



基于局部矿井刚度理论的煤柱冲击机理及防治

高富强 卢志国 彭相愿 娄金福 曹舒雯 王晓卿 陆闯 杨磊

引用本文:

高富强, 卢志国, 彭相愿, 等. 基于局部矿井刚度理论的煤柱冲击机理及防治[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 125-136.
GAO Fuqiang, LU Zhiguo, PENG Xiangyuan. Coal pillar burst mechanism and prevention based on local mine stiffness (LMS) criterion[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 125-136.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0706>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于负煤柱巷道布置的煤矿冲击地压防治技术研究

Study on mine rock burst prevention and control technology based on gateway layout with negative coal pillars
煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/392507bb-24fa-4dd7-a055-15a3a9de94d3>

煤柱型冲击地压类型、发生机理与防治对策研究

Research on the type and occurrence mechanism and prevention of coal pillar rockbursts
煤炭科学技术. 2023, 51(10): 1-11 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0017>

陕西煤矿冲击地压发生规律与分类防治

Occurrence law and classification prevention of rock burst in coal mines of Shaanxi Province
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 95-105 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1492>

煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构

Architecture of structural regulation technology for rock burst disaster in deep mining of coal mine
煤炭科学技术. 2022, 50(2): 27-36 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/832c1706-c116-49d3-ab3e-b9e69c7f8f2e>

冲击地压矿井采区下山保护煤柱合理宽度研究

Study on rational width of protective coal pillar for district dip in rock burst mine
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 52-60 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.007>

基于冲击地压矿震协同控制的隔离煤柱合理宽度研究

Study on reasonable width of isolated coal pillar based on rock outbursting-mine seismicity coordinated control
煤炭科学技术. 2021, 49(6): 102-110 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/db959827-d7b4-4bb8-bbf4-9030e3b08700>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

高富强, 卢志国, 彭相愿, 等. 基于局部矿井刚度理论的煤柱冲击机理及防治[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 125-136.

GAO Fuqiang, LU Zhiguo, PENG Xiangyuan, *et al.* Coal pillar burst mechanism and prevention based on local mine stiffness (LMS) criterion[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 125-136.



高富强, 男, 河南扶沟人, 中煤科工开采研究院有限公司研究员, 中国煤炭科工集团首席科学家, 国家杰出青年基金获得者, 现任煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室常务副主任、矿山顶板灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室常务副主任, 兼任国际岩石力学学会地壳应力与地震专业委员会委员、中国岩石力学与工程学会采矿岩石力学分会副理事长、《采矿与岩层控制工程学报》副主编。长期致力于矿山岩体力学及巷道围岩控制方面的科研工作, 主持和参与国家科技项目 20 余项, 发表论文 80 余篇, SCI 严格他引 1 800 余次。连续入选“全球前 2% 顶尖科学家终身影响力榜单”。获国家技术发明二等奖 1 项, 岩石力学与工程学会自然科学一等奖 1 项、省部级科技进步一等奖 4 项、二等奖 4 项。

基于局部矿井刚度理论的煤柱冲击机理及防治

高富强^{1,2,3}, 卢志国^{1,2}, 彭相愿^{1,2}, 娄金福^{1,2,3}, 曹舒雯^{1,2}, 王晓卿^{1,2}, 陆 闯¹, 杨 磊^{1,2}

(1. 中煤科工开采研究院有限公司, 北京 100013; 2. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013;

3. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013)

摘要: 冲击地压频发严重威胁煤炭资源安全高效回收, 冲击地压机理研究是预测预警和灾害防治的基础。针对某矿井应力环境稳定且未受到动载影响的条件下发生的冲击事件, 引入局部矿井刚度(LMS)概念, 并以该矿井冲击事件高发区域为工程背景, 综合运用数值分析和现场实测等方法, 分析复杂采掘布置条件下大空间尺度采掘作业过程中煤柱力学响应规律, 并考察该过程中局部矿井刚度演化。指出采掘作业导致局部矿井刚度降低, 煤层及其顶底板系统中能量快速积累, 超过煤柱破坏所需能量, 在失稳瞬间迅速释放造成煤柱冲击破坏, 并对比分析随工作面推进局部矿井刚度演化与现场地音及微震实测数据。基于煤柱冲击破坏机理, 结合该矿生产实际, 采用大直径钻孔弱化煤体, 降低冲击危险性, 并以实测微震数据验证防冲效果。研究表明: ①煤柱变形、载荷及弹性能量积累随采掘作业整体呈增长趋势, 但 LMS 呈降低趋势, 采出空间尺寸及其与研究区域间距离是主要影响因素, LMS 对工作面回采响应程度显著大于巷道掘进, 工作面回采对 LMS 降低显著影响范围是巷道掘进的 3.67 倍, 单位推进距离下 LMS 降幅是巷道掘进的 6.41 倍。②随工作面推进 LMS 演化与现场地音及微震数据的良好对应关系, 表明煤层回采导致 LMS 降低直接影响煤柱破坏方式, 煤层及其顶底板系统中能量随 LMS 降低而快速积累, 在煤柱承载能力降低时迅速释放, 致使煤柱发生冲击破坏。③采用大直径钻孔弱化煤体后, 微震能量及频次均显著降低, 表明大直径钻孔破坏该区域煤体, 降低煤柱峰后刚度, 冲击危险性降低。

关键词: 煤炭开采; 冲击地压; 局部矿井刚度; 煤柱响应; 能量演化; 大直径钻孔防冲

中图分类号: TD324

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)09-0125-12

Coal pillar burst mechanism and prevention based on local mine stiffness (LMS) criterion

收稿日期: 2024-05-20 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.12438/cst.2024-0706

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52074154), 开采设计事业部“科技创新基金”资助项目(KJ-2021-KCSYS-01, KJ-2021-KCSYS-02)

作者简介: 高富强(1981—), 男, 河南扶沟人, 研究员, 博士。E-mail: gaofuqiang@tdkcsj.com

通讯作者: 卢志国(1992—), 男, 山西阳泉人, 博士。E-mail: cumtblzg@163.com

GAO Fuqiang^{1,2,3}, LU Zhiguo^{1,2}, PENG Xiangyuan^{1,2}, LOU Jinfu^{1,2,3}, CAO Shuwen^{1,2}, WANG Xiaoqing^{1,2},
LU Chuang¹, YANG Lei^{1,2}

(1. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Strata Control, Beijing 100013, China; 3. Coal Mining Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The frequent occurrence of coal burst seriously threatens the safe and efficient recovery of coal resources. The research on the mechanism of coal burst is the basis of prediction and disaster prevention. Aiming at the coal burst event under the condition that the stress environment is stable and not affected by dynamic load, the concept of local mine stiffness (LMS) is introduced. Taking the mining area with complex mining layout of the mine as the engineering background, the mechanical response of coal pillar in the process of large-scale mining is analyzed by comprehensively using numerical analysis and field measurement. The evolution of LMS in this process is investigated. It is pointed out that the mining leads to the reduction of LMS, the rapid accumulation of energy in the coal seam and its roof and floor system, and the rapid release of energy when the coal pillar is unstable, resulting in impact damage. The engineering verification is carried out by comparing the evolution of LMS with the mining and the field measured ground sound and microseismic data. The research shows that: ① the deformation, load and elastic energy accumulation of coal pillar increase with the overall mining operation, but the LMS decreases. The mining space size and the distance between the mining space and the research area are the main influencing factors. The response degree of the two to the mining of the working face is significantly greater than that of the roadway excavation. The significant influence range of the mining of the working face on the LMS reduction is 3.67 times that of the roadway excavation, and the LMS reduction under the unit advancing distance is 6.41 times that of the roadway excavation. ② The good correspondence between the evolution of local mine stiffness with the advancement of the working face and the on-site ground sound and microseismic data indicates that the reduction of local mine stiffness caused by coal mining directly affects the failure mode of coal pillars. The energy in the coal seams and their roof and floor systems accumulates rapidly with the reduction of local mine stiffness and is released rapidly when the bearing capacity of coal pillars decreases, resulting in impact damage. ③ After using large-diameter drilling to weaken the coal body, the microseismic energy and frequency are significantly reduced, indicating that large-diameter drilling destroys the coal body in this area, reduces its post peak stiffness, and effectively realizes the impact prevention effect.

Key words: coal mining; coal burst; local mine stiffness (LMS); coal pillar response; evaluation of energy; coal burst prevention by large diameter drilling

0 引 言

据不完全统计,在我国已有超200座煤矿发生过冲击地压事故,且现存在产冲击地压煤矿仍有138座^[1](其中包括2座按照冲击地压矿井进行管理)。冲击地压已成为煤炭资源安全高效采出的重要威胁之一^[2-3],由此,关于冲击地压的监测预警技术^[4-6]及灾害防治手段^[7-9]的研究是当前热点研究课题,具有重要现实意义。值得注意的是,作为预测预警及灾害防治理论基础的冲击地压发生机理研究是最主要、最根本的内容之一。

强度理论、能量理论和冲击倾向性理论是最早的冲击地压发生机理,且已得到广泛认可和应用^[10-13]。强度理论关注应力环境与煤体承载能力间相对关系;能量理论认为围岩系统能量释放速率高于煤体破坏耗能速率时,发生冲击地压;冲击倾向性理论认为冲击倾向性作为煤体自身属性,是冲击地压发生的必要条件。我国学者在总结前人研究成果的基础上,先后提出“三准则”理论^[14]、“三因素”理论^[15]、变形系统失稳理论^[16]、扰动响应理论^[17]、冲击启动理论^[18]等理论成果。并且针对断层构造^[19]、深埋煤

层^[20]等高危区域建立相应冲击地压发生机理。在明晰冲击发生机理的基础上,针对性地衍生出诸如“弱化减冲”理论^[21-22]与“应力控制”理论^[22-24]等防控型理论成果。

现有冲击地压机理研究已取得丰硕成果,并有效指导生产实践中监测预警及防治技术的开发。刚度理论^[25]认为矿体系统刚度大于负载系统刚度时易诱发冲击地压。应力环境与煤岩体力学性质的相对关系决定是否发生破坏,但破坏模式则取决于矿体负载系统与煤体自身刚度相对关系。由此,SALAMON^[26]提出局部矿井刚度概念(local mine stiffness, LMS),描述不同开采阶段矿井任一位置煤层及其顶底板组成系统的等效刚度,即负载系统刚度。若LMS低于煤柱峰后刚度,则煤体发生冲击地压的危险性增大。KAISER等^[27]认为应变型冲击地压是由岩柱的应力状态及其位置的刚度决定的,与微震运动无关。对于应变型冲击地压,能量储存于开挖空间周围的围岩中,其大小与围岩的强度、岩体破坏后的峰后特征和局部矿井刚度有关。JAISWAL等^[28-29]采用边界元和有限元相结合的方法研究煤柱的不稳定性破坏,采用FEM计算煤柱的峰后曲

线特征,采用边界元方法计算 LMS,通过两者比较来辨别煤柱是否会发生不稳定性破坏。ADHIKARY 等^[30]采用局部矿井刚度理论对井下房柱式开采条件下煤柱稳定性进行了数值模拟,分析矿区应力场平衡状态下任何微变化是否引起能量的突然释放或引起矿井系统几何形状的突变。笔者^[31]采用 UDEC 数值方法还原物理模拟中煤柱冲击过程,并分析应力环境及煤柱力学参数对 LMS 演化的影响。

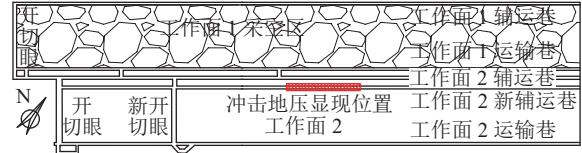
当前对 LMS 演化的研究主要以房柱式开采或一个工作面为背景而开展,对于具有复杂采掘布置的采区而言,LMS 随大空间尺度采掘作业演化过程的研究鲜有报道;且数值模拟仍是 LMS 计算的主要手段,因此尚未有研究将 LMS 演化与现场实测数据进行对比分析。基于上述 2 点,以某煤矿冲击事件高发区域所在采区为工程背景,构建 FLAC^{3D} 数值模型,获取不同开挖状态下研究区域煤柱变形、受力及弹性能量密度,并计算其 LMS。分析煤柱变形、载荷、弹性能量密度及其 LMS 随采掘作业演化过程,并将 LMS 随采掘作业演化与现场实测地音及微震数据进行对比,从 LMS 随采掘作业降低的角度分析冲击地压发生机理。结合该矿生产实际,采用大直径钻孔破坏煤体,降低其峰后刚度以降低冲击危险性,监测大直径钻孔施工前后施工区域微震信号,验证防冲效果。

1 工作面概况

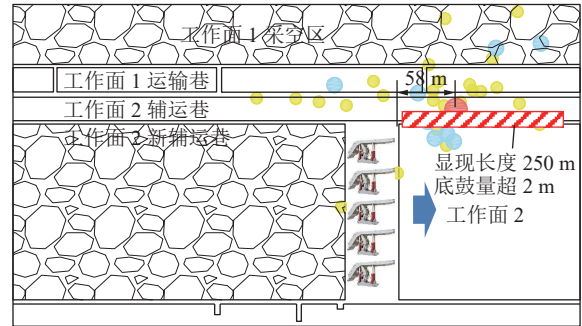
某煤矿 3-1 煤层南翼一采区工作面 2 赋存深度为 583.55 ~ 861.90 m,平均 718.60 m,煤层可采厚度 0.80 ~ 8.45 m,倾角 1° ~ 3°。工作面 2 回采初期辅运巷发生冲击事故,经论证决定放弃工作面 2 辅运巷,在实体煤中留 30 m 煤柱再掘进工作面 2 新辅运巷。因此,工作面 2 内布置有新辅运巷和运输巷 2 条回采巷道,工作面东南与尚未开采的工作面 3 实体煤相邻,西北与工作面 1 采空区相邻,两者之间相隔有宽 30 m 的双煤柱,工作面 2 井下位置及相邻工作面采掘情况如图 1 所示。工作面 2 赋存环境良好,地质构造简单,顶底板岩层结构完整。

工作面 2 回采期间,新辅运巷道内频繁发生剧烈矿压显现事件。以震源能量最大的某次事件为例,巷道变形量超 2 m,设备损坏严重,微震系统定位震源与工作面 2 相距 58 m,震源能量 4.0×10^6 J,显现范围为里程 2 720 ~ 2 970 m 处,如图 1 所示。

获取回采期间煤柱载荷变化及回采影响范围内地音、微震等信息,以对冲击事件进行预警,并针对



(a) 工作面 2 及相邻工作面采掘情况



(b) 显现位置、特征及震源定位

图 1 冲击显现区域及相邻工作面采掘情况

Fig.1 Underground position of microseismic and excavation of adjacent working faces

性制定防治措施。在工作面 2 新辅运巷道内每隔 30 m 布置一组钻孔应力计监测煤柱应力变化,包含一个 14 m 深孔应力计和一个 8 m 浅孔应力计,钻孔应力计初始压力为 5 MPa;在工作面前方 70 m 和 150 m 布置地音测站,运输巷和新辅运巷各 2 个,编号为 D1 ~ D4,随工作面推进依次向前移动,实时监测回采过程地音信号;6 个微震监测传感器,包括 2 个探头 (T1、T2) 和 4 个拾震器 (S1 ~ S4),沿运输巷和新辅运巷间隔菱形布置,根据采掘情况适时调整微震监测台网,对工作面前方 250 m 范围进行重点监测,4 类传感器布置方案如图 2 所示。以震源能量最大的某次冲击事件为典型案例分析,提取冲击区域应力、地音和微震监测数据,记冲击显现为 0 时刻,如图 3 所示。

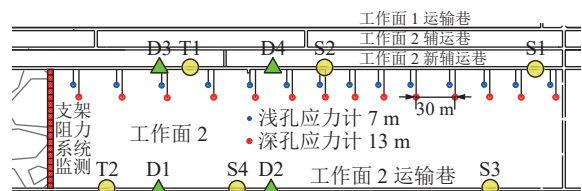


图 2 工作面监测设备布置方案

Fig.2 Layout of monitoring equipment

冲击显现前,应力状态、地音和微震处于相对平稳状态。冲击区域煤层应力平稳缓慢上升,在冲击事件发生前工作面连续推进 62 m 范围内浅孔应力升高 1.5 MPa,深孔应力升高 5.5 MPa,冲击显现当日应力升高不足 2 MPa。地音能量及频次在冲击事件

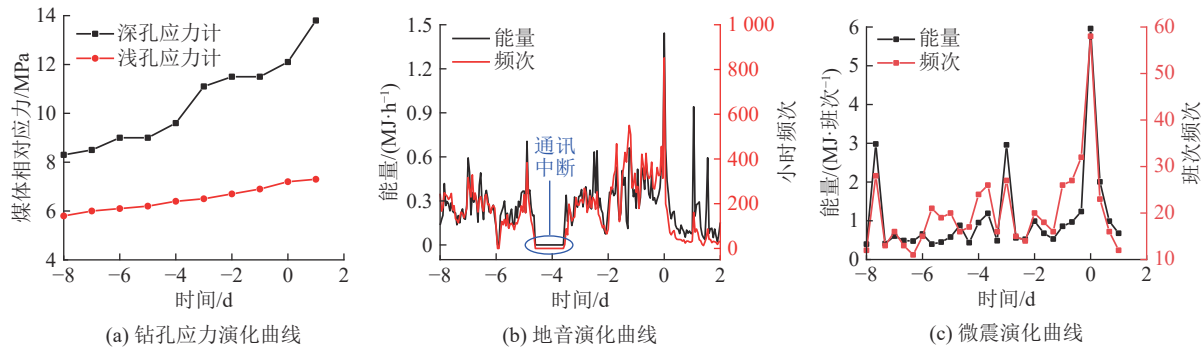


图3 冲击事件发生区域监测结果

Fig.3 Monitoring results of coal burst event area

发生前出现小幅度周期性波动,考察小幅度波动的波峰及波谷对应时间发现,小幅度波动与工作面生产班次相对应,表明该时间段内地音信号主要由工作面回采产生的振动引起。

冲击显现前3日和8日各出现一次较强微震信号外,微震事件较少、能量低。结合工作面推进速度及现场支架载荷变化情况,可知冲击显现前3日及8日两次较强微震信号为顶板周期来压所致。据此判断冲击显现时更强微震信号并非顶板来压所致,表明该次冲击事件发生时,上覆岩层运动处于相对稳定状态,未发生破断,即未受到明显动载影响。

现场观测结果表明,即使冲击区域受力状态稳定,且未受到明显动载,即无较大能量输入时,仍有冲击事件发生。现有冲击地压理论难以做出合理解释,引入局部矿井刚度概念,描述不同开采阶段矿井任一位置煤层及其顶底板组成系统的等效刚度,即为任一位置煤柱负载系统刚度^[26]。笔者团队^[31-33]基于局部矿井刚度理论自主研发冲击地压试验装置,再现煤体在加载-稳压-开挖-冲击破坏的冲击地压发生全过程,研究结果表明局部矿井刚度随研究区域附近采出空间增大整体呈降低趋势,从局部矿井刚度随采掘作业降低角度探究冲击地压发生机理。

关于局部矿井刚度中“局部”范围的界定,需要说明的是,“局部”是相对于整个矿井甚至井田范围而言的,其范围可根据实际研究及现场监测、防控需要而确定具体尺寸。以煤柱冲击破坏为研究对象,工程背景中煤柱宽度为30 m,因此确定30 m×30 m方形为研究区域。

2 随采掘作业煤柱响应特征

2.1 模型建立及采掘方案

以该煤矿3-1煤层南翼一采区地质条件为背景,构建FLAC^{3D}数值模型。模型尺寸($X \times Y \times Z$)为

1 760 m×1 180 m×236 m,包含2条上山、2个工作面及5条回采巷道,对巷道及巷道间煤柱进行局部加密,工作面1辅运巷及工作面2运输巷外侧分别留有280 m及285 m边界,工作面及巷道布置与现场生产条件一致,如图4所示。 X 方向为工作面推进方向, Y 方向为工作面布置方向,工作面斜长均为250 m,两侧回采巷道宽5 m,煤柱宽30 m。模型顶部施加12.8 MPa垂直均布载荷,模拟上覆岩层重力,水平方向施加梯形分布载荷,为垂直方向的1.2倍。模型采用Mohr-Coulomb本构,全部垮落法处理采空区,各层参数详见表1。

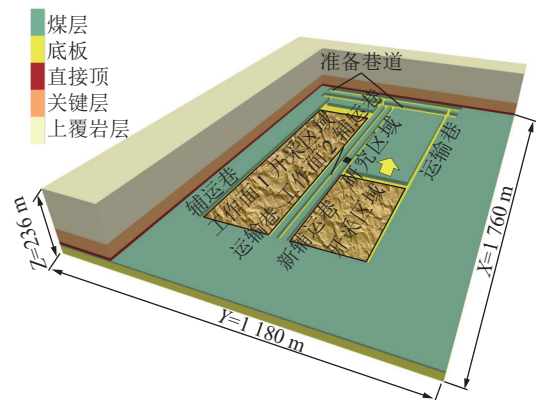


图4 工作面及巷道布置平面

Fig.4 Layout plan of working face and roadway

以现场生产状况为依据,按照准备巷道掘进—工作面1辅运巷掘进—工作面1运输巷和工作面2辅运巷双巷掘进—工作面1回采—工作面2运输巷掘进—工作面2新辅运巷掘进—工作面2回采的顺序,分7个阶段依次进行采掘作业。考虑到准备巷道与研究区域在工作面推进方向(X 方向)上的距离未发生变化,因此一次掘进完成。工作面1辅运巷距离研究区域较远,对研究区域影响较小,分5步掘进完成。而工作面1运输巷和工作面2辅运巷、工作面1、工作面2运输巷、工作面2新辅运巷、工作面2

距离研究区域较近,对研究区域影响较明显,每一阶段分17步完成,每一开挖步完成后,获取研究区域煤柱变形、受力及弹性能量密度,分析随采掘作业煤柱响应特征。自第二阶段起,每一开挖阶段与研究区域在Y方向的距离分别为307.5、35、180、272.5、17.5、145 m。

表1 数值模型岩层参数
Table 1 Numerical model rock parameters

| 层位 | 厚度/m | 体积模量/ GPa | 剪切模量/ GPa | 黏聚力/ MPa | 抗拉强度/ MPa |
|-----|------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| 底板 | 30 | 2.2 | 0.8 | 1.6 | 1.0 |
| 煤层 | 5 | 2.1 | 0.7 | 1.5 | 0.8 |
| 直接顶 | 10 | 2.6 | 0.9 | 1.9 | 1.2 |
| 关键层 | 40 | 5.4 | 4.8 | 6.2 | 1.8 |
| 覆岩 | 150 | 2.5 | 0.8 | 1.6 | 1.0 |

2.2 随采掘作业煤柱响应特征

每一开挖阶段最末开挖步完成后,计算至平衡状态,记录研究区域煤柱压缩变形量、竖直应力及弹性能量密度随开挖演化,如图5所示。研究区域煤柱压缩变形量、竖直应力及弹性能量密度随着采掘作业而逐渐增加,三者增长趋势相似,工作面回采期间三者增量显著大于巷道掘进期间。这是由于工作面采出空间显著大于巷道掘进,应力集中程度更高,致使煤柱发生更大压缩变形,由此煤柱积累更多变形能。从采掘作业范围与研究区域间距离角度分析,当采出空间相差较小时,煤柱压缩变形量、竖直应力及弹性能量密度三者增量与其距采掘作业范围间距离负相关,即采掘作业空间与研究区域相距越远,煤柱响应越微弱,如工作面2新辅运巷掘进(阶段6)产生增量大于工作面1和工作面2运输巷掘进期间(阶段3和5)。

对比工作面1和2回采期间(阶段4和7),煤柱响应特征发现,工作面1回采期间煤柱变形增量小于工作面2回采,分别为52.15 mm和342.92 mm;但载荷和弹性能量密度增量显著大于工作面2回采期间,竖直应力增量分别为23.83 MPa和5.28 MPa,能量密度增量分别为233.90 kJ/m³和193.53 kJ/m³。工作面斜长及连续推进长度分别为250 m和1 260 m,两阶段工作面回采范围相同。造成煤柱变形、载荷和弹性能量密度增量显著差异的原因在于,二者回采后煤柱围岩应力环境与约束状态的不同。工作面1回采后,研究区域煤柱处于工作面1侧向残余支承压力峰值附近,此时煤柱西北侧为上一区段保护煤

柱,东南侧为工作面2实体煤,侧向约束状态较好,仍可承受较大载荷,由此煤柱压缩变形较小但载荷显著增大,同时能量积累增量明显。当工作面2推进接近研究区域时,在工作面2超前支承压力和工作面1侧向残余支承压力共同作用下,研究区域煤柱载荷达到峰值。工作面向前推进,超前支承压力影响范围前移,研究区域煤柱载荷降低;随工作面继续推进,研究区域进入工作面2采空区后,研究区域煤柱东南侧失去约束,承载能力降低,发生卸荷损伤,释放部分能量,因此煤柱载荷及弹性能量密度增长幅度低于工作面1回采期间,变形量却高于工作面1回采期间。

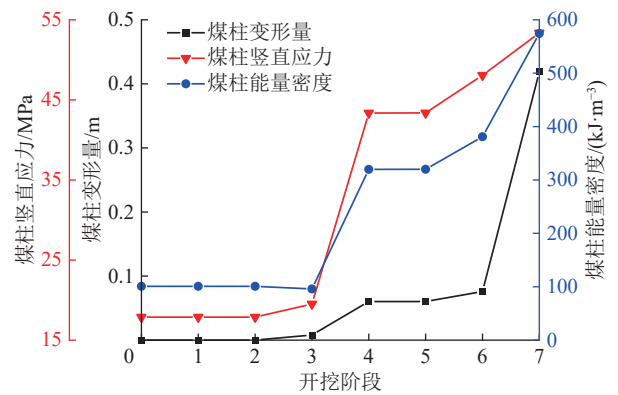


图5 随采掘作业研究区域煤柱响应规律

Fig.5 Study on evolution law of regional coal pillar compression deformation with mining operation

观察图5发现,煤柱弹性能量密度在开挖阶段3(工作面1运输巷和工作面2辅运巷双巷掘进)完成后,降低4.84 kJ/m³。该阶段作业完成后,研究区域煤柱单侧邻空,煤柱浅部发生局部卸荷损伤,释放少量积累弹性能量,但深部煤体仍具很强承载能力,因此,弹性能量密度仅发生轻微降低。

由图5可知,自开挖阶段3(工作面1运输巷和工作面2辅运巷双巷掘进)始,煤柱对采掘作业剧烈响应。为进一步细化煤柱对采掘作业,尤其在推进方向上的响应规律,将开挖阶段3~7的每一开挖阶段分17步开挖,并在每一步计算平衡后,提取煤柱变形、载荷及弹性能量密度,分析随采掘作业煤柱力学响应,如图6所示。

与工作面布置方向相似,推进方向上,当采掘作业面位于研究区域煤柱附近时,煤柱响应剧烈;同样,工作面回采较巷道掘进对煤柱变形、载荷及能量演化影响程度更大且范围更广。研究区域煤柱变形、载荷及弹性能量积累随巷道掘进逐渐增加,且巷道掘进工作面距研究区域5 m开始对研究区域煤柱显

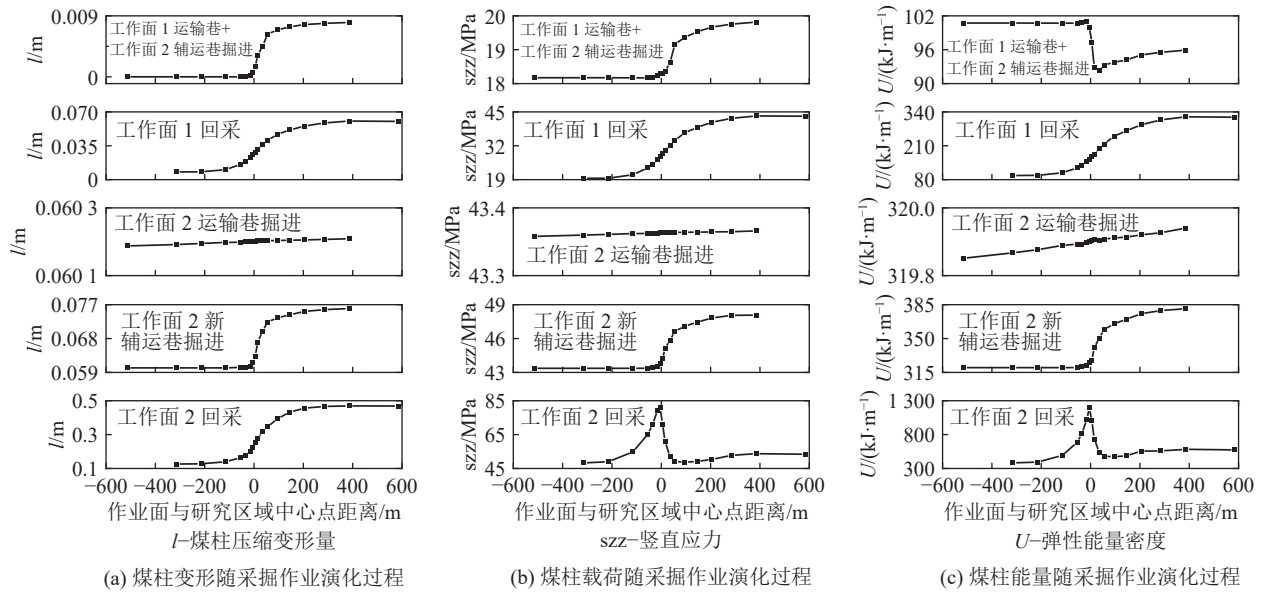


图6 随采掘作业煤柱响应过程
Fig.6 Response of coal pillar with mining

著影响,持续 60 ~ 100 m,随掘进工作面远离,巷道变形趋于稳定,煤柱对掘进响应逐渐缓和。但工作面 1 运输巷和工作面 2 辅运巷双巷掘进期间(阶段 3)煤柱弹性能量积累演化过程并非如此,当掘进作业面临近研究区域时,煤柱载荷增大,弹性能量积累,当巷道掘出后,煤柱一侧邻空,致使煤柱浅部发生卸荷损伤,释放少量能量,解释了图 5 中开挖阶段 3 完成后,弹性能量积累量轻微降低的现象。

工作面回采对煤柱影响更剧烈且范围更广,当工作面 1 回采期间,自超前 55 m 至采后 285 m 范围,回采作业均对研究区域煤柱具有显著影响。工作面 2 回采期间,煤柱载荷和弹性能量积累随工作面推进经历增长—骤降—平稳 3 个阶段。当工作面靠近研究区域时,由于工作面尚未揭露煤柱时,在侧向约束作用下,煤柱具有较高承载能力。在本工作面超前支承压力与上一工作面侧向残余支撑压力共同作用下,煤柱载荷快速升高。工作面继续推进,研究区域进入采空区后,煤柱失去侧向约束,发生卸荷损伤,承载能力骤降,伴随弹性能量的快速释放。

3 局部矿井刚度随采掘作业演化及诱冲机理

3.1 局部矿井刚度随采掘作业演化过程

参照文献 [26,31] 提供方法,在开挖步完成后,提取平衡状态下煤柱载荷 f_1 及此时顶、底板相对距离 d_1 ,调用该模型,开挖煤柱计算至平衡,记录此时顶、底板相对距离 d_2 ,按照式 (1) 计算研究区域 LMS 随开挖演化过程,如图 7 所示。为消除煤柱尺寸的影响,LMS 及煤柱峰后刚度均以研究区域中单位宽度

煤柱作为比较对象。

$$LMS = \frac{f_1}{d_2 - d_1} \quad (1)$$

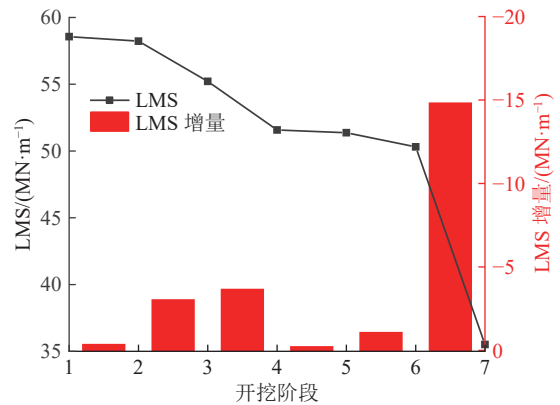


图7 LMS 随采掘作业演化过程
Fig.7 Evolution process of local mine stiffness (LMS) with mining operation

由图 7 可知,研究区域 LMS 随着采掘作业呈降低趋势。对比巷道掘进与工作面回采期间 LMS 降低幅度,掘巷期间 LMS 降幅分别为 0.34、3.01、0.20、1.06 MN/m;而工作面回采导致 LMS 降幅分别为 3.64、14.80 MN/m。巷道掘进采出空间显著小于工作面回采,导致巷道掘进引起 LMS 降低幅度显著低于工作面回采期间。

工作面 1 辅运巷、工作面 2 运输巷掘进(开挖阶段 2 和 5),由于开挖空间较小,且距离研究区域较远,LMS 虽呈降低趋势,但降低幅度很小。工作面 2 新辅运巷掘进期间(开挖阶段 6),虽然紧邻研究区域,

但由于采出空间较小, LMS 降低幅度仍然较小, 但高于阶段 2 和 5。工作面 1 运输巷和工作面 2 辅运巷双巷同时掘进期间 (开挖阶段 3), 由于工作面 2 辅运巷毗邻研究区域, 且巷道掘出后研究区域煤柱单侧邻空, LMS 出现较明显降低。在工作面布置方向上, 研究区域煤柱距离工作面 1 采空区 40 m, 处于工作面 1 采空区侧向残余支承压力影响范围; 且由于采出空间足够大, 煤柱载荷及变形显著, 如图 5 所示, 因此, LMS 出现较明显降低。工作面 2 紧邻研究区域, 且大空间回采导致煤柱载荷显著增加; 同时, 工作面 2 回采致使研究区域处于两侧邻空状态, 完全失去侧向约束, LMS 产生剧烈降低。

自工作面 1 运输巷和工作面 2 辅运巷双巷同时掘进 (开挖阶段 3) 开始, LMS 出现较明显降低。为进一步细化工作面推进方向上采掘作业对 LMS 演化影响, 开挖阶段 3~7 的每一开挖阶段分 17 步开挖, 计算每一开挖步研究区域 LMS, 如图 8 所示。

每一开挖阶段内, 随采掘作业推进, LMS 虽有轻微波动, 但整体呈下降趋势, 且当采掘作业空间位于研究区域附近时, LMS 降低速率较快。对比工作面回采和巷道掘进过程 LMS 演化规律发现, 巷道掘进引起研究区域 LMS 快速降低发生在掘进工作面靠近研究区域时; 而工作面回采时, LMS 快速降低响应更早, 且响应范围更广。以工作面 1 运输巷和工作面 2 辅运巷双巷掘进与工作面 2 回采对比为例说明, 2 个阶段均毗邻研究区域。双巷掘进期间, 当掘进工作面距离研究区域中心 35 m 时, LMS 开始快速降低; 当掘进工作面揭露研究区域后, LMS 降低速率趋于平缓, 期间单位掘进进尺最大降幅为 0.085 MN/m。而工作面 2 回采期间, 当工作面距离研究区域中心 55 m 时, LMS 开始显著降低; 当研究区域进入采空区 55 m 时仍保持较高降低速率, 期间单位回采进尺最大降幅为 0.545 MN/m。从 LMS 显著响应范围角度分析, 工作面回采是巷道掘进的 3.67 倍; 从单位采掘进尺 LMS 最大降幅角度分析, 工作面回采是巷道掘进的 6.41 倍。当研究区域煤柱进入工作面超前支承压力影响范围, LMS 即开始显著降低, 其原因在于工作面推进采出空间大, 应力集中明显, 超前支承压力高, 且影响范围较远; 工作面煤体采出后导致研究区域煤柱彻底丧失侧向约束, 抗变形能力降低, 因此当研究区域煤柱进入采空区一定距离范围内, LMS 仍显著降低。

3.2 LMS 降低诱发冲击地压机理

微震系统定位震源位置与工作面 2 相距 58 m, 震源能量 4.0×10^6 J。由图 8 可知, 当工作面距离研

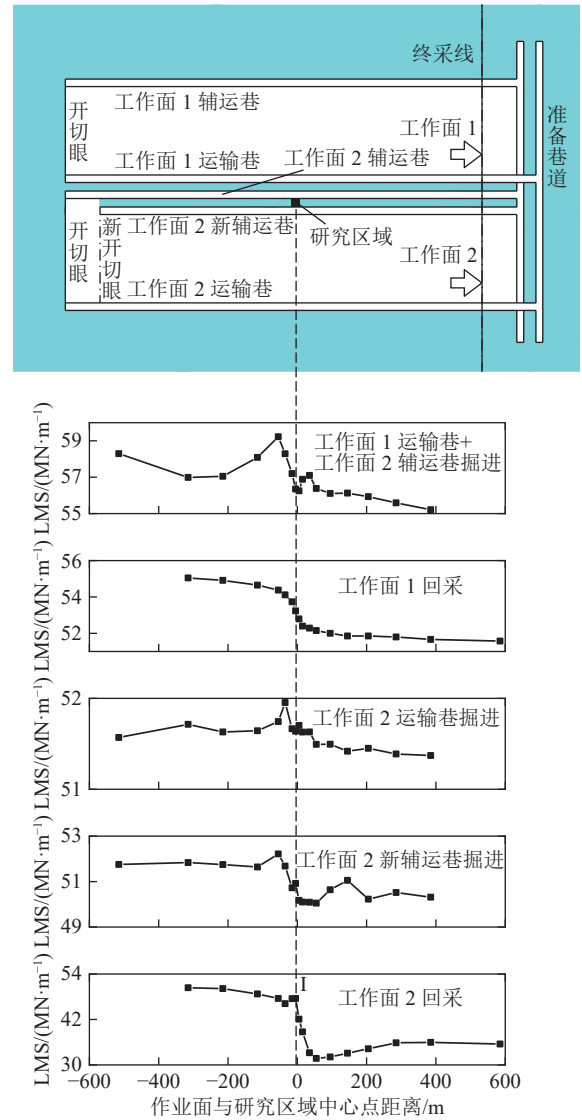


图 8 每一开挖阶段内 LMS 随采掘作业演化过程
Fig.8 Evolution process of local mine stiffness (LMS) with mining operation in each excavation stage

究区域煤柱中心点 55 m 时, 研究区域 LMS 骤降至最低值, 为 31.73 MN/m, 与现场实测微震定位相吻合。

对比分析 LMS 演化过程与现场实测地音及微震信息, 探究 LMS 随采掘作业演化与煤柱冲击失稳对应关系, 如图 9 所示。随工作面推进地音和微震能量演化趋势相近, 工作面推进 108.8 m 前, 地音和微震能量呈现周期性波动。相邻波峰间距约 30 m, 由此可判断工作面周期来压步距为 30 m 左右。工作面推进超过 110 m 后地音能量持续处于较高水平, 在工作面推进至 136.6 m 时再次出现波峰, 结合周期来压步距, 认为此时顶板发生周期性垮落。微震能量同时出现极值, 可进一步佐证工作面推进至 136.6 m 时顶板周期性断裂。当工作面推进至 147.2 m 时地音及微震能量达到最大值, 分析地音及微震数据可

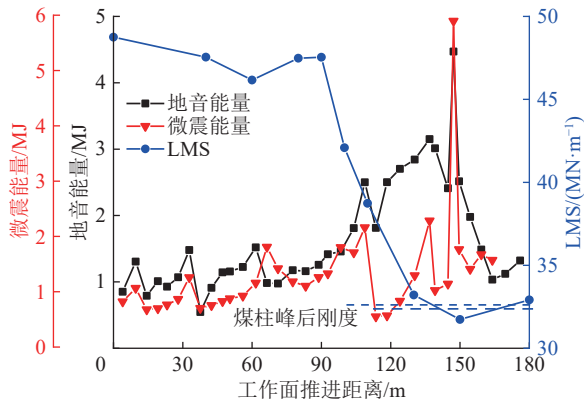


图 9 LMS 演化与现场地音及微震信息对比分析

Fig.9 Comparative analysis of local mine stiffness (LMS) evolution and field geophonic and microseismic information

知,此时顶板相对稳定,冲击事件并非顶板断裂动载所致。而后地音及微震能量突降,再次进入平静期。

当工作面推进距离小于 110 m 时, LMS 随工作面推进而降低,但幅度极小。工作面推进至 110 m 后, LMS 迅速降低,此阶段地音能量处于较高水平,表明煤柱内部小尺度微破裂持续产生;同时,微震事件能量较低,表明较大尺度的岩层断裂失稳破坏尚未发生。当工作面推进至 147.2 m 时, LMS 降低至最低点,地音与微震能量激增到最大值,现场发生冲击事件。对比随工作面推进 LMS 演化与现场地音及微震信息,当工作面距离研究区域较远时, LMS 处于较高水平,地音和微震能量在较低量级周期性波动;当工作面靠近研究区域时, LMS 迅速降低,地音能量处于较高水平;当 LMS 降低至最小值时,地音和微震能量激增至最大值,现场发生冲击,三者良好的对应关系表明煤层回采导致 LMS 降低对冲击地压发生具有直接影响。

当外部载荷超过煤柱承载能力时,煤柱发生破坏,但二者相对关系仅能决定煤柱是否发生破坏,但煤柱破坏模式并不确定。刚度理论认为当煤柱峰后刚度(曲线 AF 斜率)小于负载系统(曲线 AB 斜率)刚度时,煤柱破坏所消耗能量(AFED)大于负载系统所释放能量(ABED),此时煤柱发生稳定破坏,如图 10a 所示;当煤柱峰后刚度(曲线 AF 斜率)大于负载系统(曲线 AB 斜率)刚度时,煤柱破坏所消耗能量(AFED)小于负载系统所释放能量(ABED),剩余能量转化为破碎煤体动能,此时煤柱发生冲击破坏,如图 10b 所示。局部矿井刚度理论可看做刚度理论的具化,并给出矿井任一位置负载刚度随采掘作业演化过程的计算方法。

局部矿井刚度理论关注负载系统刚度(即局部

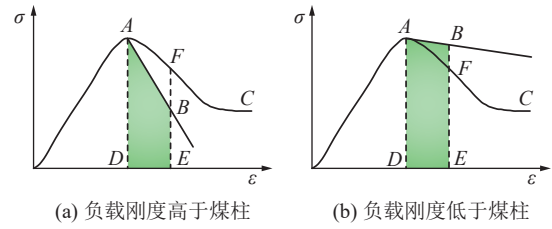


图 10 煤柱破坏模式与负载刚度间关系

Fig.10 Relationship between failure mode and stiffness of loading system

矿井刚度)与煤柱峰后刚度间相对关系,4.1 节分析了局部矿井刚度随采掘演化过程。但煤柱峰后刚度现场实测难度较大, ZIPF^[34] 根据已公开数据总结煤柱峰后刚度经验公式,如式(2),

$$k'_p = 1750 + 437 \frac{w}{h} \quad (2)$$

式中, k'_p 为煤柱峰后刚度, MN/m; w 为煤柱宽度, m; h 为煤柱高度, m。现场实测冲击位置煤层厚度为 4.8 m^[35], 如 4.1 节所述, 消除煤柱宽度影响, 计算单位宽度煤柱峰后刚度 k_p 为

$$k_p = \frac{k'_p}{w} = \frac{(-1750 + 437 \frac{w}{h})}{w} = (-1750 + 437 \times \frac{30}{4.8}) \div 30 = 32.71 \text{ MN/m} \quad (3)$$

当煤柱所处区域局部矿井刚度(31.73 MN/m)低于煤柱峰后刚度(32.71 MN/m)时, 围岩系统积累能量大于煤柱破坏所消耗能量, 煤柱破坏时剩余能量以动能形式释放, 即发生冲击破坏。

为进一步分析采掘作业致使 LMS 降低诱发煤柱冲击地压机理, 将围岩系统弹性能量密度与 LMS 随工作面推进演化过程进行对比分析, 如图 11 所示。

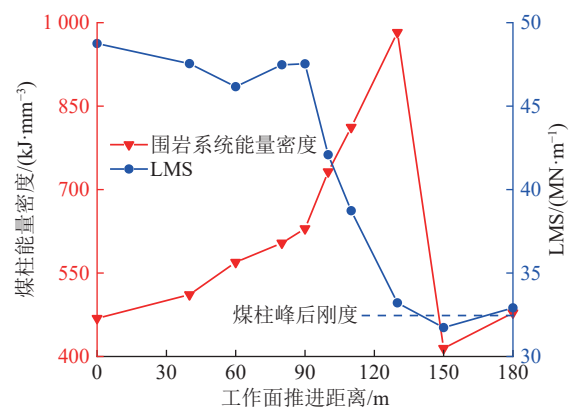


图 11 局部矿井刚度降低诱冲机理

Fig.11 Mechanism of coal burst due to reduction of local mine stiffness(LMS)

当采掘空间较远时，采掘作业对围岩影响较小，LMS 在较高水平波动式降低，围岩系统能量积累较慢。随工作面推进，煤柱进入工作面超前支承压力影响范围，在本工作面超前支撑压力和上一工作面侧支承压力共同作用下，围岩载荷快速升高，并发生压缩变形，伴随 LMS 明显降低，围岩系统快速积累弹性能量。当外载荷超过煤柱极限承载能力后，煤柱发生破坏，积累于围岩系统中能量得以释放。图 11 中工作面推进 150 m 时，LMS 低于煤柱峰后刚度，围岩系统中积累能量超过煤柱破坏所消耗能量，剩余能量转化为煤体弹射动能，致使煤柱发生冲击破坏。

4 局部矿井刚度理论的防冲应用

笔者团队^[31-33]采用相似模拟及数值模拟等方法，并结合现场实测数据发现，局部矿井刚度随研究区域附近采出空间增大整体呈降低趋势，且较难控制。考虑到负载系统刚度（即局部矿井刚度）与煤柱峰后刚度间相对关系决定煤柱破坏模式，因此，可通过采取相应技术措施降低煤柱峰后刚度以实现防冲目的^[36]。

4.1 基于局部矿井刚度理论的煤柱防冲方案

基于笔者以往研究发现，可从弱化煤体基质力学性质、增加煤体结构弱面等角度降低煤柱峰后刚度^[35]。因此，注水软化煤体、深孔爆破松散煤体、大直径钻孔增加煤体孔隙度及水力压裂等技术手段在煤矿防冲中得到广泛应用。

针对该矿井生产状况，在工作面超前巷道两帮施工大直径钻孔，弱化煤体力学性质，改善峰后变形特征，降低其峰后刚度，使其低于所处位置局部矿井刚度，以降低煤柱冲击危险性，施工位置及参数如图 12 所示。

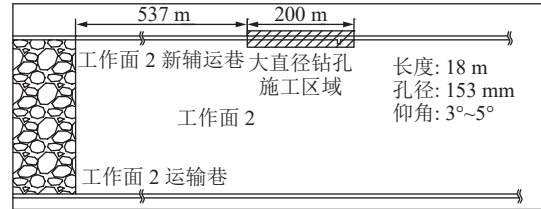


图 12 大直径钻孔施工位置及参数

Fig.12 Construction area and parameters of large diameter drilling

4.2 防冲效果验证

对比钻孔前后施工区域微震活动及煤帮钻屑量，以验证大直径钻孔破坏煤体后的防冲效果。选取钻孔施工前及完成后第 1 周、第 3 周和第 5 周的微震事件分布状况进行对比分析，如图 13 所示。

对比图 13a 与图 13b—图 13d 可知，研究区域施工大直径钻孔前，该区域微震事件频次高、能量大。施工前 1 周内共捕捉到微震事件 121 次，其中大能量事件 ($>10^5$ J) 2 次，最大能量为 4.2×10^6 J。大直径钻孔施工后，该区域微震事件频次和能量均明显降低。施工后连续监测 6 周，仅监测到微震事件 42 次，

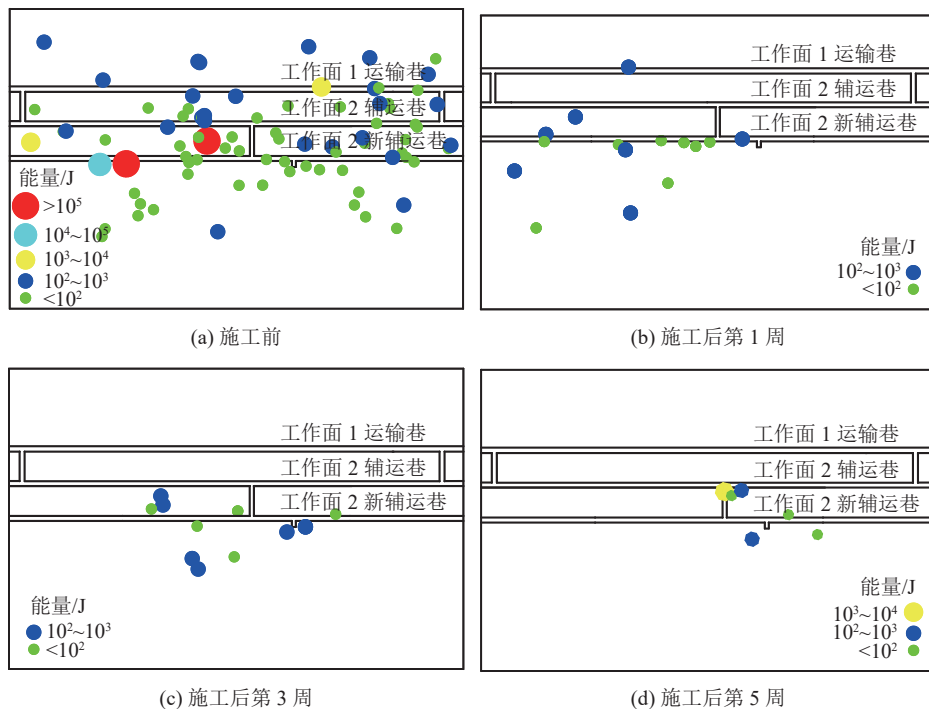


图 13 大直径钻孔施工前后微震事件分布状况

Fig.13 Distribution of microseismic events before and after large diameter drilling

且以小能量事件 ($<1\ 000\ \text{J}$) 为主, 最大能量仅为 $4.18 \times 10^3\ \text{J}$, 显著低于大直径钻孔施工前微震事件能量。

大直径钻孔完成施工后, 该区域的微震事件主要分布在施工区域的煤柱内, 高能量微震事件的分布尤为明显。在时间上, 钻孔施工后的前4周微震事件零星出现, 且能量较低, 说明该段时间施工区域的煤体发生局部破坏, 应力重新分布, 弹性能量得到了释放。而在施工第5周后, 该卸压区域几乎再无微震事件出现, 表明经过大直径钻孔破坏的煤体, 其力学性质显著降低, 经过4周的应力重新分布调整, 煤体应力及能量分布基本达到了稳定状态, 煤体发生冲击的可能性降低。施工后6周该区域微震能量及频次曲线如图14所示。

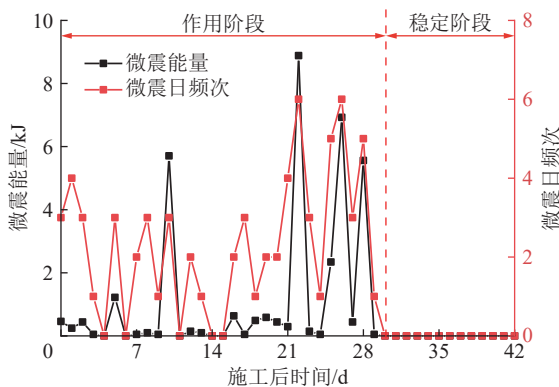


图14 大直径钻孔破坏煤体区域微震能量频次变化曲线
Fig.14 Microseismic energy and frequency in coal area damaged by large diameter borehole

由图13可知, 在大直径钻孔施工作业后的前4周内微震能量及日频次处于波动状态, 为该措施发挥作用的过程, 当该过程结束(第5周)后, 微震能量及日频次均处于极低水平, 煤体再次达到稳定状态。

与图3c未施工大直径钻孔时微震能量及频次对比可知, 从微震能量角度分析, 未施工大直径钻孔时, 微震能量均处于 $10^4\ \text{J}$ 以上; 大直径钻孔施工后, 最大微震能量仅为 $8.9 \times 10^3\ \text{J}$ 。从微震频次角度分析, 未施工大直径钻孔时, 微震频次均高于10次/班; 大直径钻孔施工后, 最高频次仅为6次/日。微震能量及频次均显著降低, 充分说明大直径钻孔破坏该区域煤体, 降低其力学参数, 有效降低冲击地压发生可能性及发生的破坏性。

从刚度角度出发, 解释应变型冲击发生机理, 提出针对性防治建议, 并验证该方法防冲效果。但冲击地压发生机理复杂, 煤矿生产过程中诱冲因素多样, 该工作面在连续推进1 km后再次发生动静载组

合加载型冲击显现。正说明只有厘清各类冲击地压发生机理, 才可针对性地制定防冲方案, 冲击地压机理研究是根本性的。

5 结 论

1) 煤柱变形、载荷及弹性能量积累随采掘作业呈增长趋势, 工作面回采过程煤柱响应早于巷道掘进期间, 且幅度更大。巷道掘进揭露煤柱后, 煤柱变形、载荷及弹性能量积累才发生显著变化; 而工作面回采影响范围更大, 自煤柱进入超前支撑压力影响范围开始, 煤柱变形、载荷及弹性能量积累即开始发生显著变化。

2) 随采掘作业, 局部矿井刚度(LMS)呈下降趋势, LMS演化主要受到其与作业面间距离及采出空间尺寸的影响。LMS降低幅度与其作业面距离负相关, 远场采掘作业对LMS演化影响较小, 当采掘作业揭露煤柱, 使其失去侧向约束后, 煤柱所在位置LMS迅速降低; LMS降低幅度与采出空间尺寸正相关, LMS降低对工作面回采的响应程度显著大于巷道掘进期间, 从对LMS显著响应范围角度分析, 工作面回采是巷道掘进的3.67倍; 从单位采掘进尺LMS最大降幅角度分析, 工作面回采是巷道掘进的6.41倍。

3) LMS随工作面推进而降低, 围岩系统中快速积累能量, 当外载荷超过煤柱极限承载能力且LMS降低至低于煤柱峰后刚度时, 围岩系统释放能量大于煤柱破坏消耗能量, 剩余能量转化为煤体弹射动能, 表现为煤柱发生冲击破坏。

4) 随工作面推进LMS演化与现场地音及微震数据具有良好对应关系, 可知微震信号可用于冲击预警及防治效果评价。大直径钻孔施工后, 微震能量及频次均显著降低, 表明大直径钻孔破坏该区域煤体, 降低其峰后刚度, 煤柱冲击危险性降低。

参考文献(References):

- [1] 鞠文君, 卢志国, 高富强, 等. 煤岩冲击倾向性研究进展及综合定量评价指标探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1839-1856.
JU Wenjun, LU Zhiguo, GAO Fuqiang, et al. Research progress and comprehensive quantitative evaluation index of coal rock bursting liability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1839-1856.
- [2] 康红普. 煤炭开采与岩层控制的空间尺度分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(2): 1-26.
KANG Hongpu. Spatial scale analysis on coal mining and strata control technologies[J]. Journal of Mining and Strata Control En-

- gineering, 2020, 2(2): 1–26.
- [3] 窦林名, 王永忠, 卢方舟, 等. 急倾斜特厚煤层冲击地压防治探索与总结[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(1): 84–94.
DOU Linming, WANG Yongzhong, LU Fangzhou, *et al.* Exploration and summary of prevention and control of rock burst in steeply inclined and ultra-thick coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 84–94.
- [4] 陆闯, 王元杰, 陈法兵, 等. 基于地音监测技术的多类型冲击地压前兆特征研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2023(1): 85–93.
LU Chuang, WANG Yuanjie, CHEN Fabing, *et al.* Study on the precursor characteristics of rockbursts based on acoustic emission monitoring technology[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023(1): 85–93.
- [5] 曹安业, 王常彬, 杨旭, 等. 微震定位精度影响下采场裂隙表征与冲击地压预警[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(2): 1–9.
CAO Anye, WANG Changbin, YANG Xu, *et al.* Fractures characterization in mining field considering seismic location accuracy and its application on pre-warning coal burst hazards[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(2): 1–9.
- [6] 朱小景, 潘一山, 齐庆新, 等. 矿震诱发巷道冲击地压力学机制及判别准则研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2024, 41(3): 493–503.
ZHU Xiaojing, PAN Yishan, QI Qingxin, *et al.* Study on mechanical mechanism and criterion of roadway rockburst induced by mine earthquake[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2024, 41(3): 493–503.
- [7] 潘俊锋, 闫耀东, 马宏源, 等. 一次成孔 300 mm 煤层大直径钻孔防冲效能试验[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2022(5): 1–11.
PAN Junfeng, YAN Yaodong, MA Hongyuan, *et al.* Using 300 mm diameter boreholes for coal burst prevention a case study[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2022(5): 1–11.
- [8] 齐庆新, 潘一山, 李海涛, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1567–1584.
QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, *et al.* Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1567–1584.
- [9] 王爱文, 范德威, 潘一山, 等. 基于能量计算的冲击地压巷道三级吸能支护参数确定[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(6): 72–81.
WANG Aiwen, FAN Dewei, PAN Yishan, *et al.* Determination of three-level energy absorbing support parameters in rock burst roadway based on energy calculation[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(6): 72–81.
- [10] COOK N G W. The failure of rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1965, 2(4): 389–403.
- [11] XU Y H, CAI M. Influence of strain energy released from a test machine on rock failure process[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, 55(6): 777–791.
- [12] 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.
- [13] 卢志国, 鞠文君, 高富强, 等. 基于非线性储能与释放特征的煤冲击倾向性指标[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(8): 1559–1569.
LU Zhiguo, JU Wenjun, GAO Fuqiang, *et al.* Bursting liability index of coal based on nonlinear storage and release characteristics of elastic energy[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(8): 1559–1569.
- [14] 李玉生. 冲击地压机理及其初步应用[J]. *中国矿业学院学报*, 1985, 14(3): 42–48.
LI Yusheng. Rock burst mechanism and its preliminary application[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1985, 14(3): 37–43.
- [15] 齐庆新. 层状煤岩体结构破坏的冲击矿压理论与实践研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 1996.
QI Qingxin. The theory and practice of rockburst led by structure failure of bedded coal-rock mass[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 1996.
- [16] 章梦涛. 冲击地压机理的探讨[J]. *阜新矿业学院学报*, 1985, 4(S1): 65–72.
ZHANG Mengtao. Discussion on the mechanism of coal burst[J]. *Journal of Fuxin Mining Institute*, 1985, 4(S1): 65–72.
- [17] 潘一山. 煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(8): 2091–2098.
PAN Yishan. Disturbance response instability theory of rockburst in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(8): 2091–2098.
- [18] 潘俊锋, 宁宇, 毛德兵, 等. 煤矿开采冲击地压启动理论[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(3): 586–596.
PAN Junfeng, NING Yu, MAO Debing, *et al.* Theory of rockburst start-up during coal mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(3): 586–596.
- [19] 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.
- [20] 赵红亮, 仇岩, 梁海安, 等. 地应力环境对深埋硐室岩爆特性影响的数值模拟研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2023, 5(6): 063071.
ZHAO Hongliang, QIU Yan, LIANG Hai'an, *et al.* Numerical study on the influence of in-situ stress environment on rock-burst characteristics in deep-buried chambers[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2023, 5(6): 063071.
- [21] 窦林名, 陆菜平, 牟宗龙, 等. 冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J]. *煤炭学报*, 2005, 30(6): 690–694.
DOU Linming, LU Caiping, MOU Zonglong, *et al.* Intensity weakening theory for rockburst and its application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(6): 690–694.
- [22] DOU L M, MU Z L, LI Z L, *et al.* Research progress of monitoring, forecasting, and prevention of rockburst in underground coal mining in China[J]. *International Journal of Coal Science &*

- Technology, 2014, 1(3): 278–288.
- [23] 齐庆新, 雷毅, 李宏艳, 等. 深孔断顶爆破防治冲击地压的理论与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, (S1): 3522–3527.
QIN Qingxin, LEI Yi, LI Hongyan, *et al.* Theory and application of prevention of rock burst by break-tip blast in deep hole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, (S1): 3522–3527.
- [24] 赵善坤, 齐庆新, 李云鹏, 等. 煤矿深部开采冲击地压应力控制技术理论与实践[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 626–636.
ZHAO Shankun, QI Qingxin, LI Yunpeng, *et al.* Theory and practice of rockburst stress control technology in deep coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 626–636.
- [25] PETUKHOV I M, LINKOV A M. The theory of post-failure deformations and the problem of stability in rock mechanics[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(2): 57–76.
- [26] SALAMON M D G. Stability, instability and design of pillar workings[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1970, 7(6): 613–631.
- [27] KAISER P K, CAI M. Design of rock support system under rockburst condition[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2012, 4(3): 215–227.
- [28] JAISWAL A, SHRIVASTVA B K. Stability analysis of the proposed hybrid method of partial extraction for underground coal mining[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 52: 103–111.
- [29] Jaiswal A, Shrivastva B K. Proposed hybrid method of partial extraction[J]. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 2009, 68(4): 307–311.
- [30] ADHIKARY D P, SHEN B, DUNCAN FAMA M E. A study of highwall mining panel stability[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, 39(5): 643–659.
- [31] GAO F Q, KANG H P, LOU J F, *et al.* Evolution of local mine stiffness with mining process: insight from physical and numerical modeling[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(10): 3947–3958.
- [32] 高富强, 原贵阳, 娄金福, 等. 基于局部矿井刚度理论的冲击地压试验装置研制及应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1985–1995.
GAO Fuqiang, YUAN Guiyang, LOU Jinfu, *et al.* Development and application of coal burst experiment system based on local mine stiffness theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(5): 1985–1995.
- [33] 卢志国. 基于局部矿井刚度理论的应变型冲击地压机理研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2022.
LU Zhiguo Study on strainbursts mechanism based on local mine stiffness theory[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2022.
- [34] ZIPF R K. Using a post failure stability criterion in pillar design[C]. Proceedings of the second international workshop on coal pillar mechanics and design, NIOSH IC. 1999, 9448: 181–192.
- [35] 陆闯. 红庆河煤矿冲击地压地音前兆信息识别及预警模型研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2019.
LU Chuang Study on precursor information recognition and warning model of rock burst earth-sound in hongqinghe coal mine[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2019.
- [36] LU Z G, JU W J, GAO F Q, *et al.* Numerical analysis on the factors affecting post-peak characteristics of coal under uniaxial compression[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2024, 11(1): 2.