



移动扫码阅读

DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.20250216

王想刚, 贺虎, 张世范, 等. 空间孤岛岩柱区特厚煤层整体卸压防冲-防突协同控制技术[J]. 煤矿安全, 2025, 56(5): 69-77.

WANG Xianggang, HE Hu, ZHANG Shifan, et al. Integrated pressure relief technology for rock burst and gas outburst coordinated control in ultra-thick coal seams under spatially isolated rock pillar areas[J]. Safety in Coal Mines, 2025, 56(5): 69-77.

空间孤岛岩柱区特厚煤层整体卸压 防冲-防突协同控制技术

王想刚¹, 贺虎², 张世范¹, 薛生华¹, 贺永康², 牛鑫¹, 骆宇³

(1. 塞街煤电集团有限公司 金河煤矿, 甘肃 兰州 730084; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;
3. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 随着煤炭开采深度与开采技术条件复杂性的增加, 部分矿井面临冲击地压和煤与瓦斯突出双重动力灾害, 且呈现相互耦合诱发趋势。以典型冲击-突出矿井为工程背景, 研究了受油页岩开采形成的空间“孤岛岩柱”影响下特厚煤层应力分布规律, 提出了顺层超深大直径钻孔与穿层超高压水力割缝区的区域整体卸压技术。研究结果表明: 油页岩采空区下煤层巷道的垂直应力较低, 均小于 4 MPa, 保护层卸压作用显著; 空间岩柱区域巷道垂直应力峰值接近 20 MPa, 是保护层下方垂直应力的 5.0 倍, 且应力集中范围大, 呈区域高应力状态; 相比于传统“边掘边卸”技术方案, 超前整体卸压降低了巷道周边支承压力峰值, 消除了卸压盲区, 孔、缝周边煤体变形、破裂后, 孔内坍落煤体被及时排出, 卸压区域煤体完整性显著降低, 裂隙发育程度远高于常规卸压, 被完全压实的可能性大大减小, 同时提高了卸压时效性; 整体预卸压状态下, 钻孔直径 200 mm、间距 0.5 m 的情况下, 巷道围岩变形量小于边掘边卸技术方案; 岩柱影响区域内, 巷道掘进与回采期间微震频次与能量均呈现稳定状态, 矿震总能量与非煤柱影响区相比呈下降趋势, 冲击危险等级以弱为主, 测试煤层残余瓦斯含量降低至 4.73 m³/t, 防冲-防突效果显著。

关键词: 冲击地压; 煤与瓦斯突出; 整体卸压; 水力割缝; 复合动力灾害

中图分类号: TD712

文献标志码: B

文章编号: 1003-496X(2025)05-0069-09

Integrated pressure relief technology for rock burst and gas outburst coordinated control in ultra-thick coal seams under spatially isolated rock pillar areas

WANG Xianggang¹, HE Hu², ZHANG Shifan¹, XUE Shenghua¹, HE Yongkang², NIU Xin¹, LUO Yu³

(1. Jinhe Coal Mine, Yaojie Coal and Electricity Group Corporation, Lanzhou 730084, China; 2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
3. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: With the increasing depth of coal mining and the complexity of mining technical conditions, some mines are facing dual dynamic disasters of rock burst and coal and gas outburst, which exhibits a mutually coupled inducing trend. This study took a typi-

收稿日期: 2023-07-28 修回日期: 2024-04-15 责任编辑: 兰莹

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项资助项目(2024ZD1004104); 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3004605); 国家自然科学基金资助项目(52227901)

作者简介: 王想刚(1980—), 男, 甘肃通渭人, 高级工程师, 硕士, 从事煤矿生产方面的技术与管理工作。E-mail: 634378930@qq.com

通讯作者: 贺虎(1985—), 男, 安徽淮北人, 教授, 博士, 从事煤矿动力灾害防治、采矿地球物理等方面的科研与教学工作。E-mail: hehu@cumt.edu.cn

al rock burst and gas outburst coal mine as the engineering background, studied the stress distribution law of extremely thick coal seam under the influence of the space “isolated rock pillar” formed by oil shale mining, and proposed the regional integrated pressure relief technology along the seam with ultra-deep and large diameter drilling and through the ultra-high pressure hydraulic slotting zone. The results indicate that: the vertical stress of the roadway in the coal seam under oil shale goaf is relatively low (all below 4 MPa), demonstrating significant pressure relief effects from protective seams; in spatial rock pillar influencing areas, the vertical peak stress of the roadway approaches 20 MPa, five times higher than that under protective seams and the stress concentration range is relatively larger than normal, which exhibits a state of regional high stress. Compared with traditional “pressure relief along with excavation” modes, integrated pre-pressure relief can reduce peak abutment pressure around roadways, eliminate pressure relief blind zones, significantly decrease the compaction possibility and enhance pressure relief timeliness. In 200 mm borehole diameter and 0.5 m spacing in integrated pressure relief conditions, roadway deformation becomes smaller than that in traditional scenarios; both micro seismic frequency and energy remain stable during roadway excavation and coal mining in rock pillar affected areas, with measured residual gas content decreasing to 4.73 m³/t, demonstrating remarkable combined rock burst and gas outburst prevention effects.

Key words: rock burst; coal and gas outburst; integrated pressure relief; hydraulic slotting; composite dynamic disaster

我国是世界上冲击地压、煤与瓦斯突出灾害最严重的国家之一^[1]。随着煤矿开采深度的增加,煤岩体所处地质环境、应力环境以及开采扰动日益复杂,低瓦斯矿井逐渐向高突矿井演变,无/弱冲击危险逐渐向强冲击危险转变,且冲击-突出呈现相互耦合诱发的趋势^[2]。我国学者在冲击地压、煤与瓦斯突出的机理、监测预警与防治技术上取得了大量研究成果,形成了完整区域与局部相结合的防治措施,取得了显著的防治效果^[3-4]。目前,冲击地压与煤与瓦斯突出常用的区域防治措施主要集中在解放层开采以及合理采掘部署方面。采掘布置形成后主要采用局部防治措施,如煤层大直径钻孔卸压、煤层注水、煤层水力化致裂、煤层卸载爆破、顶板预裂等技术^[5-9]。近年来水力化防治技术在冲击地压和煤与瓦斯突出防治领域得到了巨大发展。郑凯歌等^[10]研究了复合坚硬顶板分段压裂区域防治技术;潘俊锋等^[11]提出对煤层上覆厚硬顶板实施区域水力压裂形成“人造解放层”,并研究了井上下煤层顶板区域压裂装备与技术;康红普等^[12]研究了井下区域水力压裂控制岩层强矿压技术;夏永学等^[13]开展了磨砂射流切顶卸压技术研究;门鸿等^[14]研究了特厚煤层地面水平井分段压裂技术;孙如达等^[15]分析了中高位厚硬顶板长孔水力压裂防冲效果;张永将等^[16]提出了超高压水力割缝-压裂联合控顶卸压技术。研究表明,冲击动力灾害经常发生在因采掘不合理形成的高应力集中区。冲击-突出矿井采用解放层开采、特厚煤层分层开采方法,在地质构造与采掘接续等因素影响下,在空间以及本煤层局部区域会形成“孤岛煤/岩柱”,会极大加剧应力集中程度与动力灾

害发生的潜在风险。段金红等^[17]开展了特厚煤层孤岛煤柱水力扩孔防冲卸压技术;王建辉等^[18]采用多种分析与监测方法,分析了保护层开采遗留煤柱影响区的冲击危险性;曹安业等^[19]分析了不规则工作面矿震规律对冲击危险的影响;杨欢等^[20]针对工作面上覆遗留煤柱区域,采用顶板水力压裂进行超前区域防治,取得较好的防冲效果。

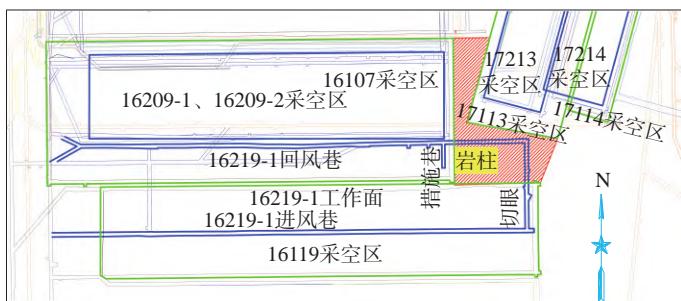
综上,面对高冲击、高突出风险区域煤层巷道掘进,在巷道位置与层位难以改变的条件下,冲击地压区域防治以顶板水力压裂为主,而超高压水力割缝技术则在防突领域应用广泛。受控于井下作业空间与条件,局部卸压措施还是以“边掘边卸”为主。在复杂开采技术条件下,冲击-突出特厚煤层超前整体卸压、协同防控技术研究尚不多见。因此,研究冲击地压、煤与瓦斯突出整体卸压协同防控技术方法,对于实现源头治理、超前治理的目标具有重要工程意义。

1 工程地质条件

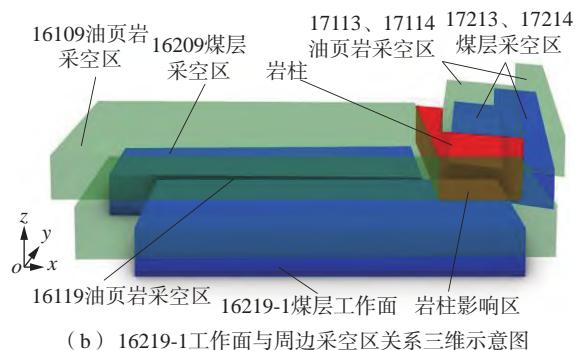
甘肃窑街煤电公司金河煤矿为冲击地压-煤与瓦斯(CO₂)突出矿井,主采侏罗系中统窑街群煤二层与油 A 层(油页岩),油 A 层为煤二层的保护层。煤二层为特厚煤层,平均厚度达 18.91 m,煤层瓦斯主要有害气体组分以 CO₂ 最多,CH₄ 次之,平均瓦斯(CO₂+CH₄)含量为 7.423 m³/t。煤冲击倾向性鉴定结果为具有弱冲击倾向性。16219-1 工作面位于六采区,煤层埋深 594~777 m,煤层厚度 25.04~42.0 m,平均 34.5 m,煤层总体呈北高南低状,煤层倾角 10°~15°,采用综采放顶煤采煤工艺开采第 1 分层,设计采厚 12 m。工作面走向长 584 m,倾

斜宽 120 m。北侧为 16209 采空区，区段煤柱 3~5 m，南侧为实体煤，尚未开采，工作面上部存在 16107、16119 2 个油页岩工作面。16219-1 工作面未完全处于 16107 与 16119 采空区下方，切眼北侧外错布置，呈 122.8 m×108 m 的矩形。16219-1 工作面东北侧为 17113 采空区，回风巷距离采空

区边界平面距离 8~25 m。16107、16119、17113 采空区在 16219-1 工作面切眼区域形成“空间孤岛岩柱”，孤岛岩柱对下方 16219-1 工作面形成加载作用，造成 16219-1 工作面局部区域应力集中，具有较高的冲击与突出危险。16219-1 工作面布置与“空间孤岛岩柱”分布如图 1 所示。



(a) 16219-1 工作面布置以及周边关系图



(b) 16219-1 工作面与周边采空区关系三维示意图

图 1 16219-1 工作面布置与“空间孤岛岩柱”分布

Fig.1 Layout of 16219-1 working face and distribution of spatially isolated rock pillar

2 空间岩柱影响区煤层应力分布规律

采用 FLAC^{3D} 模拟 16219-1 工作面空间孤岛岩柱影响区域煤层应力分布特征，根据工作面地质与开采技术条件进行建模，模型尺寸为 300 m×200 m×85 m ($x \times y \times z$)，共计 89 130 个网格。采用应变软化模型，孤岛岩柱影响区域煤层埋深约 600 m，模型施加均匀载荷为 15 MPa，侧压系数取 1。模型煤岩物理力学参数见表 1。

表 1 模型煤岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of model

coal rock

岩性	层厚/m	密度/ (kg·m ⁻³)	体积 模量/ GPa	剪切 模量/ GPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ MPa	抗拉 强度/ MPa
泥灰岩	6	2 440	8.0	3.9	32	7.40	3.0
油页岩	6	2 600	2.5	2.9	39	6.10	3.9
灰黑砂岩	18	2 100	1.6	1.8	53	0.87	5.5
煤二层	32	1 370	0.6	7.6	28	2.10	1.1
砂砾岩	15	2 590	2.4	2.7	39	1.50	3.4
角砾岩	8	2 400	8.5	4.0	32	7.50	3.2

模型采用分步开挖，按开采时间顺序，对采空区形成时间较早的煤二层 16219-1、16219-2、17213、17214 工作面及油页岩 16107、16113、16114 工作面进行一次性开挖。根据实际采掘接替

正在回采的油页岩 16119 工作面与 16219-1 工作面两巷掘进分步开挖。同时，在 16219-1 回风巷两帮中点进行煤柱区应力监测与分析。油页岩 16119 工作面回采后煤层垂直应力分布如图 2 所示，16219-1 回风巷超前支承压力变化曲线如图 3 所示。

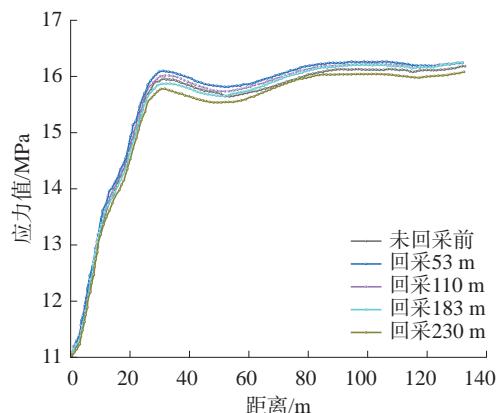


图 2 油页岩 16119 工作面回采后煤层垂直应力分布图

Fig.2 Vertical stress distribution in coal seam after mining in oil shale 16119 working face

由分步开挖结果可知，油页岩 16107 工作面采空后，在 63 m 处，走向垂直应力峰值达到 15.6 MPa；随着 16113 保护层采空后，油页岩遗留区的垂直应力峰值出现下降，但 30 m 范围内的垂直应力增加；煤二层 16209 工作面采空后，油页岩遗留区的垂直应力峰值出现小幅上升；16213 煤层工

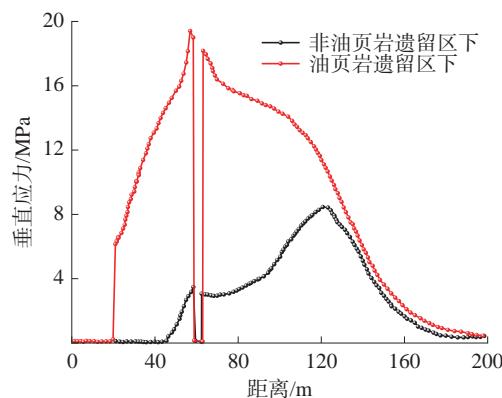


图 3 16219-1 回风巷超前支承压力变化曲线
Fig.3 Advanced abutment stress curves of return airway 16219-1 working face

作面采空后，油页岩遗留区走向垂直应力峰值出现在 84 m 处，为 16.2 MPa。由此可见，油页岩开采后形成一定范围的卸压保护区，但在采空区边缘形成应力集中并向底板岩层传递，当油页岩采空区范围较小的情况下，底板煤二层工作面应力集中程度与范围均较小，当油页岩采空区范围较大时，在底板煤二层中引起的应力集中范围扩大，并形成贯通，导致区域应力升高，并在采空区边缘处形成较高的应力梯度。

由图 2 可知，超前支承压力在 50 m 范围内呈现先上升后降低趋势，与常规掘进工作面超前支承压力分布相似，但其峰值距迎头 30 m，峰值距离高于常规掘进工作面。当油页岩 16119 工作面回采 90 m 时，此时油页岩遗留区呈三面临空的孤岛状态，煤二层工作面运输巷超前支承压力峰值显著增加，即空间孤岛岩柱的形成过程伴随应力集中。

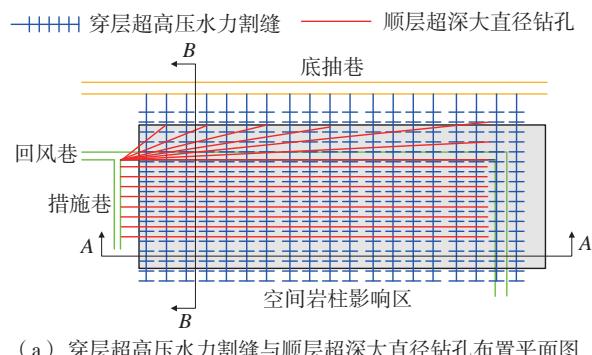
由图 3 可知：非遗留区下巷道的垂直应力较低，均小于 4 MPa，保护层卸压作用显著；空间岩柱区域巷道垂直应力峰值接近 20 MPa，远大于非遗留区下巷道垂直应力峰值，发生冲击的危险性大大增加。

3 空间岩柱下煤层全区域卸压技术

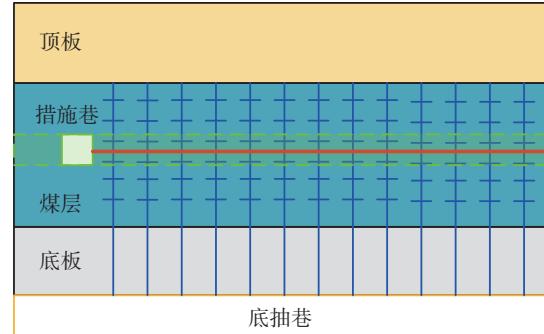
3.1 全区域卸压技术与原理

岩柱影响区域整体卸压技术方案示意图如图 4 所示。

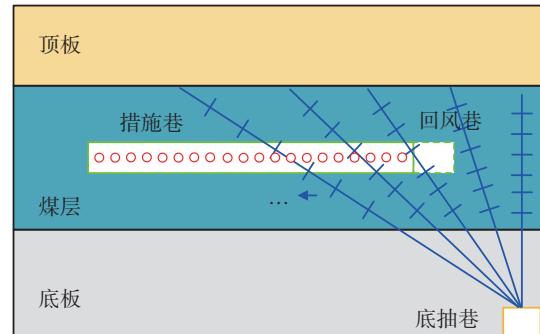
根据模拟结果可知，空间孤岛岩柱影响下，煤二层煤体整体处于较高应力集中状态，岩柱边



(a) 穿层超高压水力割缝与顺层超深大直径钻孔布置平面图



(b) 穿层超高压水力割缝与顺层超深大直径钻孔布置A-A剖面图



(c) 穿层超高压水力割缝与顺层超深大直径钻孔布置B-B剖面图

图 4 岩柱影响区整体卸压技术方案示意图

Fig.4 Integrated pressure relief scheme in rock pillar influence zone

缘应力梯度大，具有整体失稳冲击的危险性。如果采取传统“边掘边卸”的方式，难以满足安全掘进与回采需要。因此，提出对空间孤岛岩柱影响区域煤体进行全区域整体卸压技术方案，充分利用岩柱影响区域周边的底板岩层底抽巷以及煤层措施巷，超前进行全区域整体卸压。技术方法为顺层超深大直径钻孔与穿层超高压水力割缝，水力割缝同时起到消突作用。

掘进之前对高应力岩柱影响区域进行整体卸压后，煤体由于裂纹发育强度降低甚至塌落形成塌孔，煤体塑性区面积大大增加，强度降低，最

终由破裂区和塑性区组成的近似“橄榄形”的破坏结构。

为对比“边掘边卸”(方案 1)与全区域超前整体卸压(方案 2)的差异,采用数值模拟分析 2 种方案下的巷道周边应力分布。不同方案下巷道周边应力分布如图 5 所示。

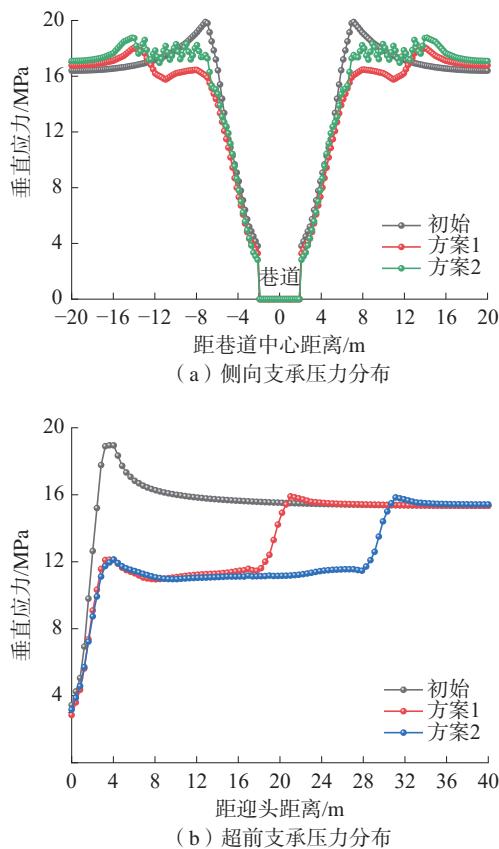


图 5 不同方案下巷道周边应力分布

Fig.5 Stress distribution around the roadway under two different technologies

由图 5 可知:

1)不采取卸压措施时,巷帮垂直应力峰值在 7 m 处,约为 19.9 MPa;采取方案 1 时,巷道侧向支承压力峰值发生显著降低和转移,巷帮应力峰值距巷帮约 14 m,约为 18.1 MPa;采取方案 2 时,巷道侧向支承压力峰值发生显著降低和转移,巷帮应力峰值在 14 m 处,约为 18.7 MPa,可见“边掘边卸”与超前全区域整体卸压技术对巷道侧向支承压力影响相差不大。

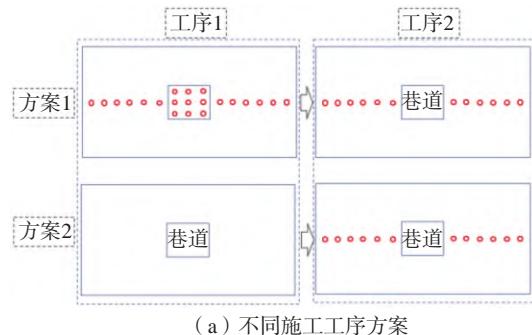
2)不采取卸压措施时,巷道超前支承压力峰值为 19.5 MPa,超前迎头约 5 m;采取方案 1 与方案 2 后,巷道超前支承压力峰值呈现双峰分布,

第 1 峰值点距离巷道迎头约 5 m,峰值强度仅为约 12 MPa,比未卸压状态显著降低;2 种卸压方案第 2 峰值点分别距迎头 22 m 与 32 m,峰值大小均为 16 MPa,同样远小于未卸压状态。

可见,采用全区域超前整体卸压技术方案,一方面降低了巷道周边支承压力峰值,另一方面进一步将压力峰值向深部转移,消除卸压盲区,从而整体降低了冲击危险性。

3.2 不同工序下应力与巷道变形特征

不同施工工序下巷道周边应力分布如图 6 所示。



(a) 不同施工工序方案

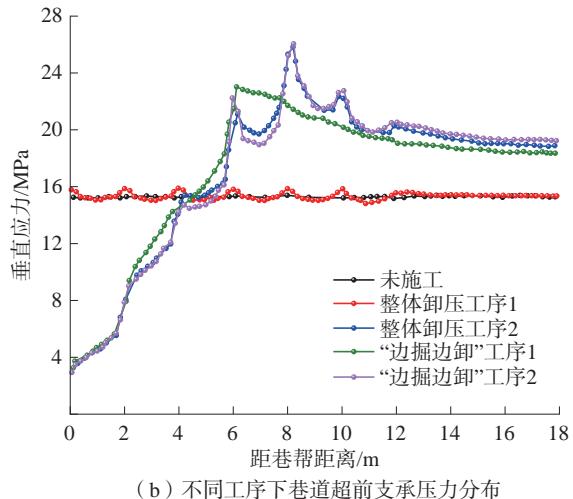


图 6 不同施工工序下巷道周边应力分布

Fig.6 Stress distribution around the roadway under different pressure relief sequences

“边掘边卸”状态下,煤层大直径钻孔卸压孔深有限,一般在 20~30 m,钻孔周边煤体在原岩应力与采动应力叠加作用下,发生变形与破坏。在高应力状态下,孔壁周边煤体发生剥离与孔内冲击,造成吸钻、卡钻情况,当煤体富含瓦斯气体且相对松软时,钻孔极易压实,应力重新恢复至原有水平,从而丧失卸压作用。当采用顺层超深钻孔结合超高压水力割缝进行整体卸压时,孔、

缝周边煤体变形、破裂后，孔内坍落煤体被及时排出，卸压区域煤体完整性大大降低，裂隙发育程度远高于常规卸压，完全压实的可能性大大降低。随着钻孔、裂缝的持续变形，煤体积聚的弹性能与瓦斯气体被持续不断的稳定释放，消除了潜在的冲击与突出危险源，实现了源头治理。同时，超前整体卸压施工先于巷道掘进，对煤体应力的改变也不同于传统卸压方式。

整体卸压施工序 1 时，每个钻孔上方 1 m 处的垂直应力降低范围约 1.4 m，降低范围明显比升高范围大；对于“边掘边卸”工况下，先开挖巷道后，应力重分布瞬时完成，形成支承压力，巷帮垂直应力峰值可以达到 23 MPa，应力集中程度高，一方面形成了冲击源，另一方面也加大了卸压钻孔施工的难度与潜在风险。2 种工况下施工序 2 方案，应力峰值转移效果差异不明显，但整体卸压对于峰值应力降低效果要强于“边掘边卸”工况，应力峰值多降低了 0.4 MPa。可以看出，采用区域整体卸压技术，煤层整体应力降低，消除了冲击与突出的高应力集中条件，同时钻孔施工难度大大降低，卸压工程安全性显著提高。

整体卸压也面临过度卸压带来的煤体破碎以及掘进过程中围岩出现大变形问题。在模拟过程中，通过监测巷道围岩变形，得到 2 种工况下巷道顶底板移近量与巷道两帮变形量。不同卸压方案下巷道的变形量如图 7 所示。

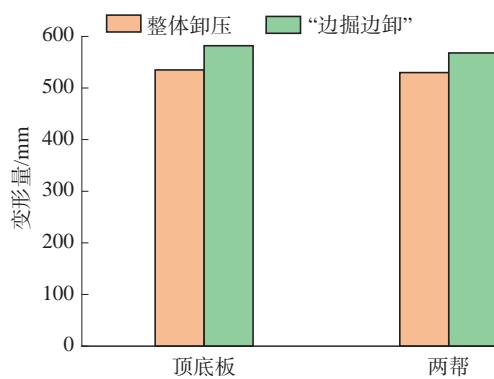


图 7 不同卸压方案下巷道的变形量
Fig.7 Roadway deformation under different pressure relief schemes

由图 7 可知：当整体卸压参数为钻孔直径 200 mm、间距 0.5 m、距巷帮距离 1 m 时的高强度卸压情况下，整体卸压巷道顶底板及两帮变形量为 535 mm 和 530 mm；“边掘边卸”工况下，巷道顶

底板及两帮变形量为 582 mm 和 568 mm；由于整体卸压使煤体应力降低，巷道掘进后，其顶底板移近量与两帮变形量均小于“边掘边卸”的被动卸压方式。

3.3 全区域卸压现场实施参数

1)顺层超深大直径钻孔卸压技术方案。利用回风巷迎头与措施巷，向空间岩柱影响区域实施顺层超深大直径钻孔卸压。掘进迎头正前方沿巷道掘进方向布置 3 个远距离定向卸压孔，孔深 186 m，孔间距 1.2 m 左右，均匀布置在迎头前方，孔径 150 mm，孔口距巷道底板 0.5~1.0 m。回风巷右侧受岩柱影响区域在措施巷内实施钻孔，距离回风巷帮不大于 5 m，与巷道走向平行布置远距离定向大直径卸压孔，钻孔间距 2 m，孔深 186 m，孔径 150 mm。回风巷左侧，在巷道迎头实施，钻孔开孔间距 0.2 m，终孔间距不大于 6 m，每隔 6 m 设计 1 组，每组设计 8 个钻孔，钻孔孔径不小于 120 mm。

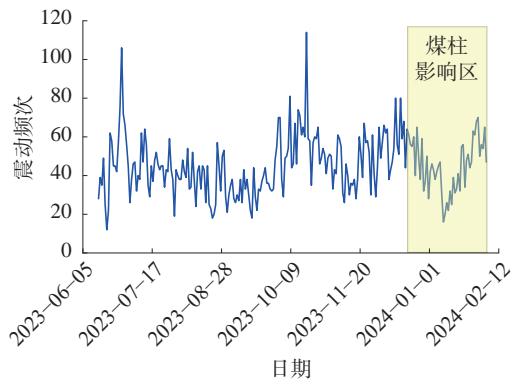
2)超高压水力割缝技术方案。16219-1 回风巷条带割缝增透卸压措施，采用在 1475 南总回风巷施工穿层钻孔，控制 16219-1 回风巷巷道轮廓线外各 20 m 范围，穿层钻孔按顶板终孔点 5 m×5 m 设计，每间隔 5 m 布置 1 排钻孔，每排钻孔布置 12 个，钻孔深度 72~88 m，岩孔段长度 45~55 m，钻孔孔径 113 mm。底板穿层钻孔施工范围为 1475 南总回风巷 H20 测点以西 107 m 至 H20 测点以东 24 m 区域，控制 16219-1 回风巷煤巷条带长度 131 m，共计施工钻孔 26 排、312 个穿层钻孔。1475 南总回风巷穿层钻孔煤孔段每间隔 2.0 m 切割 1 次，割缝压力 80~100 MPa、单刀割缝时间 10~15 min，以出煤量 0.3 t 为合格标准。

3.4 防冲-防突效果检验

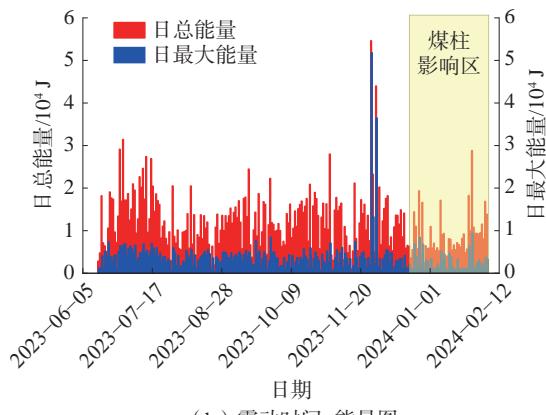
16219-1 回风巷于 2023 年 6 月 15 日开始掘进，2023 年 11 月 20 日进入空间孤岛岩柱影响区域，2024 年 2 月 5 日掘进完成。2024 年 5 月 4 日开始推采，2024 年 7 月 8 日安全回采出空间孤岛岩柱影响区域。在 16219-1 工作面回风巷尚未进入煤柱影响范围内时，在巷道迎头、措施巷内施工大直径钻孔，在底抽巷实施煤体超高压水力割缝技术。利用矿井装备 SOS 微震监测系统，对掘进过程中诱发煤岩体破裂震动事件进行实时监测，用以分析冲击地压防治效果。

3.4.1 掘进期间

掘进期间矿震频次和能量时序图如图 8 所示。



(a) 震动时间-频次图



(b) 震动时间-能量图

图 8 掘进期间矿震频次和能量时序图

Fig.8 Time series diagrams of mine earthquake frequency and energy during excavation

1) 非煤柱影响区。矿震总次数 8 502 次, 日平均矿震次数 45 次, 总能量为 2.4×10^6 J; 能量 10^3 J 至 10^4 J 矿震 495 次; 能量 10^4 J 以上矿震 2 次, 最大为 5.46×10^4 J。

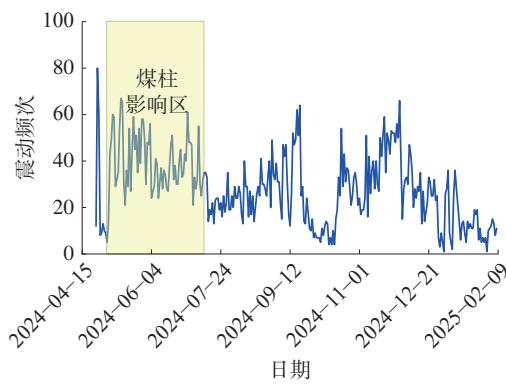
2) 煤柱影响区。矿震总次数 2 148 次, 日平均矿震次数 45 次, 总能量为 4.27×10^5 J; 能量 10^3 J 至 10^4 J 矿震 53 次; 无能量 10^4 J 以上矿震。

煤柱影响区与非煤柱影响区相比, 矿震频次有所下降, 总能量也有所降低, 尤其是高能量矿震事件发生次数急剧减少。可以看出, 在煤柱影响区域掘进, 冲击地压防治取得了较好的效果, 为井下作业人员提供了安全保障。

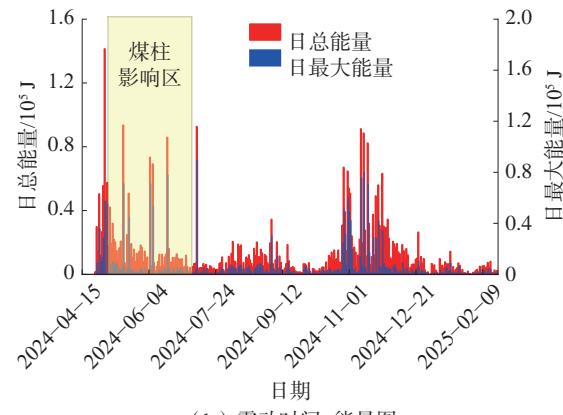
3.4.2 回采期间

煤柱影响区与非煤柱影响区相比, 回采期间矿震频次和能量时序图如图 9 所示。

1) 非煤柱影响区。矿震总次数 5 843 次, 日平均矿震次数 25 次, 总能量为 2.62×10^6 J; 能量 10^3 J 至 10^4 J 矿震 218 次; 能量 10^4 J 以上矿震 28 次,



(a) 震动时间-频次图



(b) 震动时间-能量图

图 9 回采期间矿震频次和能量时序图

Fig.9 Time series of mine tremor frequency and energy during excavation

最大为 8.95×10^4 J。

2) 煤柱影响区。矿震总次数 2 658 次, 日平均矿震次数 40 次, 总能量为 1.11×10^6 J; 能量 10^3 J 至 10^4 J 矿震 59 次; 能量 10^4 J 以上矿震 5 次, 最大为 7.75×10^4 J。

由图 9 可以看出, 矿震总能量有所降低, 10^3 J 以上的矿震发生次数明显减少, 矿震最大能量相较于非煤柱影响区也略有下降, 说明在煤柱影响区回采期间, 煤岩体内的积聚的能量得到了一定释放, 应力集中现象有所缓解, 冲击地压防治效果显著。

利用冲击地压风险多参量智能判识技术, 得到的 16219-1 工作面回采期间风险指标趋势如图 10 所示。

由图 10 可以看出: 16219-1 工作面刚开始回采时, 风险等级达到了峰值, 危险程度较高; 当工作面回采煤柱区域时, 综合指标趋势逐渐下降, 以弱风险为主, 回采期间的安全性大大提高。

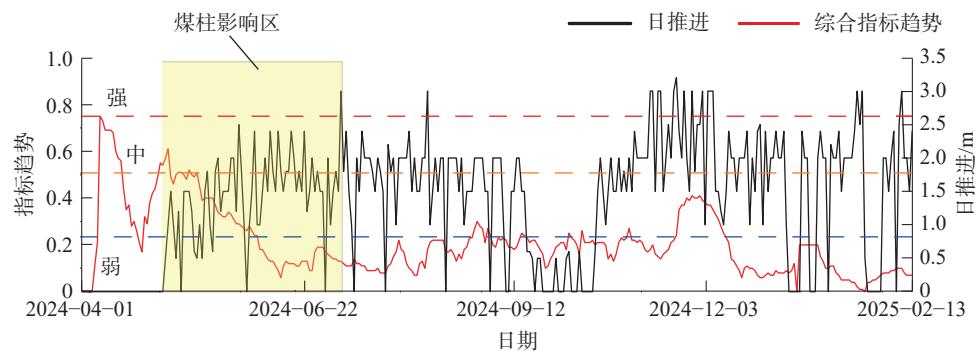


图 10 工作面回采期间风险指标趋势图

Fig.10 Rock burst risk indicators during working face mining

对于防突效果检验，采用每隔 20 m 施工 1 个穿层效检钻孔，测试了 23 个煤样的残余瓦斯(CO_2)含量，煤层最大残余瓦斯(CO_2)含量为 $4.73 \text{ m}^3/\text{t}$ ，瓦斯含量明显下降，达到了防突要求与效果。

4 结语

1) 空间孤岛岩柱影响下，下方煤层应力集中程度高，岩柱下方与解放层下方最大垂直应力比值可达 5.0 以上，且应力集中区域范围大，呈现整体高应力状态，冲击地压与煤与瓦斯突出风险显著高于其他区域。

2) 相比于传统“边掘边卸”技术方案，超前整体卸压降低了巷道周边支承压力峰值，消除了卸压盲区，同时被完全压实的可能性大大降低，提高了卸压时效性。

3) 整体卸压状态下，通过优化卸压参数，钻孔直径 200 mm、间距 0.5 m 的情况下，巷道围岩变形量小于“边掘边卸”技术方案。

4) 现场采用顺层超深大直径钻孔与穿层超高压水力割缝技术，对空间岩柱影响区域高应力煤体进行整体卸压后，掘进与回采期间，微震频次与能量均处于较低水平，残余瓦斯(CO_2)含量符合要求，实现了复合灾害协调防治。

参考文献(References):

- [1] 袁亮, 张通, 王玥晗, 等. 深部煤炭资源安全高效开采科学问题及关键技术[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 1–12.
YUAN Liang, ZHANG Tong, WANG Yuehan, et al. Scientific problems and key technologies for safe and efficient mining of deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 1–12.
- [2] 赵龙, 贺虎. 瓦斯压力对采场支承压力的影响及突出-

冲击协同防控[J]. 煤矿安全, 2024, 55(5): 19–27.

ZHAO Long, HE Hu. Influence of gas pressure on abutment stress and prevention of gas-rock burst composite disaster[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(5): 19–27.

- [3] 袁亮, 王恩元, 马衍坤, 等. 我国煤岩动力灾害研究进展及面临的科技难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1825–1845.

YUAN Liang, WANG Enyuan, MA Yankun, et al. Research progress of coal and rock dynamic disasters and scientific and technological problems in China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1825–1845.

- [4] 欧阳振华, 许乾海, 张宁博, 等. 煤矿防冲安全性分类赋权评价方法及应用[J]. 煤矿安全, 2024, 55(10): 82–90.

OUYANG Zhenhua, XU Qianhai, ZHANG Ningbo, et al. Classification and weighting evaluation method for rock burst prevention safety and its application in coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(10): 82–90.

- [5] 潘一山, 宋义敏, 刘军. 我国煤矿冲击地压防治的格局、变局和新局[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(9): 2081–2095.

PAN Yishan, SONG Yimin, LIU Jun. Patterns, changes and new situation of coal mine rockburst prevention and control in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(9): 2081–2095.

- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 赵善坤, 王炳钦, 苏振国, 等. 坚硬厚顶板岩层定向长钻孔水力压裂防冲技术及应用[J]. 煤矿安全, 2024, 55(12): 10–21.
ZHAO Shankun, WANG Bingqin, SU Zhenguo, et al. Technology and application of long directional drilling hydraulic fracturing for preventing rock burst in thick and hard roof[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(12): 10–21.
- [9] 杜学领. 防治冲击地压的钻孔卸压技术研究进展与展望[J]. 煤矿安全, 2024, 55(11): 28–40.
DU Xueling. Research progress and prospects of drill-hole destressing in the prevention of rock burst[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(11): 28–40.
- [10] 郑凯歌, 袁亮, 杨森, 等. 基于分区弱化的复合坚硬顶板冲击地压分段压裂区域防治研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(2): 322–333.
ZHENG Kaige, YUAN Liang, YANG Sen, et al. Study on prevention and control of rock burst staged fracturing area of composite hard roof based on zoning weakening[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 322–333.
- [11] 潘俊锋, 康红普, 闫耀东, 等. 顶板“人造解放层”防治冲击地压方法、机理及应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 636–648.
PAN Junfeng, KANG Hongpu, YAN Yaodong, et al. The method, mechanism and application of preventing rock burst by artificial liberation layer of roof[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 636–648.
- [12] 康红普, 冯彦军, 张震, 等. 煤矿井下定向钻孔水力压裂岩层控制技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 31–44.
KANG Hongpu, FENG Yanjun, ZHANG Zhen, et al. Hydraulic fracturing technology with directional boreholes for strata control in underground coal mines and its application[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 31–44.
- [13] 夏永学, 张晨阳, 杜涛涛, 等. 磨砂射流轴向切顶压裂工艺研发及应用[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S1): 36–44.
XIA Yongxue, ZHANG Chenyang, DU Taotao, et al. Process research and application of axial roof cutting technology of abrasive jet and fracture[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S1): 36–44.
- [14] 门鸿, 赵华全, 窦桂东, 等. 特厚煤层地面 L 型水平井分段压裂技术应用研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(7): 50–58.
- MEN Hong, ZHAO Huaquan, DOU Guidong, et al. Research on the application of stage fracturing technology of L-shaped horizontal well in extra-thick coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(7): 50–58.
- [15] 孙如达, 夏永学, 高家明. 中高位厚硬顶板长孔水力压裂防冲效果研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(7): 69–77.
SUN Ruda, XIA Yongxue, GAO Jiaming. Study on anti-impact effect of hydraulic fracturing for long holes in medium and high thick hard roof[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(7): 69–77.
- [16] 张永将, 季飞, 赵同彬, 等. 临空巷道坚硬顶板水力割缝-压裂联合控顶卸压技术[J]. 煤炭学报, 2024, 49(12): 4739–4751.
ZHANG Yongjiang, JI Fei, ZHAO Tongbin, et al. Theoretical and applied research on hydraulic slit-fracture joint roof control and pressure relief of hard roof in goaf roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(12): 4739–4751.
- [17] 段金红, 秦子晗, 金建成, 等. 特厚煤层孤岛煤柱水力扩孔防冲卸压技术研究[J]. 煤炭工程, 2024, 56(2): 81–86.
DUAN Jinhong, QIN Zihan, JIN Jiancheng, et al. Hydraulic reaming technology for anti-burst and pressure relief of isolated coal pillar in extra-thick coal seam[J]. Coal Engineering, 2024, 56(2): 81–86.
- [18] 王建辉, 闫耀东, 张永涛, 等. 保护层开采上覆遗留煤柱影响区冲击危险性分析[J]. 煤炭工程, 2023, 55(10): 61–66.
WANG Jianhui, YAN Yaodong, ZHANG Yongtao, et al. Rock burst risk in the influence zone of overlying residual coal pillar during protective seam mining[J]. Coal Engineering, 2023, 55(10): 61–66.
- [19] 曹安业, 赵书宁, 孙伟, 等. 不规则工作面开采矿震活动规律及其致冲风险控制研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(7): 1–10.
CAO Anye, ZHAO Shuning, SUN Wei, et al. Research on law of shock bump activity in irregular face and control of inducing rock burst risk[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(7): 1–10.
- [20] 杨欢, 郑凯歌, 李彬刚, 等. 工作面过上覆遗留煤柱致灾机理及超前区域防治技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 46–54.
YANG Huan, ZHENG Kaige, LI Bingang, et al. Disaster mechanism during passing of working face under overlying remnant coal pillar and advanced regional prevention technology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 46–54.