9):59-63.
- [25] 李楠. 综采工作面厚硬砂岩顶板深孔爆破预裂卸压技术与应用[J]. 煤炭技术,2022,41(7):143-147.
- LI Nan. Deep hole blasting presplitting pressure relief technology and its application in thick hard sandstone roof of fully mechanized mining face[J]. Coal Technology,2022,41(7):143-147.
- [26] 高魁,王有为,乔国栋,等. 构造煤层顶板爆破跨界面致裂增透机制研究及应用[J]. 煤田地质与勘探,2024,52(4):35-46.
- GAO Kui, WANG Youwei, QIAO Guodong, et al. Mechanism and application of cross interface cracking for permeability enhancement in tectonic coal roof blasting[J]. Coal Geology & Exploration,2024,52(4):35-46.
- [27] 郭东明,郭供应,张新天,等. 赵官矿切顶卸压沿空留巷爆破参数研究[J]. 煤炭技术,2024,43(2):176-178.
- GUO Dongming, GUO Gongying, ZHANG Xintian, et al. Research on blasting parameters of gob-side entry retaining for roof cutting and pressure relief in zhaoguan mine[J]. Coal Technology,2024,43(2):176-178.
- [28] 庄又军,薛峰,张卫,等. 深孔预裂爆破装药量计算方法及水耦合装药结构优化[J]. 中国矿业,2021,30(1):150-154.
- ZHUANG Youjun, XUE Feng, ZHANG Wei, et al. Calculation method of charge in deep hole pre-split blasting and optimization of water-coupling charge structure[J]. China Mining Magazine,2021,30(1):150-154.
- [29] 温颖远,郭志刚,曹安业,等. 基于微震数据评价的顶板深孔爆破卸压效果分析[J]. 煤炭科学技术,2020,48(6):57-63.
- WEN Yingyuan, GUO Zhigang, CAO Anye, et al. Analysis of pressure relief effect of roof deep hole blasting parameters based on micro-seismic data evaluation[J]. Coal Science and Technology,2020,48(6):57-63.

(责任编辑:陈骏)