



厚硬顶板刀把形采空区下综放工作面冲击地压机制研究

钟涛平 李振雷 杨伟 赵志鹏 宋大钊 李红平 周超

引用本文：

钟涛平, 李振雷, 杨伟, 等. 厚硬顶板刀把形采空区下综放工作面冲击地压机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 29–39.
ZHONG Taoping, LI Zhenlei, YANG Wei. Mechanism of rock burst induced within the fully mechanized top coal caving face with overlying knife-shape-like gob and hard thick roof[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 29–39.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2023-1224>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

坚硬顶板工作面高静载型冲击地压防治研究

Research on rock burst prevention of high static coal seam in hard roof working face

煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9573fe5f-2b1d-4d89-b04d-05b9ea0e5ee8>

冲击地压矿井近距离特厚煤层综放工作面合理推进速度研究

Study on reasonable advancing speed of fully-mechanized top-coal caving face in mining contiguous extra-thick coal seams in rockburst mine

煤炭科学技术. 2023, 51(7): 287–297 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0729>

多层坚硬顶板特厚煤层综放工作面小煤柱护巷技术

Small coal pillar technology in fully-mechanized top-coal caving face of multi layer hard roof and extra thick coal seam

煤炭科学技术. 2024, 52(3): 13–23 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0599>

急倾斜煤层综放工作面冲击危险性评价研究

Study on rock burst risk assessment of fully-mechanized top coal caving mining face in steep coal seam

煤炭科学技术. 2019(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c5a182a4-6aa4-40f7-8019-08596b8827ca>

综放工作面顶板灾害类型和发生机制及防治技术

Types, occurrence mechanisms and prevention techniques of roof disasters in fully-mechanized top coal caving face

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 44–57 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1634>

采动巷道侧向高低位厚硬顶板破断模式试验研究

Experimental study on fracture mode of lateral high and low thick and hard roof in mining roadway

煤炭科学技术. 2021, 49(4): 111–120 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.014>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

钟涛平, 李振雷, 杨伟, 等. 厚硬顶板刀把形采空区下综放工作面冲击地压机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 29–39.

ZHONG Taoping, LI Zhenlei, YANG Wei, et al. Mechanism of rock burst induced within the fully mechanized top coal caving face with overlying knife-shape-like gob and hard thick roof[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 29–39.

坚硬顶板刀把形采空区下综放工作面冲击地压机制研究

钟涛平¹, 李振雷¹, 杨伟², 赵志鹏², 宋大钊¹, 李红平², 周超¹

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 国能新疆宽沟矿业有限责任公司, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 不规则的开采空间结构可增大煤矿冲击地压危险, 研究多煤层复杂开采空间结构下工作面冲击机制对煤炭资源安全采出具有重要意义。综合采用理论分析、数值模拟、现场监测等方法, 研究了某矿井 W1123 综放工作面的动静载分布特征, 分析了冲击显现机制, 提出了针对性的防冲措施并进行现场应用。结果表明, 上覆刀把形采空区和厚硬顶板综合作用下 W1123 工作面动静载分布具有区域性特征, 当工作面仅受到刀把形采空区的“刀柄”作用或同时受“刀柄”和“刀身”作用时, 工作面中下部和区段煤柱静载集中、动载扰动剧烈, 工作面回风巷围岩也存在动静载集中, 且距离刀把形采空边界越近则围岩动静载越高; 仅受“刀身”作用时, 工作面回风巷围岩静载集中受动载扰动。工作面静载集中区和动载扰动区重合, 动静载叠加造成冲击显现。依据刀把形采空区结构特征, W1123 工作面回采期间冲击类型依次为强动载型、高静载强动载型、高静载型。数值模拟和现场监测揭示的冲击危险区与理论分析结果一致。针对 W1123 工作面静动载分布特征, 优化设计了冲击地压防治措施, 增大了厚硬顶板处理高度和破碎程度、增加了工作面运输巷煤体爆破和煤柱切顶以降低顶板和煤体应力和能量集中; 优化措施实施后, 工作面微震事件日均能量总体下降 54%, 大能量事件大幅减少, 冲击地压危险显著降低。该研究结果可为相似条件矿井的冲击地压防治提供借鉴。

关键词: 冲击地压; 刀把形采空区; 综放工作面; 静载分布; 动载扰动; 厚硬顶板

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)06-0029-11

Mechanism of rock burst induced within the fully mechanized top coal caving face with overlying knife-shape-like gob and hard thick roof

ZHONG Taoping¹, LI Zhenlei¹, YANG Wei², ZHAO Zhipeng², SONG Dazhao¹, LI Hongping², ZHOU Chao¹

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. CHN Energy Xinjiang Kuangou Mining Co., Ltd., Changji 831100, China)

Abstract: Irregular upper gob structures may increase the risk of rock burst incidents in coal mines. Investigating the rock burst mechanism in the complex mining spatial structure of multi-seam rock bursts is essential for ensuring the safe extraction of coal resources. This study investigated the distribution characteristics of static and dynamic loads on the W1123 working face through a comprehensive approach utilizing theoretical analysis, numerical simulation, and on-site monitoring. The mechanism of rock bursts was analyzed and targeted preventive measures were proposed and applied on-site. The results indicated that the coupled effects of the overlying knife-shape-like gob and thick hard roofs exhibited regional characteristics in the distribution of static and dynamic loads beneath the W1123 working face. When the working face was solely influenced by the “handle” effect of the knife-shape-like gob or concurrently affected by both the “handle” and “blade body”, the lower part of the working face and the coal pillar experienced concentrated static loads and intense dynamic load disturbances. The surrounding rock in the upper gob also demonstrated concentrated static and dynamic loads, with the proximity to the boundary of the knife-shape-like gob resulting in higher dynamic and static loads. When only affected by the “blade body”, the upper surrounding rock of the working face experienced concentrated static loads and was disturbed by dynamic loads. The area of concentrated static loads

收稿日期: 2023-08-28 责任编辑: 常琛 DOI: 10.12438/cst.2023-1224

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374180)

作者简介: 钟涛平(1996—), 男, 江西抚州人, 博士研究生。E-mail: d202110069@xs.ustb.edu.cn

通讯作者: 李振雷(1988—), 男, 山东菏泽人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: lizhenlei@ustb.edu.cn

and dynamic load disturbances in the working face coincided, leading to the manifestation of rock burst from the superposition of dynamic and static loads. Based on the structural characteristics of the knife-shape-like gob, the rock burst types during the mining period of the W1123 working face were sequentially classified as strong dynamic load type, high static load, strong dynamic load type, and high static load type. The risk of rock bursts assessed through on-site monitoring and numerical simulation matched the theoretical analysis outcomes. Rock burst prevention measures were optimized based on the distribution characteristics of static and dynamic loads on the W1123 working face. To mitigate the stress and energy concentration on the roof and coal body, we have enhanced the treatment height and crushing degree of the thick, hard roof while also intensifying coal body blasting and pillar cutting. Following the implementation of these optimized measures, the average event energy released by the surrounding rock of the working face decreased by 54%, and significant energy events were substantially reduced, leading to a significant reduction in the rock burst risk. This study can provide valuable insights for rock burst prevention in mines with irregular upper gobs.

Key words: rock burst; knife-shape-like gob; top coal caving face; static load distribution; dynamic load disturbance; hard thick roof

0 引言

煤炭是国家重要能源资源,其在我国经济发展中的战略地位难以动摇^[1]。冲击地压是煤矿井下开采的主要动力灾害之一,严重影响煤炭资源的开发利用^[2-5]。厚硬顶板、不科学合理的采掘布局等都会导致煤矿冲击地压危险上升、防治难度和成本增大^[6]。厚硬顶板破断容易形成强动载扰动,上覆复杂开采结构会导致下伏煤层的应力和能量分布更为集中、复杂^[7],两者综合作用会进一步增加冲击危险。国内外学者对厚硬顶板和上覆复杂开采结构的诱冲机制展开了大量研究。朱斯陶等^[8]揭示了顶板不同运动状态的矿震类型,发现强矿震形成的扰动与静载叠加会诱发冲击显现。李康^[9]研究发现上覆不均衡开采空间尤其是开开切眼会增大其下层工作面静载应力,进而增大冲击地压危险。姜福兴等^[10]研究发现保护层的遗留煤柱和坚硬顶板综合作用会增大被保护层煤层部分区域的应力集中,是诱发冲击地压的重要原因。MU等^[11-12]分析了上覆多煤层遗留煤柱复杂条件下临空巷道多源静载特征,据此揭示了近距离煤层群开采冲击机理并提出了监测预警技术。JIA等^[13]认为本煤层采空区和上煤层采空区之间会形成倒梯形的覆岩结构,该结构破断是诱发冲击地压的主要因素。瞿孝昆等^[14]研究发现上煤层采空区内触研点会传递应力并且侧向支承应力叠加作用于下煤层掘进工作面,是诱发冲击的主要原因。ZHAO等^[15]研究了某矿井各工作面的冲击显现特征,发现多煤层开采不同条件下可能存在着多种类型的冲击地压。

综上发现,上覆复杂开采结构条件下进行回采作业时,不同矿井甚至同一矿井不同区域工作面的冲击地压发生机制也不尽相同。厚硬顶板赋存条件不同、上覆采空区分布不同,工作面覆岩运动形式和应力分布特征将存在巨大差异。前人的研究可为厚

硬顶板和上覆复杂开采结构下工作面冲击地压机制研究提供参考借鉴。但因地质赋存、采掘布局等存在差异,冲击地压机制还需要结合矿井和工作面具体条件进行针对性的研究。

西部地区某多煤层开采冲击地压矿井,受上煤层刀把形采空区、坚硬厚顶板等因素影响,工作面冲击显现严重,影响井下安全生产、降低煤炭资源开采效益。笔者以该矿井为工程背景,研究坚硬厚顶板岩层组和上覆刀把形采空区影响下综放工作面冲击地压发生机制,为矿井提高安全生产效益及冲击地压防治提供理论依据。

1 工程背景

以某矿井W1123工作面为研究对象,矿井为东西翼跳采作业,工作面位于该矿一采区西翼。采区内主要含煤层自上至下依次有B4-2(已回采)、B4-1(已回采)、B3(不回采)、B2(回采中)、B1、B0共6层,如图1所示。

W1123工作面主采B2煤层,煤层走向104°~110°,倾向14°~20°,倾角为12°~14°,煤层厚度8.6~20.8 m,平均厚度9.5 m,含矸0~2层,结构简单,B2煤单轴抗压强度为26.34 MPa,具有弱冲击倾向性。B2煤层顶板以泥岩、砂质泥岩和粉砂岩为主,厚度为0.88~20.72 m,平均厚度8.19 m,单轴抗压强度为33.33 MPa,局部为中粗砂岩和细砂岩,厚度为7.23~35.00 m,平均厚度17.51 m,单轴抗压强度45.84 MPa,顶板具有强冲击倾向性。B2煤层底板以泥岩、砂质泥岩和粉砂岩为主,厚度为0.44~28.07 m,平均厚度5.76 m,单轴抗压强度为39.73 MPa,局部为中粗砂岩,厚度为6.95~24.98 m,平均厚度14.11 m,单轴抗压强度为48.23 MPa,底板具有弱冲击倾向性。B4-1煤层与B2煤层间距40~50 m;B2煤层下方为B1煤层。

W1123工作面倾向宽192 m,走向长1 469 m,综

岩层埋深/m	岩层厚度/m	岩层性质	柱状	
397.85	15.88	粗砂岩		
399.11	1.26	B4-2 煤		回采结束
406.80	7.69	砂质泥岩		
414.65	7.85	泥岩		
419.33	4.68	粗砂岩		
421.67	2.34	B4-1 煤		回采结束
422.83	1.16	粗砂岩		
424.75	1.92	B4-1 煤		
429.07	4.32	泥岩		
431.20	2.13	中砂岩		
432.50	1.30	泥岩		
446.94	14.44	粗砂岩		不回采
448.77	1.83	B3 煤		
452.00	3.23	泥岩		
467.70	15.70	细砂岩		厚硬顶板
478.25	10.55	B2 煤		回采中
479.04	0.79	泥岩		
484.41	2.37	B2 煤		
485.34	3.93	泥岩		
507.23	21.89	细沙岩		
507.90	0.67	煤		
508.50	0.60	细砂岩		
509.13	0.63	粗砂岩		
514.90	5.77	B1 煤		

图 1 W1123 工作面钻孔柱状图

Fig.1 Drilling column diagram of W1123 working face

放开采, 割煤高度 3.2 m, 放顶煤高度 6.3 m。W1123 工作面运输巷埋深约 380 m、工作面回风巷埋深约 330 m, 巷道方位角为 291°, 工作面倾向中部布置工艺巷。工作面向北下行为 W1121 采空区, W1123 工作面与 W1121 采空区之间留设有 15 m 宽的区段煤柱。W1123 工作面北侧还赋存有 B4-1 煤层的 W1143 采空区, 采空区与工作面的平距为 70 m; W1123 工作面终采线位置向西 13~745 m、工作面运输巷自南侧 120 m 处至其北侧 60 m 段为 B4-1 煤

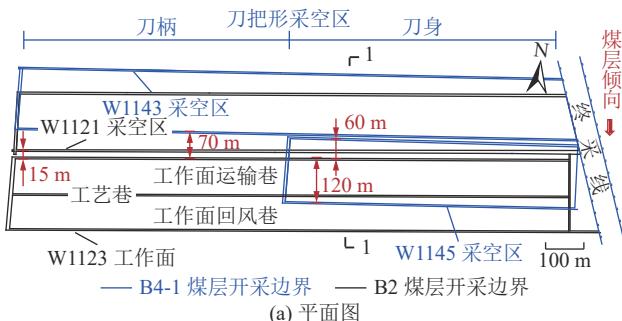


图 2 W1123 工作面布置
Fig.2 Layout of W1123 working face

层 W1145 采空区。W1143 采空区(刀柄)和 W1145 采空区(刀身)形成刀把形采空区。W1123 工作面空间结构如图 2 所示。

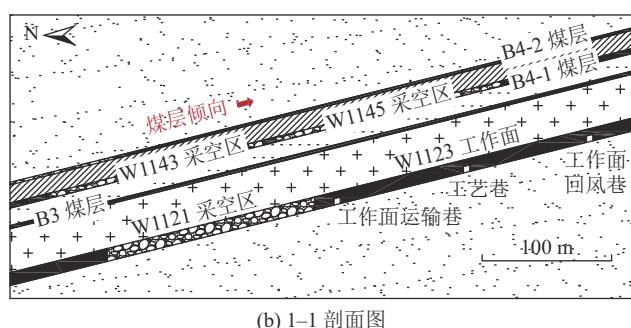
2 冲击地压机制

2.1 工作面多源静载分布

刀把形采空区形成的支承应力如图 3 所示。其中, “刀柄”处采空边界 1 形成了沿倾向分布的支承应力 K_1 , “刀身”的采空边界 2 和 3 分别形成了沿走向分布的支承应力 K_2 和沿倾向分布的支承应力 K_3 , 支承应力 K_1 和 K_2 在采空边界 1 和 2 相交处会产生叠加作用。上煤层采空区形成的支承应力会传递至下伏煤层、传递过程中支承应力会有一定程度衰减, 造成下伏煤层工作面的围岩应力集中、冲击危险增大^[16-17]。

依据刀把形采空区支承应力的影响范围, 可将 W1123 工作面依次划分为阶段一、阶段二和阶段三。阶段一为仅受到采空边界 1 支承应力 K_1 影响的区域, 阶段二为同时受采空边界 1 和 2 的支承应力 K_1 , K_2 影响的区域, 阶段三为受采空边界 3 支承应力 K_3 影响的区域。阶段一受 K_1 向下传递、衰减后的应力 σ_{j-K1} 作用, 阶段二受 K_1 和 K_2 叠加向下传递、衰减后的应力 σ_{j-K2} 作用, 阶段三受 K_3 向下传递、衰减后的应力 σ_{j-K3} 作用。此外, W1123 工作面还受到 W1121 采空区形成的侧向支承应力 σ_{j-b} 以及工作面运输巷和工作面回风巷掘进形成的集中应力 σ_{j-d1} 、 σ_{j-d2} 作用。

工作面回采过程中, 在超前支承应力 σ_{j-a} 的作用下 W1123 工作面围岩应力进一步集中。各阶段回采期间, W1123 工作面应力分布如图 4 所示, 图中红色线条所包围的区域表示应力集中区。回采阶段一时(图 4a), 刀把形采空区仅“刀柄”对工作面有影响, 多源载荷在区段煤柱和工作面中下部的叠加效果最显著; 工作面回风巷围岩距离采空区较远, 因此忽略 W1121 采空区和刀把形采空区的影响, 但在超前支



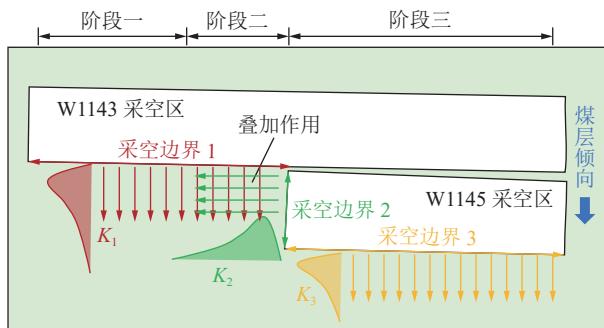
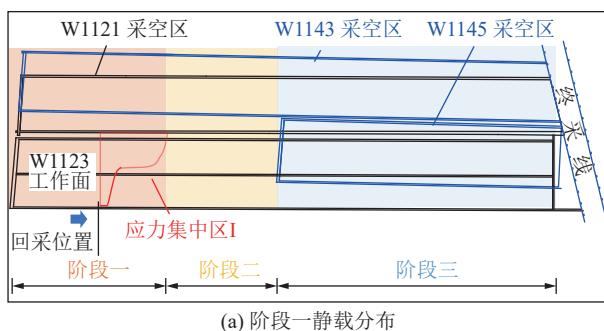


图3 刀把形采空区支承应力分布

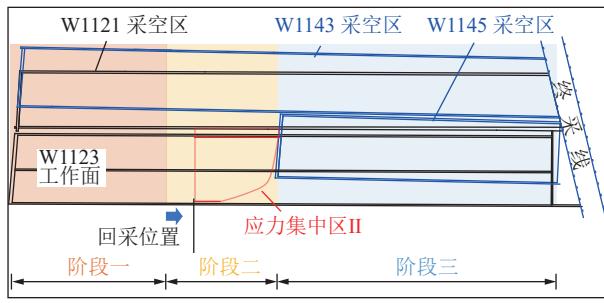
Fig.3 Distribution characteristics of concentrated stress in knife-shape-like gob structure

承应力和巷道集中应力作用下围岩应力也有一定程度集中。因此,阶段一形成了以工作面中下部区域为主的应力集中区Ⅰ,如式(1)所示。

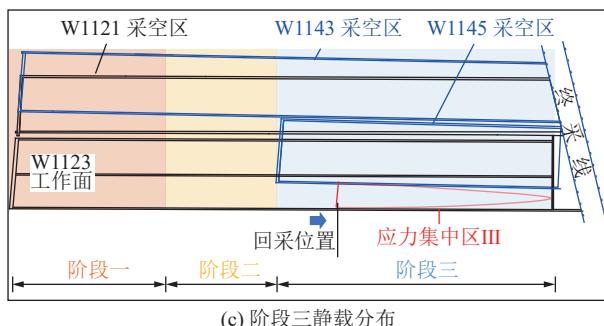
$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{j1x} = \gamma H_1 + \sigma_{j-a} + \sigma_{j-b} + \sigma_{j-K_1} + \sigma_{j-d1} \\ \sigma_{j1s} = \gamma H_2 + \sigma_{j-a} + \sigma_{j-d2} \end{array} \right. \quad (1)$$



(a) 阶段一静载分布



(b) 阶段二静载分布



(c) 阶段三静载分布

图4 工作面回采过程围岩静载分布示意

Fig.4 Distribution of static load in mining process of working face
式中, σ_{j1x} 和 σ_{j1s} 分别为阶段一工作面中下部和上部的集中应力; H_1 和 H_2 分别为工作面运输巷和工作面

回风巷埋深, $H_1 > H_2$ 。

回采阶段二时(图4b), W1123工作面围岩应力载荷来源在阶段一的基础上,刀把形采空区的“刀柄”和“刀身”同时作用于W1123工作面,进一步增大了工作面围岩静载集中程度和范围,形成了应力集中区Ⅱ,工作面多源静载的组成如式(2)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{j2x} = \gamma H_1 + \sigma_{j-a} + \sigma_{j-b} + \sigma_{j-K_2} + \sigma_{j-d1} \\ \sigma_{j2s} = \gamma H_2 + \sigma_{j-a} + \sigma_{j-K_2} + \sigma_{j-d2} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中, σ_{j2x} 和 σ_{j2s} 分别为阶段二工作面中下部和上部的集中应力。

回采阶段三时(图4c), W1123工作面中下部位与刀把形采空区下方,为被保护层,因此工作面中下部的静载集中将不明显。但是工作面上部受到刀把形采空区“刀身”作用,形成了应力集中区Ⅲ,工作面多源静载的组成如式(3)所示。 σ_{j3} 为阶段三工作面上部的集中应力。

$$\sigma_{j3} = \gamma H_2 + \sigma_{j-a} + \sigma_{j-K_3} + \sigma_{j-d2} \quad (3)$$

2.2 围岩动载分布特征

特厚煤层上覆厚硬岩层破断会释放大量的能量、形成动载扰动,采空区内悬露岩层的来压破坏是工作面主要的强动载来源^[18-20]。

类比文献[21]的研究成果,推测W1123工作面推进至W1145采空区附近时,在工作面侧向和走向方向上会形成悬顶结构N和M,如图5所示。在不考虑B4-1煤层开采的情况下,W1123工作面中下部和区段煤柱是工作面后方和侧向采空区悬臂结构的支撑,同时采空区内矿震活动形成的震动波也最先传递于工作面中下部和区段煤柱,因此工作面中下部和区段煤柱受强动载扰动。工作面上部虽距侧向采空区较远,但仍处于矿震震动波影响范围,尤其是工作面回风巷侧顶板岩层也易形成超长悬顶并发生垮落和破断,因此工作面回风巷围岩也会受强动载影响,但相对工作面中下部和区段煤柱略有降低。

考虑B4-1煤层开采影响时,上覆刀把形采空区会对W1123侧向和后方采空区悬顶结构造成影响^[22],B4煤层和B2煤层采空区导通后可导致高位岩层再运动、再失稳,进一步增大了悬顶结构破断和能量释放的剧烈程度,在刀把形采空结构作用下工作面动载扰动将更为剧烈。W1123工作面动载分布如图6所示。

回采阶段一,悬臂结构N和悬臂结构M受刀把形采空区“刀柄”的作用,覆岩运动剧烈,工作面将受到强动载扰动。回采阶段二时,悬臂结构N和悬臂结构M受到“刀柄”和“刀身”叠加作用,悬臂结构

承受载荷和积聚能量增大, 动载扰动进一步增大。回采阶段三时, 工作面中下部为被保护层, 动载扰动减弱; 工作面上部受到刀把形采空区“刀身”作用, 动载扰动比前两个阶段的工作面上部有所增大。

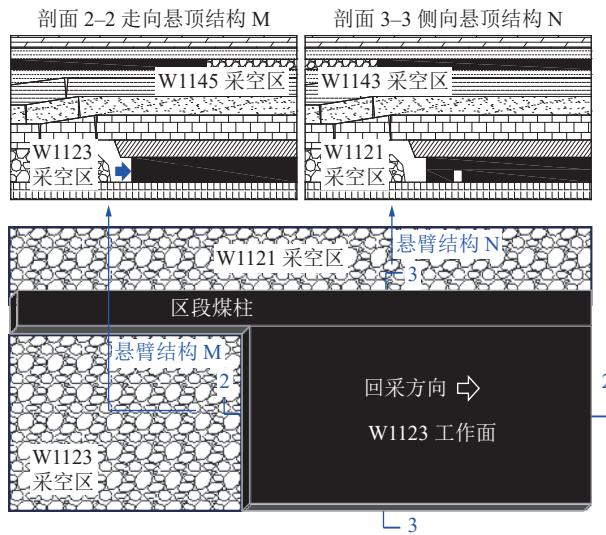


图 5 工作面顶板覆岩结构示意

Fig.5 Roof overburden structure of working face

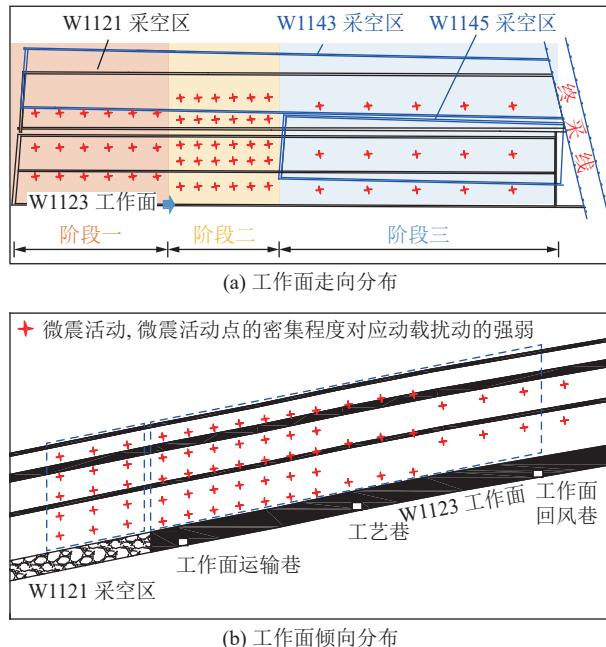


图 6 工作面围岩动载分布示意

Fig.6 Distribution of dynamic load of working face

2.3 冲击地压机制及危险区域分布

研究表明^[23], 当静载荷和动载荷叠加后形成的总载荷超过煤岩体冲击破坏的临界载荷时, 易造成工作面冲击地压显现。刀把形采空区是工作面动静载分布区域性特征的主要影响因素, W1123 工作面各回采阶段动静载叠加诱冲机制如图 7 所示。

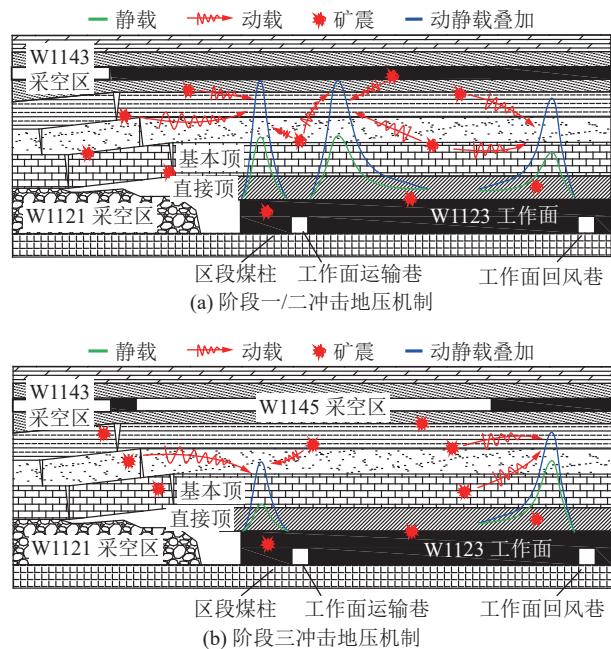


图 7 不同回采阶段工作面动静载叠加诱冲示意

Fig.7 Schematic diagram of dynamic and static load superposition induced rock burst in working face

回采阶段一时, 区段煤柱和 W1123 工作面中下部、工作面回风巷围岩为静载集中区域, 同时在刀把形采空区“刀身”作用下受到的动载扰动强度较高。集中静载与强动载叠加诱发冲击地压, 为强动载型冲击地压。回采阶段二时, W1123 工作面同时受到刀把形采空区“刀身”和“刀柄”作用, 静载集中程度和动载扰动程度进一步增大, 高静载和强动载叠加诱发冲击, 为高静载-强动载型冲击地压。回采阶段三时, W1123 工作面上部静载集中, 且距侧向采空区较远、覆岩运动产生的动载扰动降低, 因此阶段三为高静载型冲击地压。

阶段一内, W1123 工作面中下部和区段煤柱为主要的冲击危险区域, 工作面回风巷也具有一定冲击危险, 但冲击危险程度低于工作面中下部; 阶段二内, 工作面冲击危险区域分布与阶段一相似, 但是冲击危险区域的范围增大; 阶段三内, 工作面中下部和区段煤柱为被保护层无明显冲击危险, 工作面回风巷为主要的冲击危险区域。其中, 受刀把形采空区影响, 阶段二的冲击危险程度最大。

3 冲击地压机制验证

3.1 数值模拟揭示的冲击危险区

3.1.1 模型建立

依据矿井地质资料及历史采掘顺序构建三维数值模型, 模型尺寸为 1 000 m(X)×2 000 m(Y)×500 m(Z), 共 257 712 个网格、270 180 个网格节点。模型

走向和倾向各留设200~250 m的未开挖边界以降低边界效应影响,数值模型如图8所示。

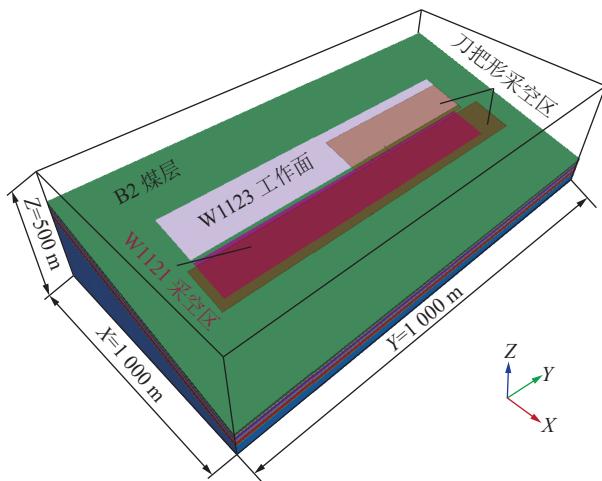


图8 数值模拟模型图

Fig.8 Numerical simulation model and working face layout

模型底部固定法向位移,顶部施加3.5 MPa等效埋深载荷;模型四周施加应力边界,Y方向施加1倍自重载荷的水平应力,X方向施加2倍自重载荷的水平应力。模型重力加速度设置为 10 m/s^2 。采用摩尔-库伦本构模型进行计算,煤岩体数值模拟参数见表1。

表1 数值模拟物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of numerical simulation

岩层	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)	抗拉强 度/MPa
粉砂岩	2 447	8.03	0.26	5.19	30.22	6.89
细砂岩	2 618	13.62	0.25	6.38	28.86	3.17
粗砂岩	2 541	10.33	0.22	6.49	29.98	4.48
B2煤层	1 703	2.47	0.35	3.00	31.00	2.21
B4-1煤层	1 316	3.52	0.31	2.50	37.49	2.210
泥质砂岩	2 546	4.48	0.32	4.00	30.41	2.426

3.1.2 围岩静载分布规律

提取W1123工作面巷道掘进前上方有无“刀身”结构(W1145采空区)时煤柱处($X=465 \text{ m}$)的应力分布曲线,如图9所示。依据刀把形采空区“刀身”结构对围岩应力的影响范围可知,距W1123工作面开切眼0~400 m范围($Y=150 \sim 550 \text{ m}$)为阶段一,400~750 m范围($Y=550 \sim 900 \text{ m}$)为阶段二,750~1 450 m范围($Y=550 \sim 900 \text{ m}$)为阶段三。

W1123工作面回采前围岩应力分布如图10所示,多源静载叠加作用下,围岩应力主要在工作面中下部和区段煤柱集中、工作面回风巷围岩存在一定

应力集中。随着工作面逐渐靠近“刀身”,应力集中程度和范围逐渐增大。在“刀身”下方的煤体处于卸压状态,卸压区以外工作面上部应力集中程度增大。数值模拟结果与理论分析结果一致。

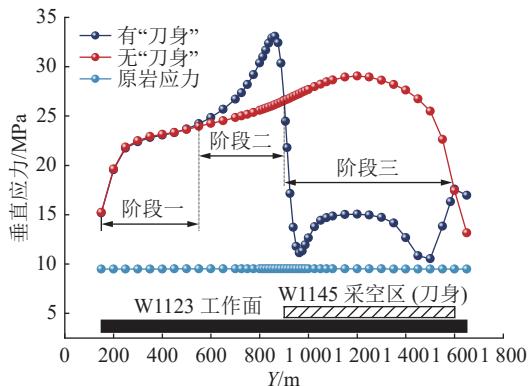


图9 W1123工作面各回采阶段范围划分依据

Fig.9 Division of each mining stage of W1123 working face

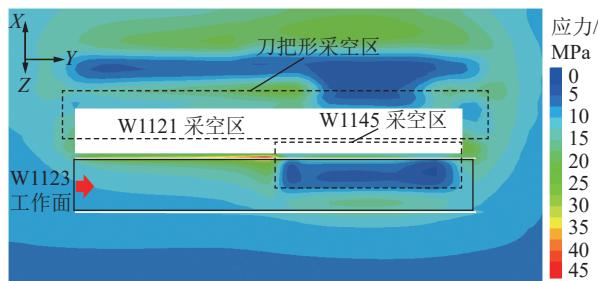


图10 W1123工作面回采前围岩应力分布

Fig.10 Stress distribution before mining in W1123

由图11a可知,回采阶段一时,工作面中下部和区段煤柱应力集中程度高且范围广,工作面上部应力集中程度和范围比工作面中下部低。回采长度为300 m时,区域I内工作面运输巷附近应力集中可达31.89 MPa(集中系数为3.31,下同),工作面回风巷附近应力集中可达14.03 MPa(1.65)。

如图11b所示,回采阶段二时,在阶段一多源载荷的基础上,刀把形采空区“刀身”也作用于W1123工作面,“刀柄”和“刀身”共同作用增大了应力集中程度和范围,工作面中下部和区段煤柱仍为主要的应力集中区,工作面回风巷围岩集中程度增大。回采长度为650 m时,区域II内工作面运输巷附近应力集中可达54.92 MPa(5.7),工作面回风巷附近应力集中可达23.12 MPa(2.67)。

如图11c所示,回采阶段三时,W1145采空区作为保护层导致W1123工作面中下部围岩应力降低,应力峰值小于16 MPa,接近原岩应力;W1123工作面回风巷为应力集中区,应力集中可达21.65 MPa(2.5)。

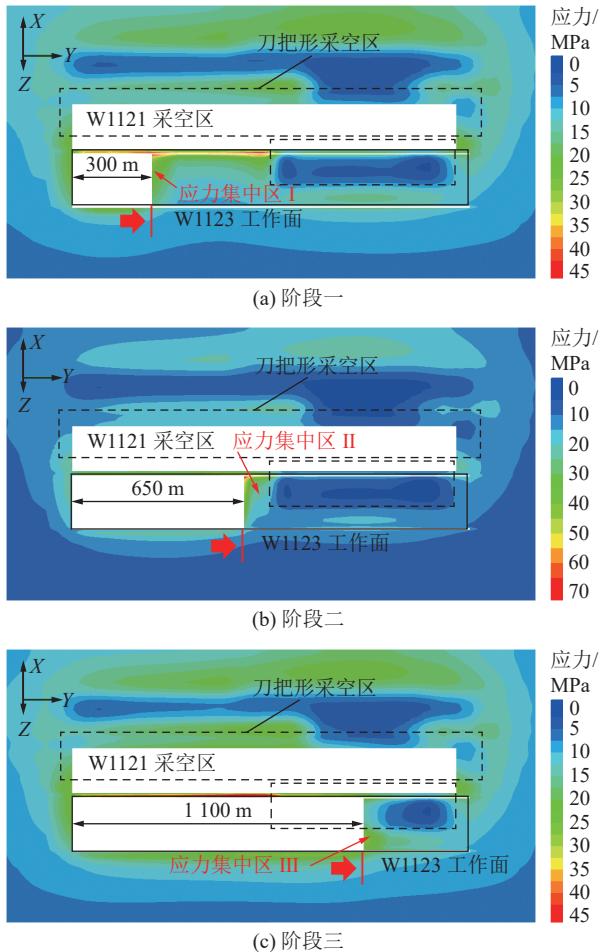


图 11 工作面回采各阶段围岩应力分布云图
Fig.11 Stress distribution at each mining stage

3.1.3 围岩弹性能分布规律

利用文献 [24] 得到的弹性能计算公式编制 Fish 程序提取围岩的弹性能, 在工作面前方 12.5 m 处设置倾向监测线, 得到各阶段工作面倾向弹性能分布, 如图 12 所示。回采阶段一时, 工作面弹性能分布由工作面运输巷至工作面回风巷整体呈线性递增, 工作面回风巷内帮弹性能约 50.3 kJ/m^3 , 工作面运输巷内帮峰值弹性能约 157.1 kJ/m^3 , 区段煤柱弹性能最大, 约 208.6 kJ/m^3 。相较于阶段一, 回采阶段二时围岩弹性能显著增大, 工作面回风巷内帮峰值 147.7 kJ/m^3 , 工作面运输巷峰值为 595.9 kJ/m^3 , 区段煤柱峰值为 418.9 kJ/m^3 , 弹性能峰值点由区段煤柱内转移至工作面运输巷内帮, 工作面回风巷围岩弹性能密度也存在较大提高。阶段三工作面围岩弹性能大幅降低, 围岩弹性能峰值约 100 kJ/m^3 。

结合 W1123 工作面围岩静载应力和弹性能分布特征可知, 工作面中下部、区段煤柱以及工作面回风巷围岩应力和弹性能高度集中, 具备冲击显现的高静载和强动载条件, 动静载叠加极易满足冲击临

界条件, 数值模拟结果与理论分析结果基本一致。从各阶段 W1123 工作面静载集中大小和能量积聚程度来看, 阶段二冲击危险最高、阶段一次之、阶段三有一定冲击危险。

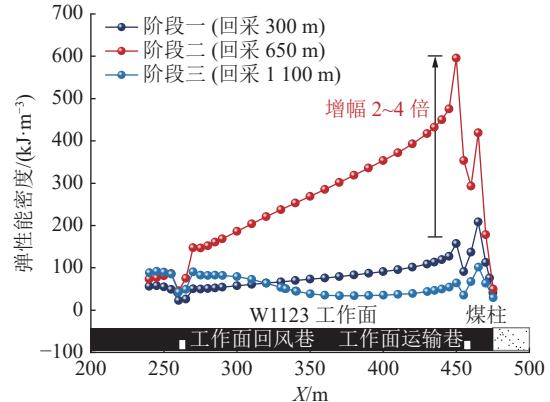


图 12 工作面前方围岩弹性能密度分布
Fig.12 Elastic energy density distribution of surrounding rock in front of working face

3.2 现场监测揭示的冲击地压风险

3.2.1 工作面支架压力数据监测分析

W1123 工作面从开采初期就通过安装在液压支架上的 11 个传感器对支架压力进行实时监测, W1123 工作面共安装 101 组液压支架, 其中传感器由工作面运输巷至工作面回风巷依次安装在 06 号, 10 号, 20 号等 11 台液压支架上。图 13 为 W1123 工作面回采阶段一时, 回采长度由 52 m 增大至 386 m 期间支架压力的分布规律, 可以看出在该阶段支架压力变化较明显, 且具有典型的区域性特征, 即工作面运输巷附近的支架压力高于工作面回风巷区域支架压力 (工作面运输巷侧压力多处于 $7500 \sim 9500 \text{ kN}$, 而工作面回风巷侧压力多处于 $5000 \sim 6500 \text{ kN}$), 整个回采阶段工作面中下部区域支架承压整体相对较高。这与前文阶段一静载分析结果较为吻合。

3.2.2 微震监测数据分析

微震事件是煤岩体通过岩体破裂等活动释放能量的一种表现形式, 围岩积聚能量越多、能量释放越剧烈、冲击危险越高, 可通过微震事件能级和空间分布评估工作面冲击危险区域和危险程度。选取 W1123 工作面阶段一时间窗为 1 个月的微震数据进行分析, 如图 14 所示。

从微震事件平面分布可知看出, 各能级微震事件主要分布在 W1123 工作面、区段煤柱和侧向采空区中。侧向采空区内出现了 1 个能量大于 10^6 J 的微震事件, 区段煤柱内也分布了 4 个能量大于 10^5 J

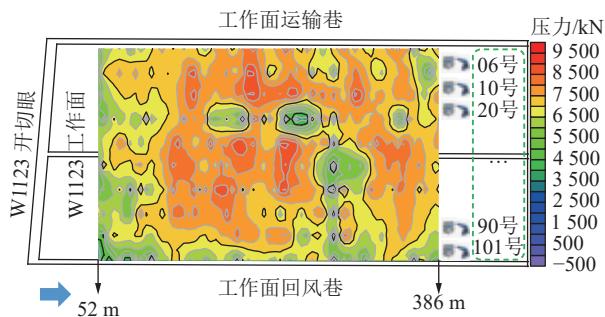


图 13 W1123 工作面支架压力分布

Fig.13 Support pressure distribution on W1123 working face

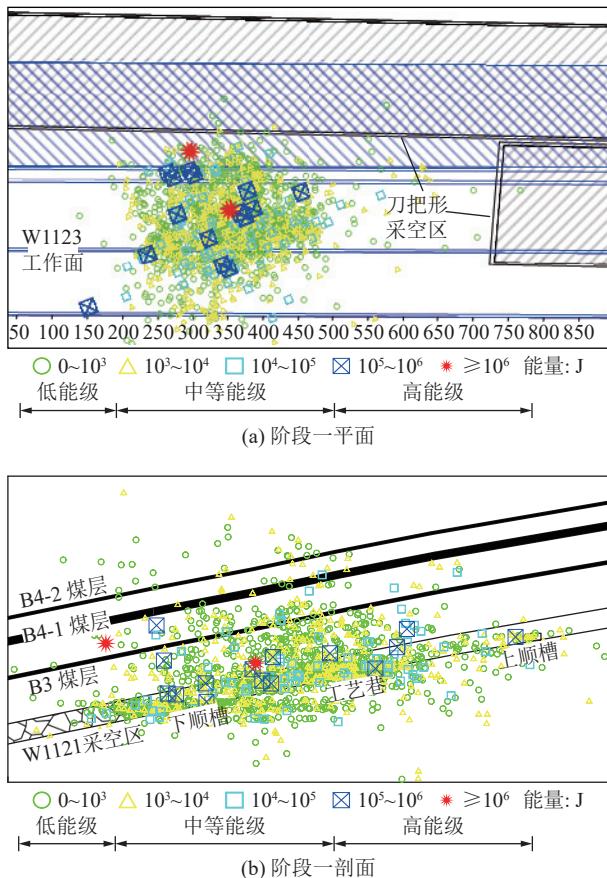


图 14 微震事件空间定位分布

Fig.14 Spatial distribution of microseismic events

微震事件,工作面回风巷侧围岩发生了1个能量大于 10^5 J微震事件,其余大能量事件主要分布在W1123工作面倾向中下部,如图14a所示。

而从微震事件的层位分布来看(图14b),从当前开采煤层(B2煤)至上一开采煤层(B4-1煤)之间的2层坚硬顶板内都有大能级微震事件分布;W1123工作面煤柱侧向上方B3煤层和B4-1煤层之间的厚硬岩层内分布了2个大能量微震事件。综合微震事件分布来看,区段煤柱和工作面中下部是主要的冲击地压危险区域;工作面回风巷围岩也具有一定的冲击危险。

4 冲击地压防治措施及效果

4.1 防冲措施优化方案

依据上述分析可知,区段煤柱、侧向采空区内顶板岩层、高品位的顶板岩层是主要的诱冲因素。阶段一回采期间工作面防冲措施如图15a所示,可知,阶段一采取的防冲措施没有对区段煤柱、工作面中下部、侧向顶板结构和高品位顶板等高静载集中区和强动载来源起到较好卸压释能效果。根据W1123工作面回采过程中动静载分布特征可知,阶段二回采期间冲击地压危险较阶段一更高。阶段一回采期间采取的防冲措施无法满足阶段二防治冲击地压的要求。

针对以上冲击影响因素,依据W1123工作面静动载分布特征对防冲措施进行优化,如图15b所示。优化后的措施增加了区段煤柱切顶措施,增加了工作面回风巷、工作面运输巷和工艺巷超前预裂爆破孔的数量,增加了工作面运输巷煤体爆破工艺,增大了顶板处理高度(处理高度覆盖上一开采煤层和本煤层间的所有厚硬顶板),以实现进一步弱化顶板岩层结构、降低煤柱和煤层围岩静载集中和动载扰动的目的。顶板超前预裂爆破孔的排距为10 m,具有较高冲击危险的区域内炮孔排距加密至5 m。上述优化措施在W1123工作面回采阶段二和阶段三时进行工程应用。

4.2 优化措施防冲效果

定义每日微震事件能量总和与频次总和的比值为日平均能量,以表征工作面每日能量释放剧烈程度。W1123工作面防冲措施优化前后的高能级微震事件时序变化和平面分布如图16和图17所示。对比可知,防冲措施优化前微震事件的日均能量处于较高水平,煤岩体能量释放剧烈,防冲措施优化后微震事件日平均能量总体下降54%。其中,依据数值模拟结果知,阶段二围岩积聚的能量为阶段一的2~4倍(图12),但优化措施实施后阶段二较阶段一日平均能量降低了28.87%;在保护层和优化措施综合作用下,阶段三日平均能量比阶段一降低了76.29%。

阶段二、阶段三微震事件的平面分布与阶段一(图14)较为相似,阶段三工作面回风巷围岩的中等能级微震事件略有增加。但阶段二和阶段三 10^3 J以上的中高能级微震事件频次整体大幅度降低。其中,阶段一大于 10^5 J能级的微震事件频次为68起、阶段二降低至5、阶段三降低至2,优化措施实施前后下降比例高达89.7%,分布密度也大幅度降低;阶段一 10^4 J能级的微震事件频次为742、阶段二降低

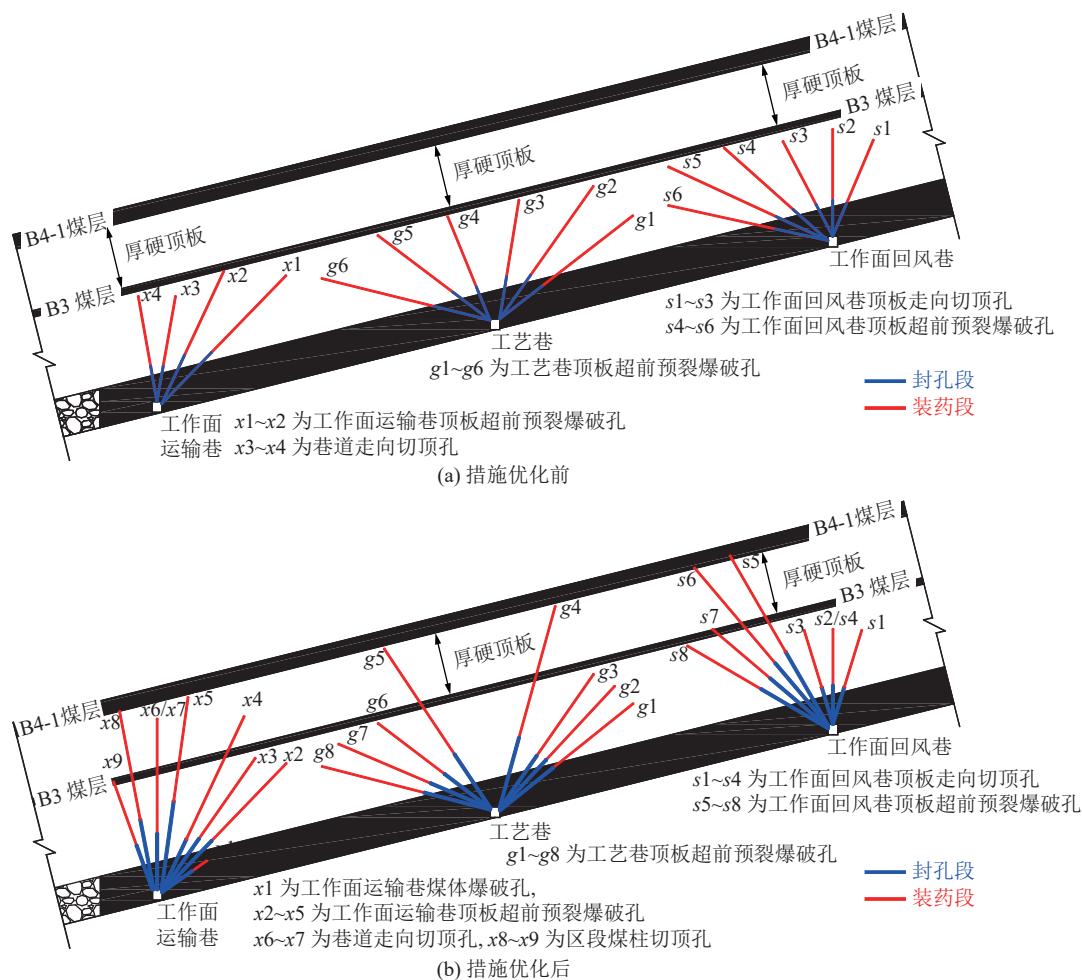


图 15 W1123 工作面冲击地压防治措施

Fig.15 Measures to prevent rock burst on W1123 working face

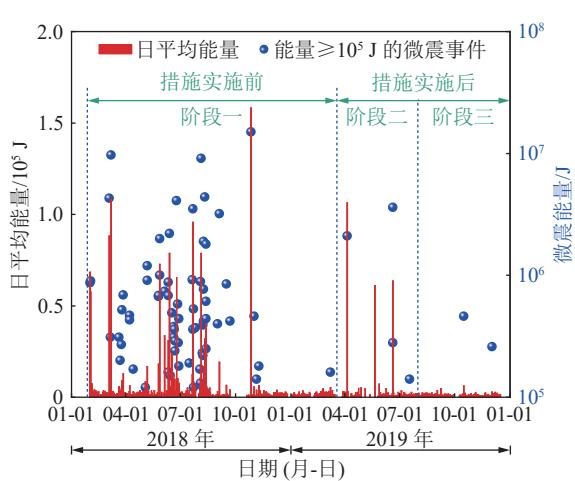


图 16 措施优化前后微震事件能量时序分布

Fig.16 Microseismic energy distribution before and after optimization of rock burs prevention measures

至 113、阶段三降低至 140，优化措施实施前后整体频次降低约 65.1%，说明区段煤柱、顶板岩层悬臂结构得到了有效破坏，围岩能量以低能级微震事件缓慢释放，冲击地压危险得到有效降低。

5 结 论

1) 研究揭示了上覆刀把形采空区和厚硬顶板岩层组作用下 W1123 工作面各回采阶段静动载叠加诱冲机制。刀把形采空区是工作面静动载分布的主要影响因素。仅受“刀柄”影响的区域(阶段一)为强动载型冲击，受“刀柄”和“刀身”影响的区域(阶段二)为高静载强动载型冲击，仅受“刀身”影响的区域(阶段三)为高静载型冲击。

2) 研究得到了 W1123 工作面各回采阶段的主要冲击危险区域。对于阶段一和阶段二，区段煤柱和工作面中下部为主要的静载集中区和动载扰动区，工作面回风巷围岩也存在一定静载集中和动载扰动。对于阶段三，工作面中下部为被保护层、冲击危险降低，工作面回风巷围岩为主要的静载集中区和动载扰动区。静载集中区和动载集中区重合。数值模拟和现场监测结果与理论分析结果基本一致，验证了冲击机制的正确性。

3) 依据理论分析和现场监测结果提出了 W1123

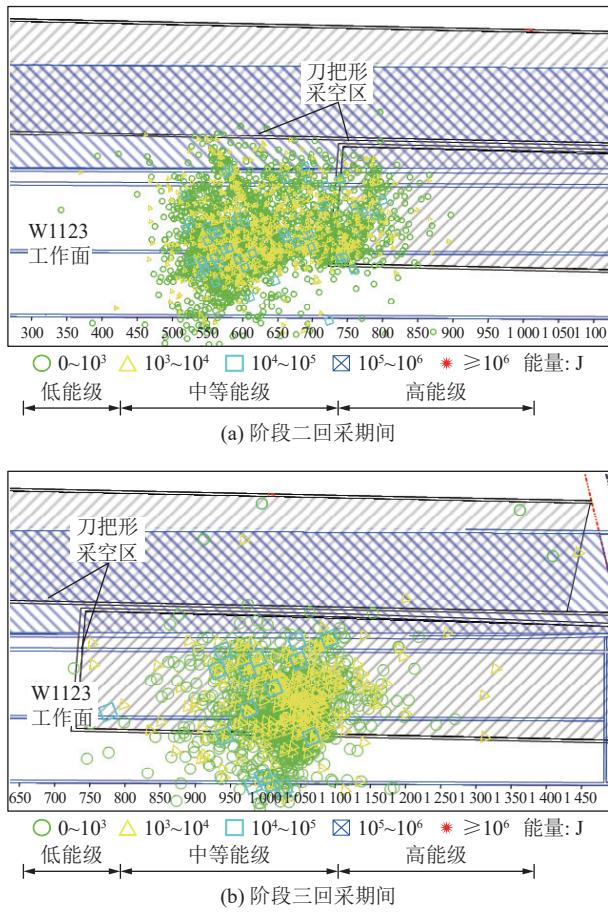


图 17 优化措施实施后阶段二微震事件平面分布

Fig.17 Microseismic plane distribution in each mining stage after the implementation of optimization measures

工作面冲击地压防冲优化措施并进行了工程应用。通过实施巷道走向尾巷切顶、煤柱切顶、增加顶板岩层处理高度等措施，降低工作面静载集中和强动载扰动。防治措施实施后，工作面围岩释放的日均能量总体下降 54%， 10^5 J 能级和 10^4 J 能级微震事件分别降低 89.7% 和 65.1%，大能量事件大幅减少，冲击地压危险显著降低。

参考文献(References):

- [1] 谢和平, 吴立新, 郑德志, 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1949–1960.
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezh. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in, 2025 [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949–1960.
- [2] 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.
- [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 Shunkun, 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] 何学秋, 陈建强, 宋大钊, 等. 典型近直立煤层群冲击地压机理及监测预警研究 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 13–22.
HE Xueqiu, CHEN Jianqiang, SONG Dazhao, et al. Study on mechanism of rock burst and early warning of typical steeply inclined coal seams [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 13–22.
- [5] HE X Q, ZHOU C, SONG D Z, et al. Mechanism and monitoring and early warning technology for rockburst in coal mines [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2021, 28(7): 1097–1111.
- [6] 齐庆新, 马世志, 孙希奎, 等. 煤矿冲击地压源头防治理论与技术架构 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1861–1874.
QI Qingxin, MA Shizhi, SUN Xikui, et al. Theory and technical framework of coal mine rock burst origin prevention [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1861–1874.
- [7] 蓝航, 齐庆新, 潘俊峰, 等. 我国煤矿冲击地压特点及防治技术分析 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 11–5, 36.
LAN Hang, QI Qingxin, Pan Junfeng, et al. Analysis on features as well as prevention and control technology of mine strata pressure bumping in China [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(1): 11–5, 36.
- [8] 朱斯陶, 刘金海, 姜福兴, 等. 我国煤矿顶板运动型矿震及诱发灾害分类、预测与防控 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 807–816.
ZHU Sitao, LIU Jinhai, JIANG Fuxing, et al. Classification, prediction, prevention and control of roof movement-type mine earthquakes and induced disasters in China's coal mines [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 807–816.
- [9] 李康. 上覆残采煤层不均衡空间结构冲击致灾研究 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(12): 58–66.
LI Kang. Study on disaster caused by unbalanced spatial structure impact of overlying residual coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(12): 58–66.
- [10] 姜福兴, 王玉霄, 李明, 等. 上保护层煤柱引发被保护层冲击机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1689–1696.
JIANG Fuxing, WANG Yuxiao, LI Ming, et al. Mechanism of rockburst occurring in protected coal seam induced by coal pillar of protective coal seam [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1689–1696.
- [11] MU H W, WANG A H, SONG D Z, et al. Failure mechanism of gob-side roadway under overlying coal pillar multiseam mining [J]. Shock and Vibration, 2021, (1): 4403456.
- [12] MU H W, SONG D Z, HE X Q, et al. Regional local integrated rockburst monitoring and early warning for multi-seam mining [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2021, 18(5): 725–739.
- [13] JIA C, LAI X P, CUI F, et al. Mechanism of rock burst and its dynamic control measures in extra-thick coal seam mining from be-

- low the residual coal seam to below the gob[J]. *Lithosphere*, 2022, (Special 11): 8179501.
- [14] 瞿孝昆, 姜福兴, 王慧涛, 等. 采空区煤柱失稳诱发下煤层冲击机理研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2017, 34(6): 1134–1140.
- QU Xiaokun, JIANG Fuxing, WANG Huitao, et al. Research on mechanism of rock burst induced by coal pillar failure in mine goaf[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2017, 34(6): 1134–1140.
- [15] ZHAO T B, GUO W Y, TAN Y L, et al. Case studies of rock bursts under complicated geological conditions during multi-seam mining at a depth of 800 m[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(5): 1539–1564.
- [16] 葛海军, 冯忠志, 李彩云. 浅埋深孤岛工作面下行开采过上覆遗留煤柱强矿压特征及防治技术[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(S1): 36–41.
- GE Haijun, FENG Zhizhong, LI Caiyun. Strong ground pressure characteristics and prevention technology when shallow buried island working face goes down through overlying residual coal pillar[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(S1): 36–41.
- [17] 霍丙杰, 范张磊, 谢伟, 等. 浅埋近距离房式采空区下应力场分析及动压机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 179–186.
- HUO Bingjie, FAN Zhanglei, XIE Wei, et al. Stress field analysis and study on dynamic pressure mechanism under goaf of shallow depth and closed distance room and pillar mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 179–186.
- [18] 张会军. 长壁工作面顶板来压对冲击地压发生的影响分析[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(12): 32–35.
- ZHANG Huijun. Analysis on roof strata weighting of longwall coal mining face affected to pressure bump occurred[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(12): 32–35.
- [19] 赵毅鑫, 周金龙, 刘文岗. 新街矿区深部开采邻空巷道受载特征及冲击失稳规律分析[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1595–1606.
- ZHAO Yixin, ZHOU Jinlong, LIU Wengang. Characteristics of ground pressure and mechanism of coal burst in the gob side roadway at Xinjie deep mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1595–1606.
- [20] 李振雷, 何学秋, 窦林名. 综放覆岩破断诱发冲击地压的防治方法与实践[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(1): 162–171.
- LI Zhenlei, HE Xueqiu, DOU Linming. Control measures and practice for rock burst induced by overburden fracture in top-coal caving mining[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2018, 47(1): 162–171.
- [21] 潘俊峰, 刘少虹, 高家明, 等. 深部巷道冲击地压动静载分源防治理论与技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1607–1613.
- PAN Junfeng, LIU Shaohong, GAO Jiaming, et al. Theory and technology for the prevention and control of dynamic and static load source separation of deep tunnel impact [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1607–1613.
- [22] 杜涛涛, 鞠文君, 陈建强, 等. 坚硬顶板遗留煤层下综放工作面冲击地压发生机理[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(6): 1144–1151.
- DU Taotao, JU Wenjun, CHEN Jianqiang, et al. Mechanism of rock burst in fully mechanized caving faces under residual coal seams with hard roof[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2021, 38(6): 1144–1151.
- [23] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(7): 1469–1476.
- DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(7): 1469–1476.
- [24] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005(17): 3003–3010.
- XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005(17): 3003–3010.