DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2025.0714

复合坚硬顶板工作面末采顶板爆破防冲调控技术

董续凯[1]，白俊杰[2]，张俊文[3*]，刘金海[1]，赵善坤[4]，许 蒙[5]

（1. 北京科技大学 资源与安全工程学院，北京 100083；2. 陕西延长石油巴拉素煤业有限公司，陕西 榆林 719000；3. 中国矿业大学（北京）能源与矿业学院，北京 100083；4. 煤炭科学技术研究院有限公司，北京 100013；5. 中煤天津设计工程有限责任公司，天津 300120）

摘要：在复合坚硬顶板条件下，受上覆坚硬岩层协同破断、孤立煤体高应力集中及回撤巷道宽保护煤柱的耦合作用影响，工作面末采阶段冲击地压风险显著提升。分析表明，顶板断裂诱发的频繁高能微震事件与孤立煤柱应力集中是冲击地压的主要诱因。通过理论分析与现场监测，明确顶板爆破防冲原理，提出在覆岩关键区域实施爆破手段从而阻断应力传递路径、实现回撤通道和孤立煤体有效保护的顶板爆破调控技术方案。采用数值模拟方法对比分析未爆破、高位单孔爆破以及“高+低位”联合爆破 3 种方案下围岩应力演化及塑性区分布特征。结果表明，顶板爆破显著削弱末采阶段的应力集中效应，其中“高+低位”联合爆破方案通过应力峰值降低幅度最大与塑性区发育范围明显缩减表现出最优效果。参数优化结果表明，当高（低）位孔深、起始高度、2 个倾角分别为 53（33）m、19.3（13.0）m、60°（40°）时，该参数组合可同时实现最优岩层塑性破坏演化和煤柱应力降低效应。现场应用显示：支架压力峰值及集中程度明显降低；煤体应力计最大监测值仅 12.7 MPa，且应力变化平稳；高能微震事件频次与累计能量分别减少 30%与 35%，未出现能量超过 10^4 J 的事件；多参量监测结果表明，该方案能够有效改善末采应力环境，降低动载扰动强度，实现对回撤通道及孤立煤体的协同保护。

关键词：采矿工程；复合坚硬顶板；末采防冲；顶板爆破；关键区域；调控技术

中图分类号：TD 32 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－6915(2026)03－0764－13

第 一 作 者：董续凯（1995－），现任助理研究员，主要从事煤岩瓦斯复合动力灾害方面的研究。E-mail：15733671801@163.com

***通信作者**：张俊文（1977－），现任教授，主要从事煤岩瓦斯复合动力灾害方面的研究。E-mail：zhangjw@cumtb.edu.cn

Roof-blasting control technology for rockburst prevention in the final mining stage with composite hard roof

DONG Xukai[1], BAI Junjie[2], ZHANG Junwen[3*], LIU Jinhai[1], ZHAO Shankun[4], XU Meng[5]

(1. *School of Resources and Safety Engineering*, *University of Science and Technology Beijing*, *Beijing* 100083, *China*; 2. *Shaanxi Yanchang Petroleum Balasu Coal Industry Co.*, *Ltd.*, *Yulin*, *Shaanxi* 719000, *China*; 3. *School of Energy and Mining*, *China University of Mining and Technology*(*Beijing*), *Beijing* 100083, *China*; 4. *China Coal Research Institute*, *Beijing* 100013, *China*; 5. *China Coal Tianjin Design Engineering Co.*, *Ltd*., *Tianjin* 300120, *China*)

Abstract: Under the conditions of a composite hard roof, the risk of rockburst at the end of the working face is significantly elevated due to the coupled effects of coordinated fracturing of overlying hard strata, high-stress concentration in isolated coal bodies, and the presence of wide protective coal pillars in the retreating roadway. Analyses indicate that frequent high-energy microseismic events induced by roof fracturing, along with stress

收稿日期：2025－09－29；**修回日期**：2025－11－27

基金项目：国家重点研究计划资助项目（2024YFC3013801）；国家自然科学基金资助项目（U23B2093，52034009）

Supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2024YFC3013801) and National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U23B2093 and 52034009)

concentration in isolated coal pillars, are the primary triggers of rockburst. Through theoretical analysis and field monitoring, the mechanism of roof-blasting-based rockburst mitigation has been elucidated, and a roof blasting control strategy has been proposed to interrupt stress transmission pathways in critical overlying strata, thereby providing effective protection for retreating roadways and isolated coal bodies. Numerical simulations were conducted to compare the stress evolution and plastic zone distribution in the surrounding rock under three scenarios: no blasting, high-position single-hole blasting, and combined “high + low-position” blasting. The results demonstrate that roof blasting substantially mitigates the effects of stress concentration during the end-of-face stage, with the “high + low-position” combined blasting exhibiting optimal performance by achieving the greatest reduction in peak stress and a notable contraction of the plastic zone. Parameter optimization indicates that a combination of high-position (53 m) and low-position (33 m) hole depths, initiation heights of 19.3 m (high) and 13.0 m (low), and inclinations of 60° (high) and 40° (low) simultaneously enables optimal evolution of plastic failure in the strata and effective stress reduction in coal pillars. Field applications have shown that the peak and concentration of support pressures were significantly decreased, with the maximum monitored coal body stress reaching only 12.7 MPa and exhibiting smooth stress variation. Additionally, the frequency and cumulative energy of high-energy microseismic events were reduced by 30% and 35%, respectively, with no events exceeding 10^4 J. Multi-parameter monitoring confirmed that the proposed approach effectively improved the stress environment during the end-of-face stage, reduced dynamic load intensity, and achieved coordinated protection of retreating roadways and isolated coal bodies.

Key words: mining engineering; composite hard roof; end mining prevention rockburst; roof blasting; key area; regulation technology

First author: DONG Xukai (1995－), assistant research fellow, is engaged in the combined dynamic disasters of coal, rock and gas. E-mail: 15733671801@163.com

***Corresponding author:** ZHANG Junwen (1977－), professor, is engaged in the combined dynamic disasters of coal, rock and gas. E-mail: zhangjw@cumtb.edu.cn

1 引 言

采煤工作面开采活动引起上覆岩层破断、运移、高应力集聚等，使回采工作面末采期间剩余孤立煤体区域应力水平大幅度升高，造成末采阶段巷道围岩与支护系统整体处于不稳定状态。当蓄积能量达到一定程度后瞬间释放，容易造成末采冲击地压事故。关于末采期间冲击地压发生机制及防治方法，国内外学者进行了一定的研究与实践。褚 渊等[1]建立了末采阶段回撤通道近距离高、低位坚硬顶板联合失稳模型，提出了围岩结构优化控制技术，有效控制了末采期高应力集中强动载。胡 滨[2]认为，预掘回撤通道末采期间残余煤柱区域性脆性破坏导致超前采动应力、顶板岩层断裂线前移，进而导致大面积失稳破碎。秦喜文等[3]研究得出采动影响是末采回撤通道失稳破坏的主要因素，认为顶板爆破可降低采动影响并弱化支承压力传递路径。张 寅等[4]认为末采冲击地压是工作面超前支承压力、临侧采空侧向支承压力及预掘回撤巷静载耦合作用的结果，提出“强支－强卸”技术有效保障了末采回撤巷安全使用。张俊文等[5-6]研究认为，多工作面开采顶板动态结构演化是末采期间冲击地压发生的主要诱因，低位厚硬组合岩层垮落扰动高应力煤体的联合作用是冲击地压发生的主要原因。在坚硬顶板作为主要影响因素的冲击地压矿井中，顶板爆破技术得到了广泛应用。白俊杰[7]从应力阻断和正面保护末采回撤通道角度，验证了“高+低”位断顶爆破设计方案的技术优势。窦林名等[8]基于动静载叠加原理，构建了“三分”断顶爆破防治冲击地压技术体系，达到同时减弱动载强度和降低煤体高静载的目的。赵善坤[9-10]对比分析了厚硬顶板条件下深孔顶板预裂爆破与定向水压致裂防冲适用性，相较而言顶板爆破防冲效果见效快，具有弱化顶板岩层介质力学属性和优化岩层破断结构的双重作用。

综上，目前对末采阶段防冲工程的实践主要集中在顶板破断、垮落等方面。对末采阶段面临的超前高应力集聚、覆岩应力分布、高应力传递路径、孤立煤柱等方面的研究工作相对较少，末采阶段覆岩应力环境分布及冲击力源研究还不完善，尚未形成适合末采防冲的技术模式。实践证明，基于结构演化规律和调控技术的动力灾害防治路径保障了煤

矿动力灾害的高效防治[11-12]。潘立友等[13]分析了复合弱化结构的防冲力学机制，提出利用复合弱化结构进行冲击能量耗散，实现了上覆煤柱影响区冲击地压的整体可控性。王兆会等[14]研究了预制裂隙结构试件变形演化与裂隙扩展机制，认为裂隙起裂位置和扩展路径可为深部岩石破坏防控提供前兆信息。张 翔等[15-16]揭示了巨厚表土－锯齿断层煤柱组合结构联动失稳机制和厚硬岩层－煤柱结构失稳诱冲机制。张 帅等[17]通过研究改性调控措施能量演化全过程响应规律，构建了采动围岩能量系统协同演化与韧性调控减冲评估体系。闫 才等[18]研究了巨厚表土－孤岛煤柱组合结构的空间结构演化规律、失稳判据和冲击机制。伍永平等[19]厘定了覆岩空间结构与其力学响应的内在联系，揭示了结构瞬变激励下采场煤岩的力学响应和冲击地压的发生机制。谭云亮等[20]围绕沿空侧向覆岩结构改性防冲机制与实践开展了研究。陈 洋等[21-22]研究了充填开采冲击地压发生机制及防治技术，证明了充填开采改性采场结构防冲的可行性。同时，王 超等[23]研究了基于结构特征的冲击危险性评价方法，崔 峰等[24]研究了监测预警时空演化规律。

上述学者针对坚硬顶板、沿空巷道急倾斜煤层开采等影响因素进行了系统的冲击地压调控技术研究。然而，复合坚硬顶板[25-26]具有岩层厚度较小、连续互层形成硬岩组合层、协同运动范围小的特征。现场调研发现，末采工作面覆岩特征及冲击地压发生现象表明，复合坚硬顶板破断频繁发生强扰动是末采阶段发生冲击地压发生的主要因素，且复合坚硬顶板工作面末采冲击地压防治调控技术研究较少。鉴于此，本文基于工作面末采阶段覆岩应力环境分布及演化特征，利用数值模拟手段研究末采阶段不同顶板爆破调控方案效果，并进行末采防冲爆破工程应用及效果检验。研究成果可为相似条件矿井末采冲击地压灾害防治提供理论基础和技术参考。

2　工程地质及末采冲击地压概况

2.1　工程概况

某矿主采煤层埋深约 600 m，煤层厚度 5.5～5.8 m，煤层倾角 1°～3°。如图 1 所示，该矿多个工作面末采阶段双回撤通道的主、辅回撤通道之间留设煤柱宽度 25～45 m，随着工作面进入末采阶段逐渐形成孤立煤体。根据该矿多个工作面井下顶板取芯结果显示(见表 1)，各层位岩层致密、层面整合。

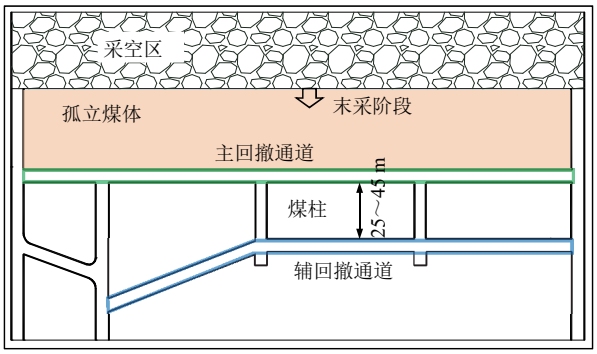


图 1　工作面末采阶段概况

Fig.1　Overview of the final mining stage in the working face

表 1　垮落带复合坚硬顶板概况

Table 1　Overview of the composite hard roof in the caving zone

类别 (category)	岩性 (nature)	厚度 (thickness)/m	累计厚度 (cumulative thickness)/m
	细粒砂岩	5.5	61.3
	细粒砂岩	7.8	55.8
	中粒砂岩	4.9	48.0
	粉砂岩	1.8	43.1
	中粒砂岩	1.3	41.3
	粉砂岩	1.9	40.0
复合坚硬顶板	细粒砂岩	7.6	38.1
	细粒砂岩	2.1	30.5
	砂质泥岩	3.1	28.4
	细粒砂岩	9.9	25.3
	砂质泥岩	3.1	15.4
	细粒砂岩	11.0	12.3
	粉砂岩	1.3	1.3

顶板岩性主要为砂质泥岩、细粒砂岩，少数为粉砂岩，单轴抗压强度均为 50～60 MPa，上覆多层坚硬岩层组成复合坚硬顶板[27]。经煤层及其顶底板冲击倾向性鉴定和冲击危险性评价，该矿主采煤层顶板和煤层均具有强冲击倾向性，底板具有弱冲击倾向性；煤层冲击危险性评价等级为中等，末采期间冲击风险等级均为强冲击危险等级。

受埋深、复合坚硬顶板、孤立煤体、预掘回撤通道宽煤柱等因素影响，末采阶段冲击地压风险较高。一旦发生冲击地压事故，将导致回撤通道严重破坏，不仅会拖延工作面设备回撤时间，还会严重威胁回撤作业人员和设备安全，严重影响矿井安全高效生产。

以首采区第三个工作面末采阶段为例，在剩余可采走向长度 60～0 m 阶段，区域微震、局部煤体应力、钻屑量等各项防冲监测指标逐步增大，冲击风险随之增大。提取工作面末采阶段微震监测结果如表 2 所示，工作面末采阶段大能量事件(能量＞10^4 J)

表 2　工作面末采微震监测情况

Table 2　Monitoring situation of microseismic events at the end of the working face

当日进尺 (daily advance mining length(cut))/刀	剩余可采长度 (remaining mining length)/m	大能量事件 (large energy event)	总能量 (total energy)/(10^4 J)	每刀能量 (energy per cut)/(10^4 J)	事件个数 (number of events)
6	40.2	0	48.1	8.02	137
6	35.1	1	39.0	6.50	133
6	30.0	3	48.2	8.04	135
6	24.9	6	66.4	11.10	208
6	19.8	6	58.8	9.79	143
6	14.7	1	53.6	8.93	198

频发，日均大能量事件 3～6 个，最大四次方事件达到 7.8×10^4 J。

根据末采阶段煤体应力监测情况统计，回撤通道有 3 处应力预警，主回撤通道深孔应力计红色预警，应力值为 22.79 MPa，浅孔黄色预警，应力值为 11.79 MPa；辅回撤通道深孔应力计红色预警，应力值为 24.65 MPa。

综上，可以得到复合坚硬顶板工作面末采阶段冲击地压发生机制：受多种因素叠加影响，并随着剩余可采长度缩短，末采阶段应力集中问题加剧(煤体钻孔应力计出现红色大面积预警)；复合坚硬顶板破断频繁发生 10^4 J 以上大微震能量事件，且大能量事件垂直方向距离煤层较近，造成末采期间具有极高的冲击危险性，如图 2[28]所示。

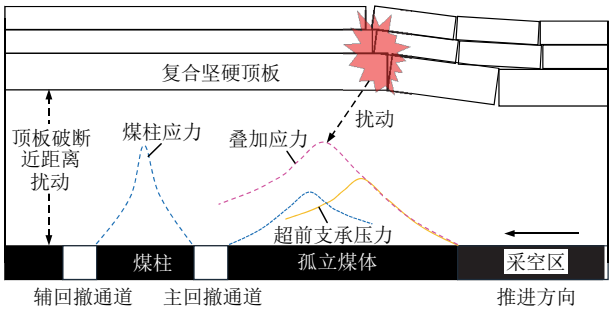


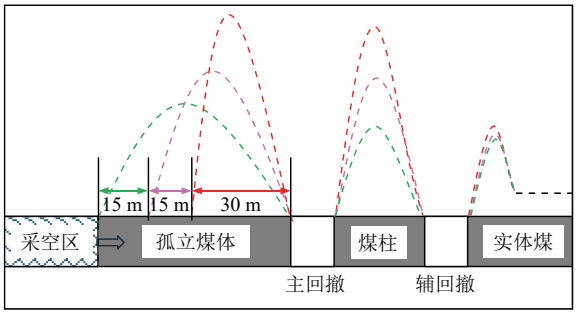
图 2　末采阶段冲击地压发生机制示意[28]

Fig.2　Schematic diagram of the mechanism of rockburst during the final mining stage[28]

该矿已回采的诸多工作面在末采期间面临的防冲问题均与该工作面类似。大量的工程实践表明，现有的防冲措施未能对该矿大采高综采工作面的末采防冲风险形成有效的管控。因此，有必要从工作面末采过程中出现的高应力、高能量源头研究，形成复合坚硬顶板工作面末采冲击地压防治调控技术，指导该矿及类似矿井末采期间的防冲安全工作。

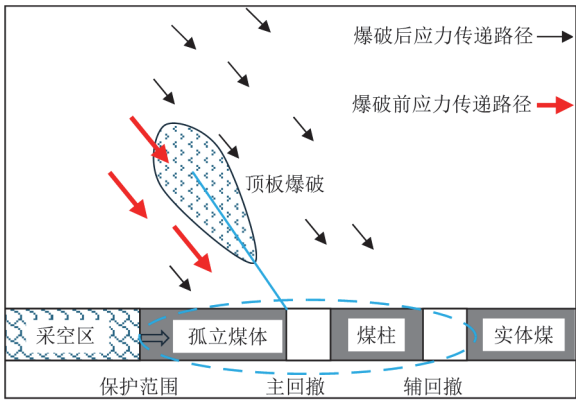
2.2　末采顶板爆破冲击地压防治原理

工作面进入末采阶段后，随着距离回撤通道愈来愈近，孤立煤体、煤柱应力集中程度越来越大，造成工作面末采阶段具有严重的冲击地压风险，如图 3(a)所示。因此，需要采用顶板爆破技术手段，如图 3(b)所示，对末采区域上覆岩层结构、高应力传递路径进行调控，在覆岩形成爆破破碎区域，使得本工作面的采动应力向覆岩及周边更深、更广的范围扩展，实现对采动应力传递路径阻断，对回撤通道、孤立煤体等末采影响区域形成保护作用，达到避免工作面采动压力、回撤通道巷道及孤立煤柱的应力集中相互叠加的效果，如图 3(c)所示。



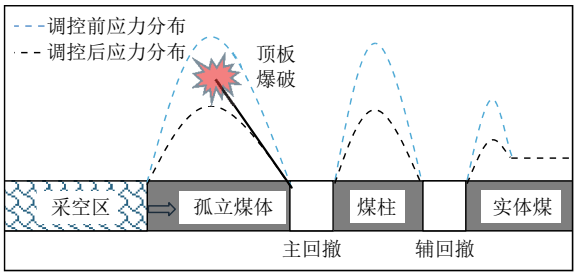
(a)　采动应力分布

(a) Stress distribution in coal mining



(b)　顶板爆破防冲作用原理

(b) The mechanism of preventing rockburst through roof blasting



(c) 调控前后应力分布

(c) Stress distribution before and after regulation

图 3　末采顶板爆破冲击地压防治原理[7]

Fig.3　Principles of preventing rockburst caused by roof blasting in the final mining stage[7]

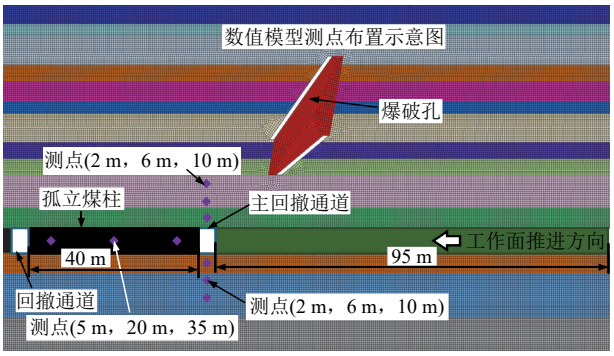


图 4　复合坚硬顶板高低位爆破数值模型建立

Fig.4　Establishment of a numerical model for high-low position blasting of the composite hard roof

根据上述分析，工作面末采阶段顶板爆破具有一定的防冲作用。然而，顶板爆破角度、组合方式、装药长度等爆破参数均对防冲效果产生影响。因此，针对工作面末采阶段复合坚硬顶板结构、煤岩物理力学特性和回撤通道布置的技术条件，采用 FLAC^{3D} 软件(莫尔－库仑模型)研究工作面末采阶段围岩应力、塑性区的分布，为复合坚硬顶板工作面末采冲击地压防治调控技术选择提供依据。

3　不同末采顶板爆破方式防冲效果数值模拟研究

3.1　顶板爆破方式选择

根据现场生产实际条件及复合坚硬顶板情况，设计顶板爆破方案，如表 3 所示。通过对照分析未爆破、高位单孔爆破、“高+低位”爆破 3 种方案围岩应力及塑性区发育分布特征的差异，为最终顶板爆破方案制定提供依据。

表 3　复合坚硬顶板爆破对照方案

Table 3　Composite hard roof blasting comparison plan

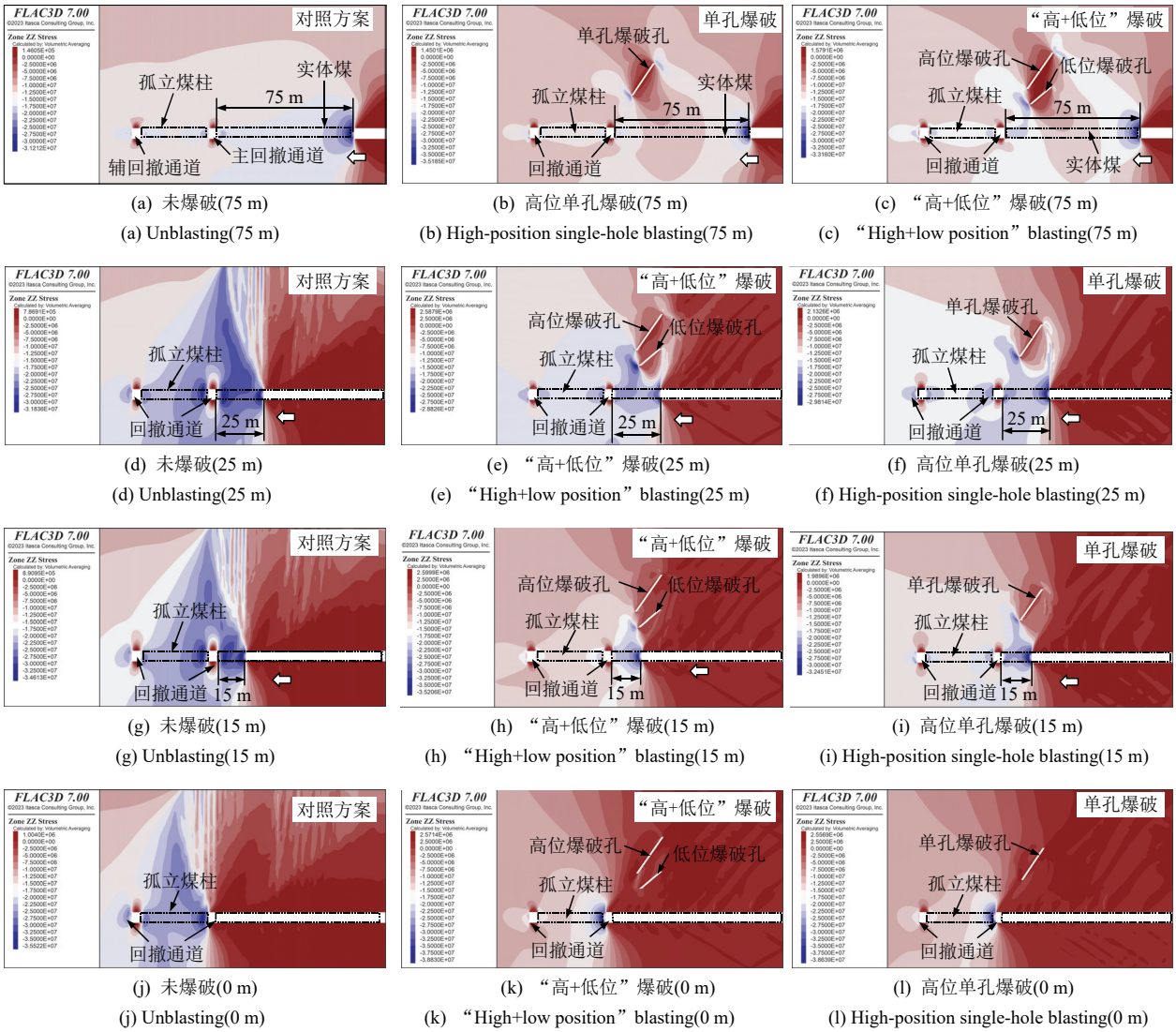
类别 (category)	炮孔数量 (number of blasting bores)/units	炮孔倾角 (angle of blasting bore)/(°)	孔深 (depth of hole)/m	起始高度 (starting height)/m
未爆破	0	–	–	–
高位单孔	1	56	42	18
“高+低位”	2	60/40	53/33	22/11

根据该矿实际地质及生产技术条件，以实际揭露的复合坚硬顶板结构为基础，建立不同爆破方案的数值模拟面模型，以“高+低位”爆破模型为例，如图 4 所示。模型计算采用莫尔－库仑准则，岩层的物理力学参数依据矿井地质报告及钻孔资料并进行修订，结合现场对模型顶板施加 12.6 MPa 垂直应力，根据工作面回采地质报告侧压系数取 1.2。模型平衡后，弱化爆破孔网格参数以模拟爆破效果。在模型中加入了测点，研究不同顶板爆破调控方案下孤立煤体以及回撤通道顶底板应力变化。

3.2　围岩应力分布特征

末采阶段围岩应力分布特征存在显著差异，如图 5 所示：(1) 在未采取顶板爆破调控措施情况下，孤立煤柱垂直应力始终处于较高水平，随着工作面推进应力峰值先升高后略有下降，最大达到 37 MPa，末采贯通时略降至 28 MPa；覆岩应力整体呈“三角形”分布，峰值约为煤体单轴抗压强度的 1.42 倍，显示出较强的应力集中效应。(2) 在“高+低位”顶板爆破方案中，初始应力峰值与未爆破条件接近，但应力集中范围显著缩小，仅局部区域存在集中现象；在推进至回撤通道 25 m 时应力降至最低值，末采阶段虽有一定回升，但整体仅小范围处于高应力状态，且分布形态由大三角转为不规则小三角，应力集中范围缩减 70%～90%。(3) 高位单孔爆破方案中，应力演化规律与“高+低位”方案相似，均表现为随推进应力先降后升，但末采阶段在主回撤通道两帮出现较明显的集中现象。(4) 当工作面推进至距主回撤通道 25 m 时，未爆破条件下煤柱与通道应力叠加，形成多处高应力区；而在爆破方案中，应力转移至爆破孔底端，主回撤通道及煤壁应力显著降低，其中“高+低位”方案叠加效应最小，应力主要集中于煤壁一侧，高位单孔方案则在主回撤通道右帮煤柱区表现出较强集中。整体上，顶板爆破调控有效削弱了应力集中，优化了末采阶段围岩应力分布。

上述分析表明，顶板爆破所形成的塑性破坏区域对末采阶段垂直应力的动态分布有重要影响。对



(a) 未爆破(75 m)　(b) 高位单孔爆破(75 m)　(c) “高+低位”爆破(75 m)

(a) Unblasting(75 m)　(b) High-position single-hole blasting(75 m)　(c) “High+low position” blasting(75 m)

(d) 未爆破(25 m)　(e) “高+低位”爆破(25 m)　(f) 高位单孔爆破(25 m)

(d) Unblasting(25 m)　(e) “High+low position” blasting(25 m)　(f) High-position single-hole blasting(25 m)

(g) 未爆破(15 m)　(h) “高+低位”爆破(15 m)　(i) 高位单孔爆破(15 m)

(g) Unblasting(15 m)　(h) “High+low position” blasting(15 m)　(i) High-position single-hole blasting(15 m)

(j) 未爆破(0 m)　(k) “高+低位”爆破(0 m)　(l) 高位单孔爆破(0 m)

(j) Unblasting(0 m)　(k) “High+low position” blasting(0 m)　(l) High-position single-hole blasting(0 m)

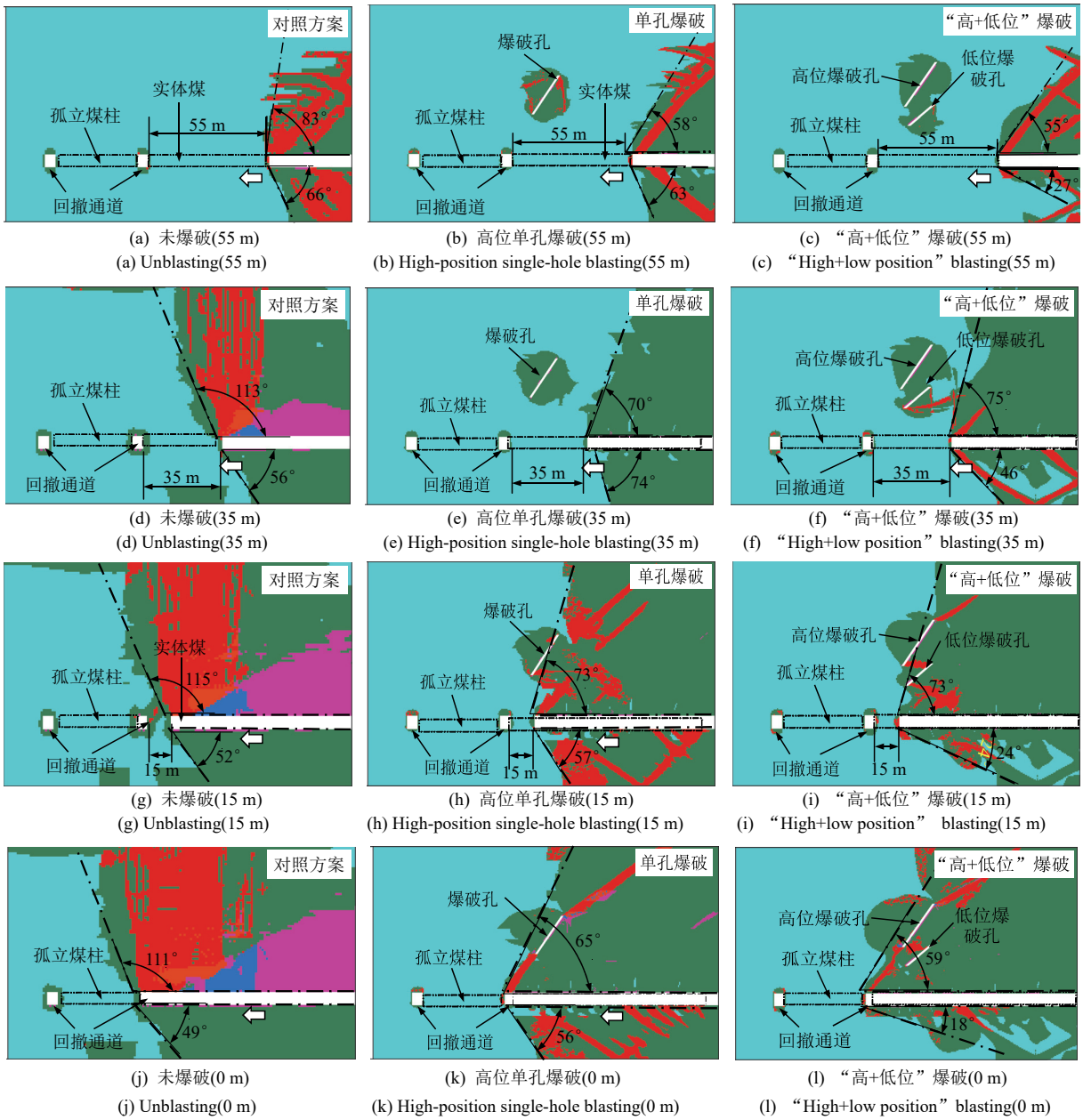
图 5　不同顶板爆破方案垂直应力分布特征(单位：Pa)

Fig.5　Vertical stress distribution characteristics of different roof blasting schemes(unit：Pa)

末采阶段应力分布起到了显著的调控作用，且“高+低位”顶板爆破调控方案对末采阶段垂直应力的干预效果最好。

3.3　围岩塑性区分布特征

顶板爆破对塑性破坏区域的面积、实体煤上方以及回撤通道围岩塑性区的发育也产生了明显的影响，如图 6 所示：(1) 未采取顶板爆破调控措施情况下，顶板的塑性区发育超前于末采端，且随工作面推进越来越靠近孤立煤柱一侧，在距离 15 m 时最大，与采空区呈 115°；随工作面推进，底板塑性区增速逐渐降低，在距离 55m 时与采空区呈 66°，在末采贯通时达到最低角度 49°。(2) 在采取“高+低位”顶板爆破调控方案中，塑性区发育滞后于末采端，其顶板塑性区增速随工作面推进先增大后降低，在 35 m 塑性区增速达到最大，与采空区呈 75°；推采过爆破孔后塑性区增速降低并向采空区一侧收缩，末采贯通时塑性区增速达到最低，与采空区角度为 59°。(3) 高位单孔顶板爆破调控方案中塑性区发育规律与“高+低位”顶板爆破类似，在 15 m 塑性区增速达到最大，与采空区呈 73°；推采过爆破孔后顶板塑性区最低，与采空区角度为 65°。(4) “高+低位”顶板爆破调控后回撤通道塑性区的面积为最小，底板塑性区发育程度最弱；高位单孔顶板爆破调控方案中底板塑性区发育程度最强，考虑为单孔爆破形成局部顶板削弱但并未实现顶板贯通断裂，虽然降低了围岩整体应力峰值，但也促使应力峰值分布位置向煤体浅部(巷道围岩)移动，反而增大了煤体浅部应力集中程度。(5) “高+低位”顶板爆破调控方案对末采阶段覆岩塑性区的干预效果最好。



(a) 未爆破(55 m)　(a) Unblasting(55 m)
(b) 高位单孔爆破(55 m)　(b) High-position single-hole blasting(55 m)
(c) “高+低位”爆破(55 m)　(c) “High+low position” blasting(55 m)
(d) 未爆破(35 m)　(d) Unblasting(35 m)
(e) 高位单孔爆破(35 m)　(e) High-position single-hole blasting(35 m)
(f) “高+低位”爆破(35 m)　(f) “High+low position” blasting(35 m)
(g) 未爆破(15 m)　(g) Unblasting(15 m)
(h) 高位单孔爆破(15 m)　(h) High-position single-hole blasting(15 m)
(i) “高+低位”爆破(15 m)　(i) “High+low position” blasting(15 m)
(j) 未爆破(0 m)　(j) Unblasting(0 m)
(k) 高位单孔爆破(0 m)　(k) High-position single-hole blasting(0 m)
(l) “高+低位”爆破(0 m)　(l) “High+low position” blasting(0 m)

图 6　不同顶板爆破方案塑性区分布特征

Fig.6　Distribution characteristics of plastic zones in different roof blasting schemes

3.4　关键层位应力对比分析

3.4.1　主回撤通道顶板应力变化情况

3 种不同的断顶爆破处置方案下 2，6，10 m 处测点的垂直应力变化出现明显差异(见图 7)：(1) 距离主回撤通道 70 m 左右时，2 m 处测点的垂直应力出现大幅度下降，原因是受回采扰动影响，回撤通道顶板浅部岩层出现下沉甚至离层。未采取顶板爆破调控方案时，2 m 处测点垂直应力最小，“高+低位”爆破方案中，2 m 处测点垂直应力最大。(2)“高+低位”爆破方案处置后，6 m 处测点垂直应力略高于其他 2 种方案，垂直应力值约为 13 MPa。但此方案主回撤通道顶板中部正上方 6 m 处测点的垂

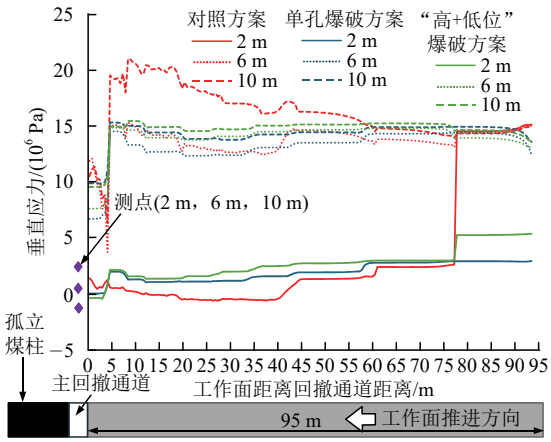


图 7　不同爆破调控方案下主回撤通道顶板应力变化

Fig.7　The stress changes of the roof of the main retreat channel under different blasting control schemes

直应力变化基本平稳，一定程度上说明了围岩应力变化的剧烈程度存在差异性。(3) 采取顶板爆破措施的 10 m 处测点垂直应力远低于未采取顶板爆破方案的应力值，基本维持在 14.35～15 MPa 范围。

3.4.2 主回撤通道底板应力变化情况

主回撤通道底板岩层内测点应力变化如图 8 所示，主回撤通道底板岩层下方 2 m 测点“高+低位”爆破方案中的垂直应力总体小于其他 2 种方案，高位单孔爆破方案中的平均应力最大；3 种方案中主回撤通道底板岩层下方 6 m 的垂直应力值基本接近；未采取顶板爆破方案的主回撤通道底板岩层下方 10 m 位置应力远大于爆破后应力值。

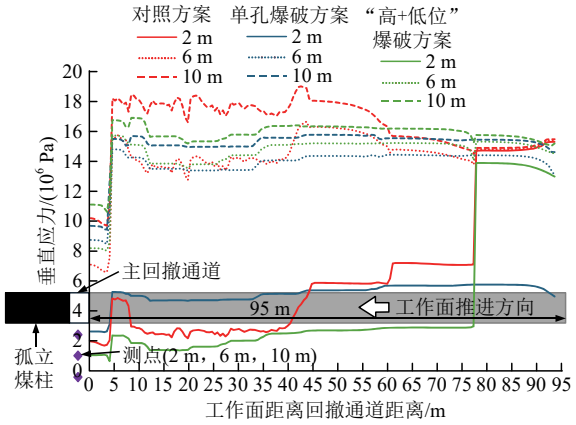


图 8　不同爆破调控方案下主回撤通道底板应力变化

Fig.8　Stress changes of the floor in the main retreat channel under different blasting control schemes

综上，采取断顶爆破后，末采阶段主回撤通道底板岩层内的应力环境趋于改善，整体上呈现明显减小的趋势。

3.4.3 孤立煤柱内应力变化情况

图 9 为孤立煤柱三处测点的垂直应力变化情况，未采取顶板爆破方案的孤立煤体垂直应力远大于采取顶板爆破方案；在回撤通道采取顶板爆破后，末采阶段孤立煤柱内的应力环境趋于改善，孤立煤柱内部(5，20，35 m)的应力整体上呈现出明显变小的现象。

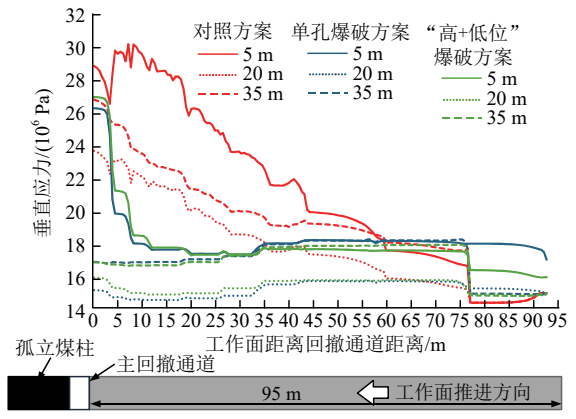


图 9　不同爆破调控方案下孤立煤体应力变化

Fig.9　Stress changes in isolated coal bodies under different blasting control schemes

综上，在回撤通道进行顶板爆破后，末采期间主回撤通道顶板、底板、孤立煤体应力明显改善，整体应力水平显著降低，一定程度上说明了顶板爆破对末采阶段围岩应力环境分布及动态变化起到了显著的调控作用，且“高+低位”爆破方案的防冲调控效果最优。因此，需要在采取“高+低位”顶板爆破调控方案的基础上，对高位、低位爆破孔的组合方式进行论证，以求得到最优防冲调控效果。

4　“高+低位”顶板爆破方案设计与工程应用

4.1　“高+低位”顶板爆破防冲调控作用研究

根据顶板岩层垮落碎涨系数、煤层平均采高对应的承载层高度、封孔长度要求以及装药长度覆盖的坚硬岩层范围，设计了 4 种不同爆破参数的“高+低位”顶板爆破调控方案，如表 4 所示。

表 4　不同爆破参数的“高+低位”顶板爆破调控方案

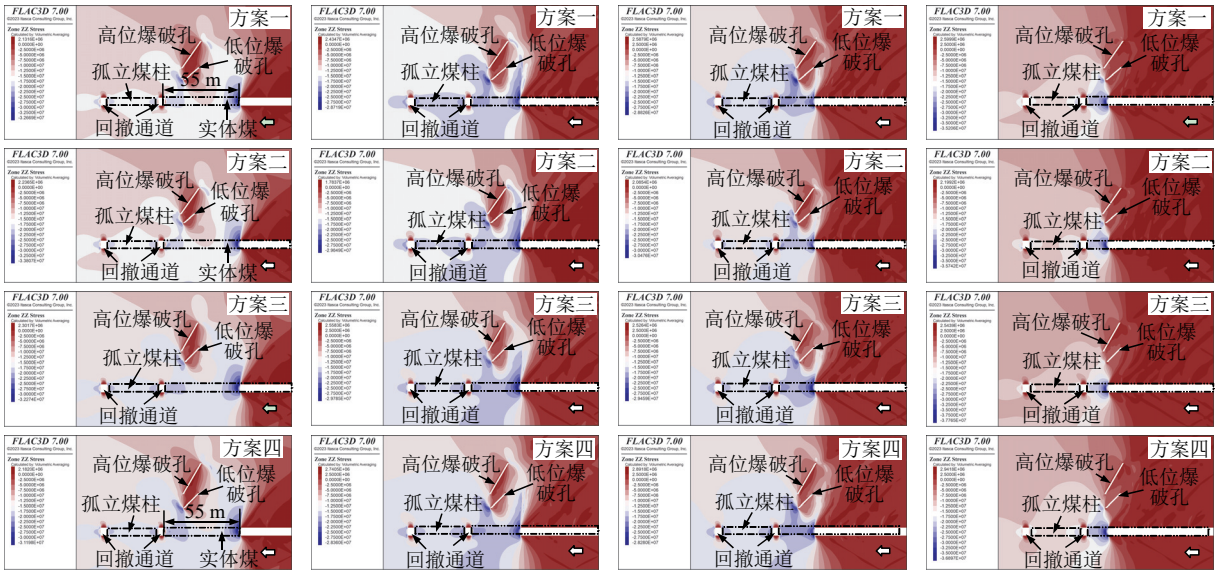
Table 4　“High+low position” roof blasting control scheme with different blasting parameters

方案编号 (scheme No.)	炮孔倾角 (angle of blasting bore)/(°)	高/低孔深 (high/low position hole depths)/m	起始高度 (starting height)/m
一	55/40	55/40	24.6/16.1
二	60/40	53/33	19.3/13.0
三	55/45	50/35	21.7/14.1
四	60/45	53/32	22.2/12.0

4.1.1 围岩垂直应力对比

不同参数“高+低位”顶板爆破方案对采场围岩垂直应力分布产生显著影响，如图 10 所示，应力峰值均集中于末采端煤壁，且随工作面推进表现为先降低后升高。具体而言：(1) 方案一在距回撤通道 35 m 处应力峰值最低，为 28.7 MPa，随后逐渐升高，在 15 m 处达 35.2 MPa；(2) 方案二与三规律相似，在 25 m 处应力最低 29.5 MPa，至 15 m 时升至 37.8 MPa；(3) 方案四在 35 m 处出现最低值约 28.3 MPa，随后升高，在 15 m 处达 36.9 MPa。

综合比较可见，方案一的最低应力区出现在 35 m 附近，最低值大于方案四；方案二和三在 25 m 附近达到最低值，略大于方案一；方案四在 35 m



(a) 距离 55 m　(b) 距离 35 m　(c) 距离 25 m　(d) 距离 15 m

(a) Distance 55 m　(b) Distance 35 m　(c) Distance 25 m　(d) Distance 15 m

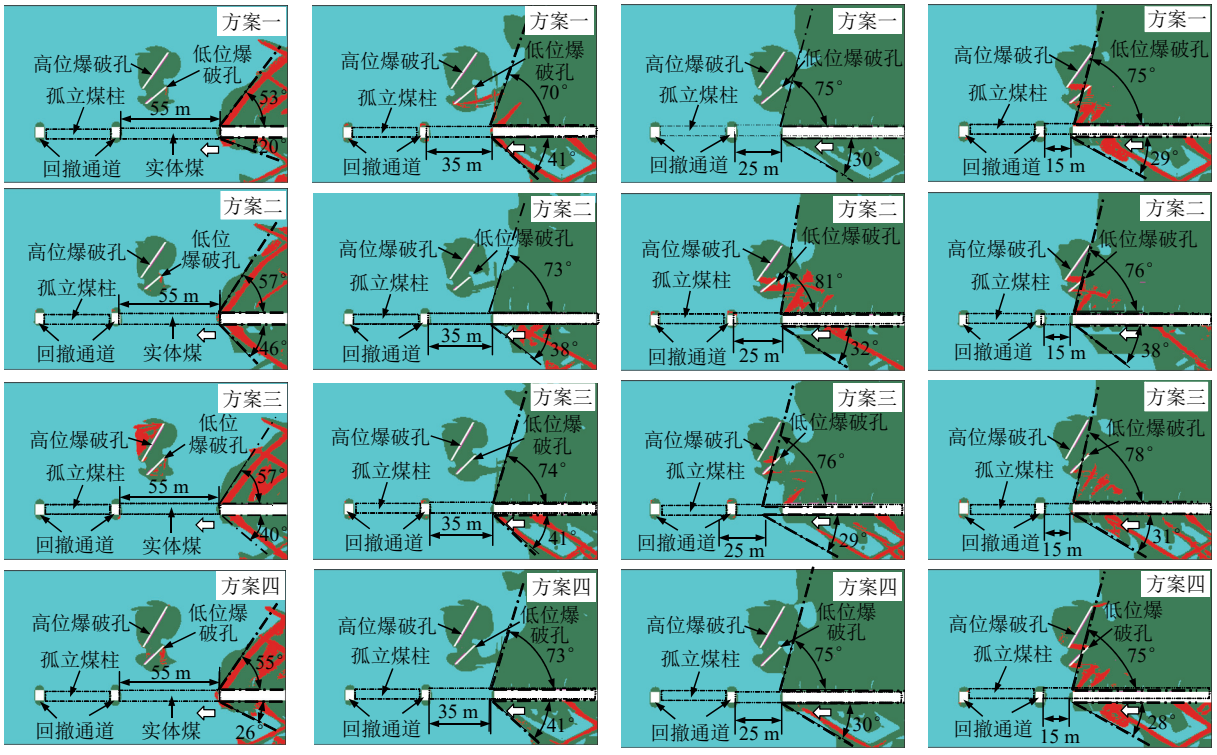
图 10　不同参数“高+低位”顶板方案垂直应力分布特征(单位：Pa)

Fig.10　Vertical stress distribution characteristics of “high+low position” roof scheme with different parameters(unit：Pa)

处应力最低，表现出最小峰值。而在工作面推进至 15 m 时，方案一应力峰值最低，方案二次之，方案三最高，方案四居中。

4.1.2 围岩塑性区对比

不同参数“高+低位”顶板爆破方案的采空区塑性区发育规律整体相似，如图 11 所示：(1) 顶板塑性区发育规律：方案一、三和四随工作面推进夹角逐渐增大，末采端距工作面 55 m 时，方案一增速最小(53°)，方案二和三最大(57°)，方案四为 55°；距回撤通道 15 m 时，方案一和四最小(75°)，方案三最大(78°)；方案二则表现为先增大后减小，在 25 m 处最大(81°)，至 15 m 时降至 76°。(2) 底



(a) 距离 55 m　(b) 距离 35 m　(c) 距离 25 m　(d) 距离 15 m

(a) Distance 55 m　(b) Distance 35 m　(c) Distance 25 m　(d) Distance 15 m

图 11　不同参数“高+低位”顶板方案塑性区分布特征

Fig.11　The plastic zone distribution characteristics of “high+low position” roof scheme with different parameters

板塑性区发育规律：方案一、三和四均呈“先增大后减小”的规律，55 m 处方案一(20°)和方案四(26°)发育最弱，方案二(46°)和三(40°)最强；在 35 m 处三方案夹角均达 41°，随后逐渐减小，至 15 m 时方案一、三、四分别为 29°，31°和 28°；方案二则持续减弱，至 15 m 时角度为 38°。综合比较，4 种爆破方案均能调控末采阶段覆岩塑性区动态分布，但整体方案二干预强度最大。

4.1.3 主回撤通道监测反馈

对 4 种“高+低位”爆破方案的顶板、底板及孤立煤体测点垂直应力进行分析(见图 12～14)，结果表明：(1) 顶板 2 m 处垂直应力随工作面推进先降低后升高，方案一、三、四在顶板 2 m 处的垂直应力接近且高于方案二；顶板 6 与 10 m 处测点应力先升高后降低再升高，其中方案一垂直应力最大，方案二垂直应力最小。(2) 底板 2 m 处测点，方案一、三、四的垂直应力接近且低于方案二；底板 6 与 10 m 处规律相似，均表现为方案四应力最大，方案二应力最小。(3) 位于孤立煤柱 5 m 处的测点结果

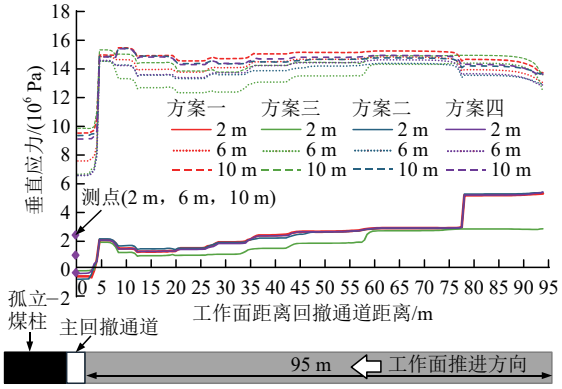


图 12　主回撤通道顶板垂直应力变化

Fig.12　The vertical stress changes on the roof of the main retreat channel

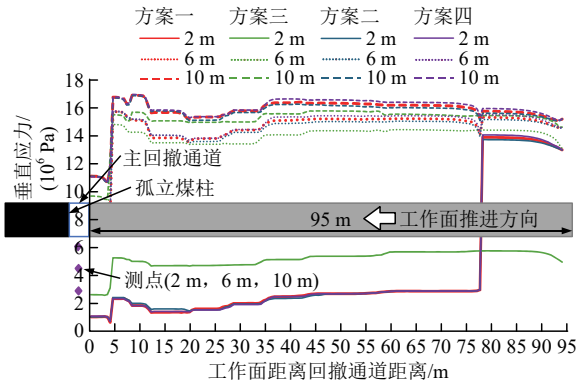


图 13　主回撤通道底板垂直应力变化

Fig.13　The vertical stress variation on the bottom plate of the main retreat channel

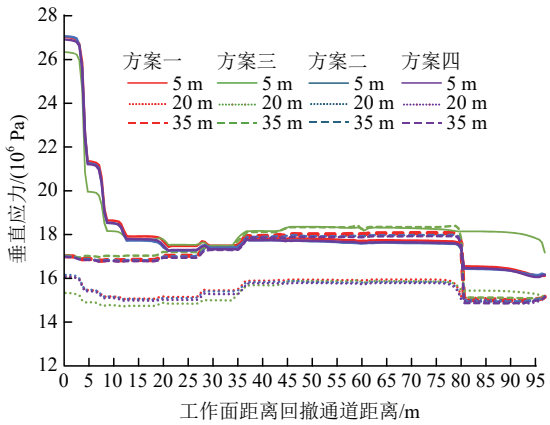


图 14　孤立煤柱测点垂直应力变化

Fig.14　Vertical stress variation of measurement points in isolated coal pillar

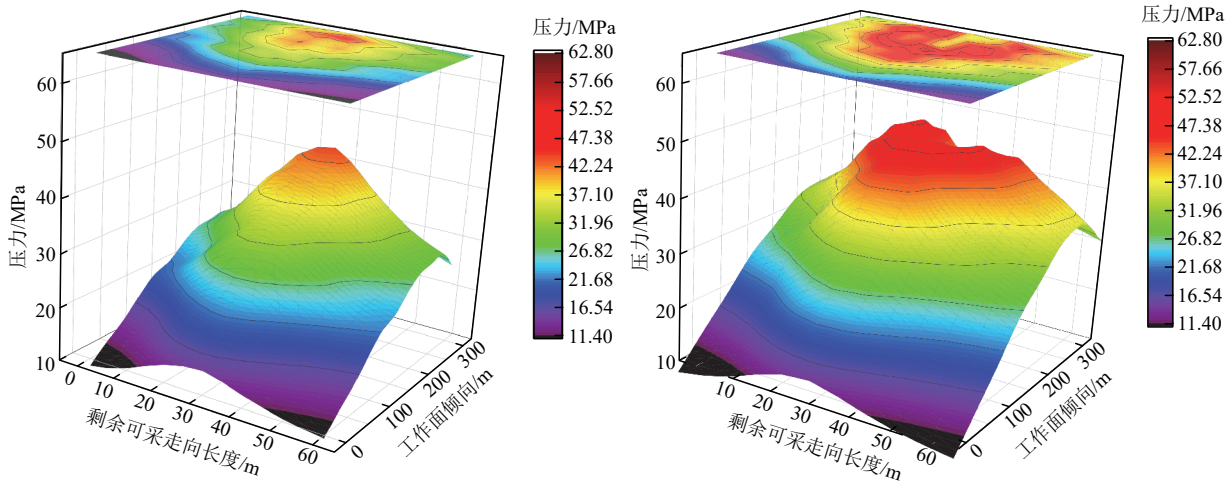
显示，0～20 m 范围内方案二应力最大，20～95 m 范围内方案二应力最小；位于孤立煤体 20 和 35 m 处四方案应力接近。总体而言，方案二在多数位置表现出最佳卸压效果。

综上，利用数值模拟软件研究了末采阶段顶板爆破调控方案防冲效果，分析了不同爆破参数下围岩应力、塑性区分布特征，得到“高+低位”(方案二)顶板爆破调控方案效果最优，工作面围岩应力集中程度更低，塑性区发育更广，为后续末采防冲工程设计提供了参考。

4.2　末采顶板爆破调控技术效果验证

在上述末采顶板爆破调控技术方案(方案二)实施基础上，从末采阶段工作面液压支架阻力、回撤通道煤体应力变化、微震事件监测结果等方面综合分析验证末采阶段顶板爆破调控技术防冲效果。整理末采阶段 0～60 m 工作面液压支架支撑压力数据，如图 15(a)所示，工作面末采至 28～38 m 范围工作面中部压力呈现最大值，压力值基本维持在 30～40 MPa 范围。对比高位单孔爆破调控效果，如图 15(b)所示，末采阶段工作面内液压支架压力峰值、集中程度和其分布范围明显缩小，压力分布状况得到明显改善，证明“高+低位”顶板爆破调控方案能对末采阶段形成更有效的卸压和应力阻断的保护作用。

在工作面采取末采防冲爆破调控技术后，末采期间现场压力显现平稳，末采贯通后现场支护状况良好，仅在主回撤通道煤柱侧肩窝处出现 100～150 mm 的轻微鼓包，主、辅回撤通道顶板、底板均未出现大于 200 mm 的围岩变形，联巷交叉等易形成高应力集中的区域无明显破坏现象，如图 16 所示。在采取顶板爆破调控技术手段后，回撤通道应力集中

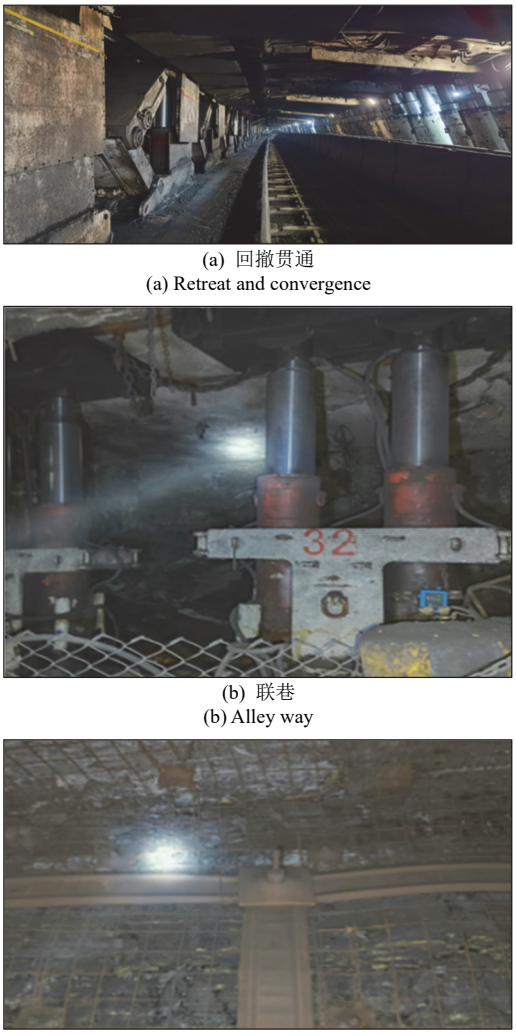


(a) “高+低位”爆破　(b) 高位单孔爆破

(a) “High+low position” blasting　(b) High-position single-hole blasting

图 15　末采阶段工作面液压支架压力分布变化对比

Fig.15　Comparison of pressure distribution changes of hydraulic supports on the working face during the final mining stage



(a) 回撤贯通

(a) Retreat and convergence

(b) 联巷

(b) Alley way

(c) 煤柱肩窝

(c) Coal pillar shoulder cavity

图 16　工作面末采贯通后现场实景图

Fig.16　The actual on-site diagram after the final mining breakthrough of the working face

问题明显改善，钻孔应力监测值最大仅 12.7 MPa，且煤体钻孔应力计监测值变化较平缓，没有出现突增/降的现象，末采期间应力计监测值最大增量仅为 2.0 MPa；较上一工作面末采阶段(距离末采贯通 40 m 范围)，微震事件总频次降低 30%，总能量降低 35%，未出现 10^4 J 及以上事件，说明顶板爆破降低了工作面动载强度。

5　结　论

以复合坚硬顶板工作面末采为工程背景，采用现场调研、理论研究和数值模拟等方法，分析了不同爆破参数下工作面末采阶段围岩应力、塑性区等分布特征。在现场进行了工程应用，经多种监测和现场反馈证明了末采顶板爆破调控技术的防冲效果，主要得到以下结论：

(1) 采用数值模拟方法比较了未爆破、高位单孔爆破以及“高+低位”联合爆破 3 种方案下围岩应力演化及塑性区分布特征，证明了顶板爆破能够显著削弱末采阶段的应力集中效应，其中“高+低位”联合爆破方案效果最优。

(2) 对比分析了 4 种不同参数的“高+低位”爆破方案对围岩应力与塑性区分布的影响，结果表明，当高(低)位孔深、起始高度、2 个倾角分别为 53(33) m，19.3(13.0) m，60°(40°)时，该参数组合效果优于其他方案，工作面围岩应力集中程度更低，塑性区发育更广，为后续末采防冲工程设计提供参考。

(3) 现场应用及监测结果表明，顶板爆破调控

技术能够有效改善末采应力环境，降低动载强度，实现对回撤通道及孤立煤体的保护。

针对复合坚硬顶板工作面末采研究了爆破方案并进行了工程示范；在其他条件的工程应用中应根据顶板厚度、开采厚度等调整孔深、角度等关键参数，以符合现场实际需求；未来研究应结合更精细的爆破裂隙扩展模型和更先进的现场实时监测技术完善顶板爆破控制机制。

参考文献(References)：

[1] 褚　渊，张永强，王襄禹，等. 遗留煤柱下回撤通道高低位顶板联合失稳机制及控制技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报，2023，5(6)：17－27.(CHU Yuan，ZHANG Yongqiang，WANG Xiangyu，et al. Joint instability mechanism and control technology of high and low roof strata of retreat roadway under coal pillar[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering，2023，5(6)：17－27.(in Chinese))

[2] 胡　滨. 浅埋深中厚煤层预掘回撤通道支护技术研究与应用[J]. 煤炭技术，2024，43(1)：1－4.(HU Bin. Research and application of support technology for pre-driven withdrawal channel in medium-thickness coal seam with shallow buried depth[J]. Coal Technology，2024，43(1)：1－4.(in Chinese))

[3] 秦喜文，牟　亮，韩　刚，等. 双回撤通道冲击地压防治技术研究与应用[J]. 煤炭工程，2022，54(3)：73－78.(QIN Xiwen，MOU Liang，HAN Gang，et al. Research and application of rock burst prevention technology with double withdrawal channels[J]. Coal Engineering，2022，54(3)：73－78.(in Chinese))

[4] 张　寅，赵　毅，李　皓. 综采工作面回撤巷强矿压显现机制及控制技术[J]. 煤田地质与勘探，2021，49(2)：110－116.(ZHANG Yin，ZHAO Yi，LI Hao. Mechanism and control of strong ground pressure in fully mechanized mining face[J]. Coal Geology and Exploration，2021，49(2)：110－116.(in Chinese))

[5] 张俊文，董续凯，柴海涛，等. 地质异常区域多工作面开采结构演化及冲击地压防治[J]. 煤炭科学技术，2023，51(2)：95－105.(ZHANG Junwen，DONG Xukai，CHAI Haitao，et al. Structure evolution and rockbursts prevention in multi-face mining in geological anomaly area[J]. Coal Science and Technology，2023，51(2)：95－105.(in Chinese))

[6] 张俊文，董续凯，柴海涛，等. 厚煤层一次采全高低位厚硬岩层垮落致冲机制与防治[J]. 煤炭学报，2022，47(2)：734－744.(ZHANG Junwen，DONG Xukai，CHAI Haitao，et al. Mechanism and prevention of rock burst caused by the collapse of low-level thick hard rock strata at full-height mining face in thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society，2022，47(2)：734－744.(in Chinese))

[7] 白俊杰. 回撤通道防冲断顶爆破设计方案优化及应用[J]. 煤炭工程，2022，54(11)：73－78.(BAI Junjie. Optimization and practice of design scheme of anti scour and fault roof blasting in withdrawal channel[J]. Coal Engineering，2022，54(11)：73－78.(in Chinese))

[8] 窦林名，阚吉亮，李许伟，等. 断顶爆破防治冲击矿压技术体系及效果评价研究[J]. 煤炭科学技术，2020，48(1)：24－32.(DOU Linming，KAN Jiliang，LI Xuwei，et al. Study on prevention technology of rock burst by break-tip blasting and its effect estimation[J]. Coal Science and Technology，2020，48(1)：24－32.(in Chinese))

[9] 赵善坤. 深孔顶板预裂爆破与定向水压致裂防冲适用性对比分析[J]. 采矿与安全工程学报，2021，38(4)：706－719.(ZHAO Shankun. A comparative analysis of deep hole roof pre-blasting and directional hydraulic fracture for rockburst control[J]. Journal of Mining and Safety Engineering，2021，38(4)：706－719.(in Chinese))

[10] 赵善坤. 深孔顶板预裂爆破力构协同防冲机制及工程实践[J]. 煤炭学报，2021，46(11)：3 419－3 432.(ZHAO Shankun. Mechanism and application of force-structure cooperative prevention and control on rockburst with deep hole roof pre-blasting[J]. Journal of China Coal Society，2021，46(11)：3 419－3 432.(in Chinese))

[11] 张俊文，白旭阳，董续凯，等. 煤岩动力灾害结构场孕育演化及调控技术[J]. 煤炭科学技术，2025，53(1)：82－95.(ZHANG Junwen，BAI Xuyang，DONG Xukai，et al. Structural field breeding and evolution and control technology of coal-rock dynamic disasters[J]. Coal Science and Technology，2025，53(1)：82－95.(in Chinese))

[12] 张俊文，宋治祥，刘金亮，等. 煤矿深部开采冲击地压灾害结构调控技术架构[J]. 煤炭科学技术，2022，50(2)：27－36.(ZHANG Junwen，SONG Zhixiang，LIU Jinliang，et al. Architecture of structural regulation technology for rock burst disaster in deep mining of coal mine[J]. Coal Science and Technology，2022，50(2)：27－36.(in Chinese))

[13] 潘立友，史明伟，董文卓，等. 基于复合弱化结构的上覆煤柱区冲击地压防控研究[J]. 矿业安全与环保，2023，50(5)：99－104.(PAN Liyou，SHI Mingwei，DONG Wenzhuo，et al. Study on prevention and control of rock burst in affected area of overlying coal pillar based on composite weak structure[J]. Mining Safety and Environmental Protection，2023，50(5)：99－104.(in Chinese))

[14] 王兆会，孙文超，王雪冰，等. 预制裂隙类岩石试件表面变形场演化与裂隙扩展机制研究[J]. 煤炭科学技术，2023，51(10)：72－82.(WANG Zhaohui，SUN Wenchao，WANG Xuebing，et al. Surface deformation field and fracture propagation mechanism of rock-like specimen with pre-existing fracture[J]. Coal Science and Technology，2023，51(10)：72－82.(in Chinese))

[15] 张　翔，朱斯陶，刘金海，等. 巨厚表土－锯齿断层煤柱组合结构联动失稳机制研究[J]. 岩石力学与工程学报，2025，44(9)：2 391－2 407.(ZHANG Xiang，ZHU Sitao，LIU Jinhai，et al. Linkage instability mechanism of composite structure of super-thick topsoil and saw tooth fault coal pillar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2025，44(9)：2 391－2 407.(in Chinese))

[16] 张　翔，朱斯陶，姜福兴，等. 深部大采高综采面厚硬岩层-煤柱结构失稳诱冲机制研究[J]. 岩土工程学报，2024，46(12)：2 570－2 579.(ZHANG Xiang，ZHU Sitao，JIANG Fuxing，et al. Mechanism of instability induced scour of thick hard rock-coal pillar structure in deep

fully mechanized working face with large mining height[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2024，46(12)：2 570－2 579.(in Chinese))

[17] 张　帅，来兴平，曹建涛，等. 采动围岩能量系统协同演化与韧性调控减冲评估体系构建研究[J]. 金属矿山，2025，(8)：184－192.(ZHANG Shuai，LAI Xingping，CAO Jiantao，et al. Study on coevolution of energy system of mining surrounding rock and construction of impact reduction evaluation system for toughness regulation[J]. Metal Mine，2025，(8)：184－192.(in Chinese))

[18] 闫　才，朱斯陶，彭广林，等. 巨厚土拱-孤岛煤柱结构失稳冲击机制研究[J]. 中国安全生产科学技术，2025，21(2)：44－51.(YAN Cai，ZHU Sitao，PENG Guanglin，et al. Research on rockburst mechanism of structural instability in huge thick topsoil arch-island coal pillar[J]. Journal of Safety Science and Technology，2025，21(2)：44－51.(in Chinese))

[19] 伍永平，罗生虎，闫壮壮，等. 煤岩结构瞬变诱冲机制[J]. 煤炭学报，2025，50(1)：193－208.(WU Yongping，LUO Shenghu，YAN Zhuangzhuang，et al. The mechanism of rockburst induced by coal rock structure transient[J]. Journal of China Coal Society，2025，50(1)：193－208.(in Chinese))

[20] 谭云亮，张修峰，范德源，等. 沿空侧向覆岩结构改性防冲机制与实践[J]. 煤炭学报，2025，50(1)：209－223.(TAN Yunliang，ZHANG Xiufeng，FAN Deyuan，et al. Mechanism and practice of structural modification to lateral overlying strata in gob-side entry for rockburst prevention[J]. Journal of China Coal Society，2025，50(1)：209－223.(in Chinese))

[21] 陈　洋. 深井条带充填开采冲击地压发生机制与防治研究[J]. 岩石力学与工程学报，2024，43(8)：2 079.(CHEN Yang. Rockburst occurrence and control in deep longwall coal panels with backfill skipping mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(8)：2 079.(in Chinese))

[22] 张俊文，邓雪杰，郑通达. 充填开采防治坚硬顶板型冲击地压综述研究[J]. 绿色矿山，2024，2(2)：103－121.(ZHANG Junwen，DENG Xuejie，ZHENG Tongda. A review on hard roof rock burst prevention and control by backfill technology[J]. Journal of Green Mine，2024，2(2)：103－121.(in Chinese))

[23] 王　超，张广超，赵西坡，等. 基于顶板结构特征的冲击危险性评价方法及应用[J]. 采矿与岩层控制工程学报，2024，6(2)：125－135.(WANG Chao，ZHANG Guangchao，ZHAO Xipo，et al. Evaluation method and application of impulse hazard based on roof structure characteristics[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering，2024，6(2)：125－135.(in Chinese))

[24] 崔　峰，张随林，刘旭东，等. 急倾斜巨厚煤层复杂空间结构区微震时空演化规律及诱冲机制[J]. 煤炭学报，2024，49(4)：1 786－1 803.(CUI Feng，ZHANG Suilin，LIU Xudong，et al. Temporal and spatial evolution law of microseisms and induced impact mechanism in complex spatial structure area of steep and extremely thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society，2024，49(4)：1 786－1 803.(in Chinese))

[25] DONG X K，ZHANG J W，ZHANG Y，et al. Multi-parameter monitoring and advanced support research for rockburst hazard area under composite hard roof and its engineering application：A case study[J]. Measurement，2025，249：116999.

[26] ZHANG J W，DONG X K，BAI J J，et al. The mechanism and prevention of rockburst induced by the instability of the composite hard-roof coal structure and roof fractures[J]. Engineering Fracture Mechanics，2024，310：110512.

[27] DONG X K，ZHANG J W，ZHANG S L，et al. Main disaster-causing strata of composite hard roof and bidirectional，high-low position blasting technology for rockburst prevention[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources，2025，https：//doi.org/10.1007/s40948－025－01020－7

[28] 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)：1 469－1 476.(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)：1 469－1 476.(in Chinese))