



移动扫码阅读

张传玖,杜涛涛,李红平,等.坚硬顶板工作面高静载型冲击地压防治研究[J].煤炭科学技术,2019,47(3): 112-119.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.03.016

ZHANG Chuanjiu, DU Taotao, LI Hongping, et al. Research on rock burst prevention of high static coal seam in hard roof working face[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 112-119. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.03.016

## 坚硬顶板工作面高静载型冲击地压防治研究

张传玖<sup>1</sup>,杜涛涛<sup>2,3</sup>,李红平<sup>1</sup>,贾兵兵<sup>1</sup>

(1. 神华新疆能源有限责任公司 宽沟煤矿, 新疆 乌鲁木齐 830027; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 3. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013)

**摘要:**为研究坚硬顶板综放工作面冲击地压的主控因素和防治技术,采用微震监测系统和冲击地压应力监测系统通过分源监测分析,研究了工作面冲击地压发生的主控因素,并针对主控因素开展了防冲击地压实践。结果表明:冲击地压主控因素为高静载、强矿震和低支护强度。实体煤侧静载为30.16~84.48 MPa、煤柱静载为27.84~41.04 MPa,易达到发生冲击地压临界载荷;顶板破断前后,常引起高能事件的发生,以动载的形式作用,加剧煤体的应力集中;多因素使得发生冲击显现的巷道变形区域的支护强度比较低。开展了现场控制实践,煤体卸压分阶段多轮动态卸压,对顶板进行深孔预裂爆破,采用锚索梁加强支护,措施实施后大能量矿震发生时,提高了巷道抵抗冲击能力,降低了矿震诱发巷道变形的频次和强度。

**关键词:**微震;冲击地压防治;高静载;低支护强度

**中图分类号:**TD324

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-2336(2019)01-0112-08

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

ZHANG Chuanjiu<sup>1</sup>, DU Taotao<sup>2,3</sup>, LI Hongping<sup>1</sup>, JIA Bingbing<sup>1</sup>

(1. Kuangou Coal Mine, Shenhua Xinjiang Energy Co., Ltd., Urumqi 830027, China; 2. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 3. Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to study the main control factors and prevention techniques of rock burst in hard roof fully mechanized top coal caving mining face, microseismic monitoring system and rock burst monitoring system were used to study the main controlling factors of rock burst in the working face. The results show that the main factors of rock burst are high static load, strong mine shock and low support strength. The static load of the solid coal is 30.16~84.48 MPa and the static load of the coal pillar is 27.84~41.04 MPa, which is easy to reach the critical stress of rock burst. Events with high energy often occur before and after the roof break, and the stress concentration of the coal body is intensified by the dynamic load. Many factors made the supporting strength of roadway bump area relatively low. The field control practice was carried out, multiple stages of the coal seam blasting released stress, the roof was subjected to deep-hole pre-splitting blasting and the anchor cable beam was used to strengthen the support. When large energy mine earthquake happened, the roadway bump resistance ability was improved. The frequency and intensity of deformation induced by mine earthquakes were greatly reduced.

**Key words:** microseism; rock burst prevention; high static load; low support strength

## 0 引言

坚硬顶板是煤矿冲击地压主要致灾因素之一,坚硬顶板易使煤体形成静载集中,当顶板破断运动产生矿震动载可能诱发冲击显现,也可导致其他形式的灾害,如矿井突水、煤与瓦斯突出、冒顶等。窦林名等<sup>[1-2]</sup>研究了坚硬顶板的关键层运动及破断对

冲击地压的影响,得到煤层上方坚硬、厚层砂岩顶板是影响冲击地压发生的主要因素之一;吕进国等<sup>[3]</sup>研究了巨厚坚硬顶板条件断层诱发冲击地压的机制,认为坚硬顶板的大面积活动为冲击地压的发生提供了动载条件;李新元等<sup>[4]</sup>建立了坚硬顶板初次断裂力学结构模型,分析认为离工作面距离越近,弹性梁的变形量和弯矩越大,积聚的弹性能量越

收稿日期:2018-10-03;责任编辑:朱恩光

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804209)

作者简介:张传玖(1985—)男,四川达州人,工程师,现任神华新疆能源有限责任公司宽沟煤矿副矿长。E-mail:408269210@qq.com

多,坚硬顶板断裂后,释放的能量也越多。坚硬顶板断裂后发生压缩、反弹的空间区域,是产生冲击的震源区域。苗小虎等<sup>[5]</sup>提出了矿震诱发冲击地压的震动破坏机制假设;曹安业等<sup>[6]</sup>分析了动静载组合作用下巷道煤体的冲击破坏机理。针对坚硬顶板控制,牟宗龙等<sup>[7]</sup>采用顶板爆破方法提前释放顶板聚集的弹性能进行冲击地压解危;何江等<sup>[8]</sup>针对薄煤层坚硬顶板提出了切顶巷顶裂顶板防治冲击地压技术。王金鑫<sup>[9]</sup>通过现场试验研究得到深孔预裂爆破对顶板的弱化作用明显,可降低相关灾害的发生性,增加顶煤回收效益。蒋军军等<sup>[10]</sup>认为动载冲击地压的发生需要一定的静载基础,静载水平越高,动载的扰动作用越明显,发生冲击地压的概率越大;动载损伤不同于静载损伤,损伤量的最大值取决于动静载的耦合值。窦林名等<sup>[11]</sup>提出静载防治主要从降低应力集中程度以及将应力峰值向煤体深部转移,而动载可从控制和破坏煤岩体的结构,减小煤岩体的运动程度等方面进行考虑。姜耀东等<sup>[12]</sup>等提出3类冲击地压防治技术;何江等<sup>[13]</sup>将坚硬顶板主控作用下,发生在工作面和巷道中的冲击地压均划分为层间错动型和煤壁失稳型2种类型。陆菜平等<sup>[14]</sup>研究了坚硬顶板破断的前兆信息;潘俊锋<sup>[15]</sup>提出了基于冲击启动理论的坚硬顶板控制方法;高明仕等<sup>[16]</sup>建立了强弱强(3S)结构力学模型,提出防范措施要通过减小外界震源载荷、合理设置弱结构、提高支护强度等。还有学者提出了坚硬顶板的控制技术,包括浅孔爆破<sup>[17]</sup>、水力压裂<sup>[18]</sup>等。

综上,坚硬顶板在冲击地压发生过程具有重要作用,同时具有独特性,不同坚硬顶板条件冲击地压发生规律及防治技术不同,为更好开展坚硬顶板条件冲击地压防治工作,针对具体坚硬顶板条件进行分析。笔者针对新疆某矿浅部工作面赋存多层坚硬

顶板开采过程,冲击地压显现日益严重,结合防冲实践过程遇到的3个特殊性进行研究,即显现发生区域、震源位置和煤体应力具有特殊性,开展现场监测与实践研究。

1 工作面概况

I010203工作面东至运输上山保护煤柱,南至井田边界,北至I010201工作面,之间留设煤柱15 m;工作面运输巷水平标高为+1 318 m,工艺巷水平标高为+1 339 m,回风巷水平标高为+1 365 m;工作面对应地面标高为+1 612 m—+1 660 m。I010203工作面倾斜长度192 m,可采走向长度1 469 m,割煤高度3.2 m,放煤厚度6.3 m,工作面倾角平均14°。I010203工作面上部40 m为已开采的I010405工作面采空区,I010201工作面上部40 m为已开采的I010403工作面采空区如图1所示。

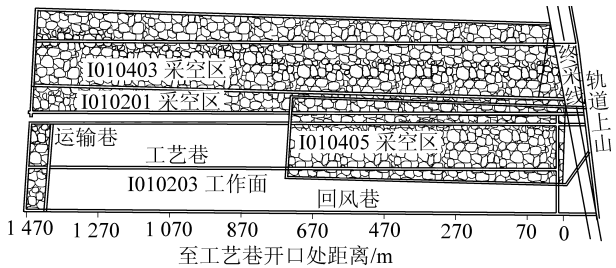


图1 工作面布置

Fig. 1 Arrangement of working face

根据B<sub>2</sub>煤层冲击倾向性鉴定结果,煤层上、中、下部单轴抗压强度分别为24.14、34.37、19.10 MPa,细粒砂岩直接顶,厚19.3 m,单轴抗压强度平均115.25 MPa。根据地应力测试结果,矿井最大主应力在12.8~13.9 MPa;中间主应力在6.5~8.1 MPa;最小主应力在5.5~7.37 MPa;最大主应力方向在184°左右,主应力与水平面的夹角皆为近水平方向(-9.9°~3.4°),煤层顶底板岩层特征见表1。

表1 煤层顶板岩层特征

Table 1 Characteristics of roof and coal seam

序号	岩性	厚度/m	描述
11	细粒砂岩	26.0	灰白色,细砂结构,层状结构,致密坚硬,钙质胶结
10	砂质泥岩	6.0	灰色,泥质结构,层状构造,以泥岩为主
9	粗粒砂岩	7.6	灰色,粗砂结构,层状构造,钙质胶结
8	B <sub>4</sub> <sup>2</sup> 煤层	1.5	黑色,阶梯状断口,层状构造,坚硬,垂直裂隙发育
7	细粒砂岩	9.6	灰白色,细砂结构,层状构造,致密,钙质胶结
6	B <sub>4</sub> <sup>1</sup> 煤层	4.0	黑色,条带结构,块状构造
5	细粒砂岩	9.0	灰白色,细砂结构,层状结构,钙质胶结,含煤线
4	粗粒砂岩	8.0	灰白色,粗砂结构,层状结构,钙质胶结
3	B <sub>3</sub> 煤层	1.8	黑色,呈块状,沥青光泽,块状结构,属于半亮型煤
2	粉砂岩	4.8	灰色,粉砂结构,层状构造,致密坚硬,钙质胶结
1	细粒砂岩	19.3	灰白色,细砂结构,以砂岩为主,厚层状构造
0	B <sub>2</sub> 煤层	11.8	黑色,块状,阶梯状断口,半亮型煤,煤层结构单一

## 2 冲击地压防治的主控因素

依据冲击地压发生的动静加载理论,从静载和动载角度分析影响冲击地压的影响因素,静载、动载是冲击地压发生的必要条件,支护强度是抵抗冲击地压发生的能力,三者的关系为,动静载为冲击地压提供力源,支护强度则提供阻力,即静载与合力减去支护强度作为冲击地压发生的条件,因此三者皆为主控因素。

### 2.1 高静载

冲击地压影响因素复杂,根据研究<sup>[11]</sup>,采掘围岩静载由原岩应力和支承压力组成,即

$$\sigma_j = \sigma_{j1} + \sigma_{j2} = (k + \lambda) \gamma h \quad (1)$$

式中: $\sigma_j$ 为采掘围岩静载; $\sigma_{j1}$ 为原岩应力, $\sigma_{j2}$ 为支承压力; $k$ 为支承压力集中系数; $\gamma$ 为上覆岩层的容重, $\text{N}/\text{m}^3$ ; $h$ 为上覆岩层厚度, $\text{m}$ ; $\lambda$ 为构造应力集中系数,由地应力测试结果, $\lambda$ 为1.72~1.97。

根据钻孔应力计实测,得到 I010203 工作面运输巷的支承压力监测曲线,如图 2 所示。

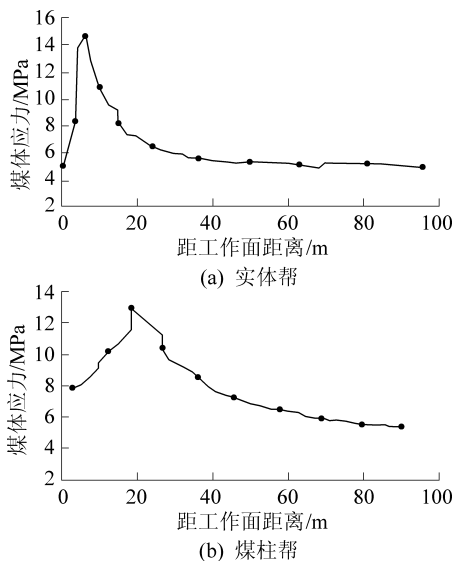


图2 运输巷支承压力实测

Fig. 2 Measuring of support pressure in transportation entry

根据 I010203 运输巷实体帮支承压力曲线,分析得到支承压力集中系数见表 2,煤柱帮支承压力集中系数见表 3。其中,以 I010203 工作面工艺巷开口位置为起始点标注位置,1 470 m 位置为开切眼,如图 1 所示。

表2 实测运输巷实体帮支承压力集中系数  $k$

Table 2 Solid side concentration coefficient  $k$  of transportation support pressure

至工艺巷开口处距离/m	1 260	1 275	1 280	1 285	1 290	1 295
$k$	2.05	5.98	5.60	2.99	8.59	3.15

表3 实测运输巷煤柱帮支承压力集中系数  $k$

Table 3 Pillar side concentration coefficient  $k$  of transportation entry support pressure

至工艺巷开口处距离/m	1 270	1 280	1 290	1 297
$k$	3.14	3.16	2.37	1.76

根据公式(1),实体煤帮静载为

$$\sigma_j = 3.77\gamma h \sim 10.56\gamma h \quad (2)$$

煤柱帮静载为

$$\sigma_j = 3.48\gamma h \sim 5.13\gamma h \quad (3)$$

I010203 工作面平均埋深 320 m,上覆岩层的容重取  $25 \text{ kN}/\text{m}^3$ ,经计算实体煤侧静载为  $30.16 \sim 84.48 \text{ MPa}$ ;煤柱静载为  $27.84 \sim 41.04 \text{ MPa}$ 。现场实测表明,I010203 工作面运输巷显著影响区煤体静载荷高,容易达到发生冲击地压发生的临界载荷。

### 2.2 强矿震

1) 支架压力监测岩层破断规律。通过关键层理论<sup>[19]</sup>,经计算,确定第 1 岩层与第 11 岩层为关键层。

初次来压期间,根据现场矿压显现,10 号支架位置,顶板自 1 407.4 m 开始来压,一直持续至 1 398.6 m;20 号支架位置,顶板自 1 409.8 m 开始来压,一直持续至 1 394.8 m;不仅表现为来压强烈,而且来压持续时间长,造成工作面矿压显现强烈;同理,中上部支架监测结果也具有相似特征,如图 3 所示。

周期来压期间,通过分析得到工作面下部周期来压步距平均为 17.9 m、工作面中部周期来压步距平均为 17.4 m、工作面上部周期来压步距平均为 18.8 m。

顶板岩层破断来压过程具有以下特点:①来压强度大,动载强烈。顶板来压期间的动载系数大于 1.9,表现为工作面压力大。②来压持续时间长。频繁出现顶板周期来压持续多天,较其它工作面来压持续时间长。

2) 微震监测覆岩活动特征。2018 年 3 月 26 日至 2018 年 6 月 14 日,采用 ARAMIS M/E 微震监测系统对矿井煤岩层破坏过程进行监测,如图 4 所示。针对微震监测到的大能量事件与支架压力监测来压进行综合分析得到,工作面大能量事件基本发生在工作面来压期间前后,表明高能事件的产生与顶板破坏或破断关系密切,产生的高能事件多次造成工作面巷道变形、顶板下沉等矿压显现,同时,来压期间引起侧向采空区的围岩活动,不仅使煤体应力集中,而且高能事件容易突然引起煤体失稳。



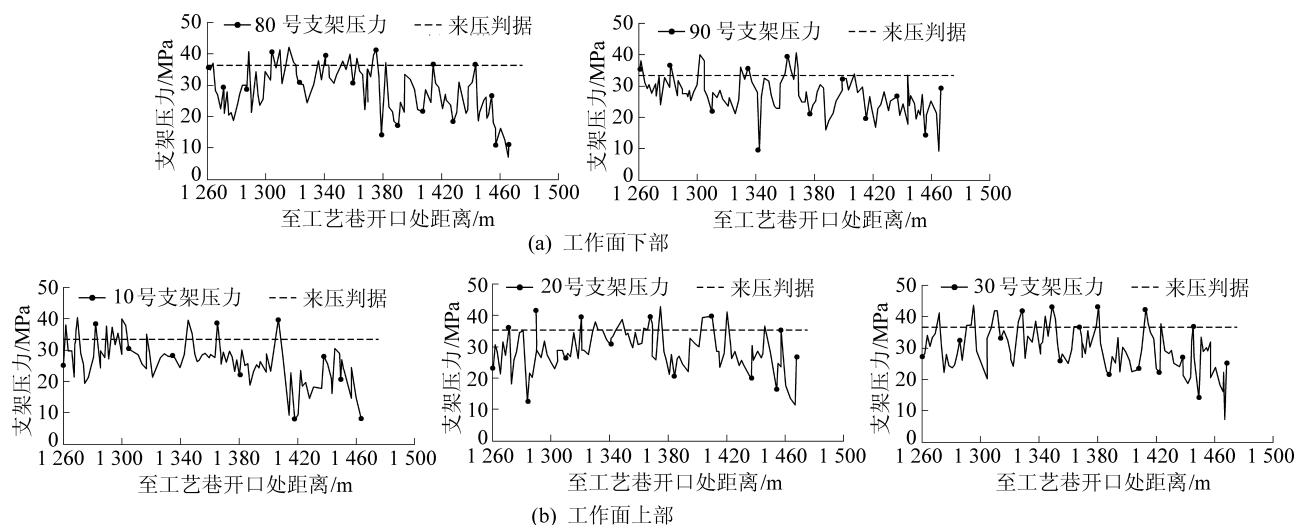


图3 工作面来压分析

Fig. 3 Analysis on working face periodic weighting

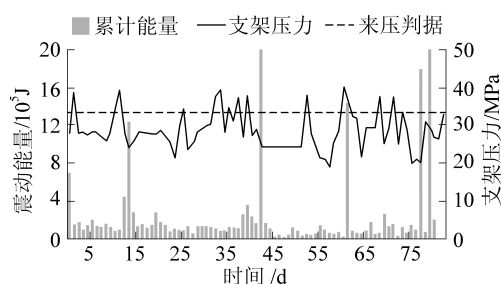


图4 支架压力与高能微震事件关系

Fig. 4 Relationship between support pressure and high energy microseismic events

通过对工作面顶板周期破断、围岩活动能量释放的监测,顶板破断前后,常引起高能事件的发生,以动载的形式作用,加剧煤体的应力集中,且坚硬顶板对工作面影响显著。

显著影响区,煤体静载荷程度高,所需矿震产生的动载作用小,容易诱发冲击显现;采动一般影响区,煤体静载荷程度较低,与矿震产生的动载叠加作用下应力升高,如图5所示。

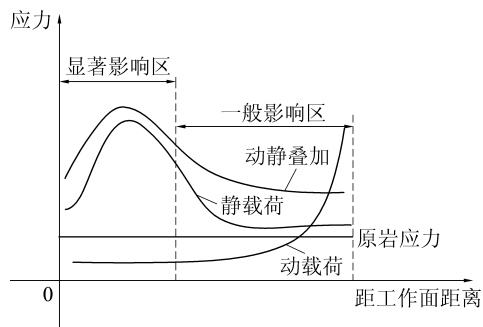


图5 动静载荷叠加示意

Fig. 5 Superposition diagram of dynamic and static load

当达到冲击地压的临界载荷,引起远场工作面冲击显现,当叠加后的应力低于临界载荷时,不会引

起冲击显现。这是震源离采场较远,采场附近有显现,而震源附近却没有显现的原因。

### 2.3 低支护强度

运输巷采用锚杆+锚网+锚索+钢带的联合支护方式;锚固剂型号为CK2350型;锚杆规格为 $\phi 18\text{ mm}\times 2\,500\text{ mm}$ ,锚杆间排距为 $800\text{ mm}\times 800\text{ mm}$ ,每根锚杆使用2支锚固剂;锚索规格为 $\phi 18.9\text{ mm}\times 10\,500\text{ mm}$ ,锚索间排距为 $2\,400\text{ mm}\times 2\,400\text{ mm}$ ,每根锚索使用3支锚固剂;锚网为4号冷拔丝网,锚网宽度为 $1\,000\text{ mm}$ ;钢带为 $\phi 12\text{ mm}$ 的圆钢加工。

工作面开采过程,容易造成冲击显现的区域为运输巷超前 $60\text{ m}$ 范围。高静载、强动载造成巷道松动圈范围扩大,引起锚杆支护强度降低,抵抗巷道变形的能力减弱,巷道变形增大。现场采用劈帮卧底的方式进行处理,进一步加剧了巷道的支护强度的损伤,同时,针对高静载的区域采用煤体爆破、大直径钻孔卸压的过程,对支护强度有一定程度的损伤,降低了巷道支护强度。

## 3 防冲击地压现场实践

通过分析I010203工作面冲击地压的主控因素:高静载煤层、坚硬顶板和低支护强度3方面,采取针对性措施进行冲击地压防治实践。

### 3.1 煤体分阶段多轮卸压

煤体卸压分2个阶段:第1阶段,预卸压,在采动影响范围外,采取大直径钻孔和煤体卸压爆破的方式;第2阶段,在显著影响区,采用煤体卸压爆破进行动态多轮卸压,如图6所示。

以运输巷煤体解危工程实践为例,确定煤体卸压方式、卸压参数等。

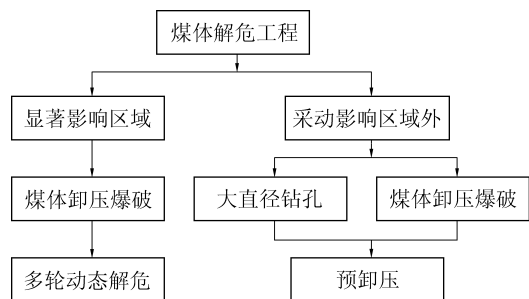


图6 煤体卸压技术路线

Fig. 6 Technical route of coal stress relief

1) 应力峰值位置确定。①煤柱侧应力峰值位置。现场实测煤柱侧应力峰值位置深入煤柱不低于9 m。煤柱侧煤体预卸压深度至少达到峰值位置,即深度不低于9 m。②实体煤侧应力峰值位置。一般影响区,形成浅部应力集中,实测在深入煤壁4.5 m位置;当进入采动影响显著区,应力集中往深部7~11 m转移,实测在9 m的位置应力集中程度高。采用长短孔进行深浅峰值卸压。煤体应力峰值位置确定如图7所示。

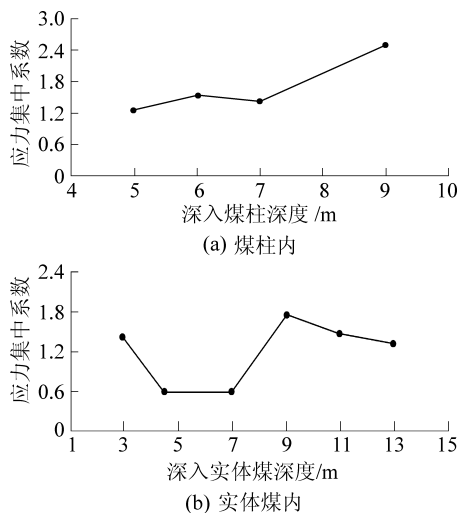
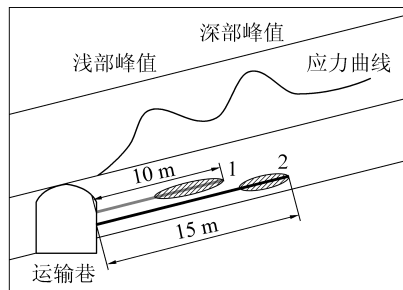


图7 煤体应力峰值位置确定

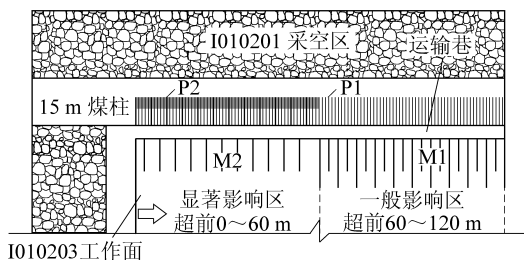
Fig. 7 Determination of peak stress position of coal seam

2) 卸压方式及布置。如图8b所示,分阶段卸压。第1阶段,应加强一般影响区的预卸压次数,若在一般影响区卸压效果不理想时,在显著影响区,则存在巷道变形大、空间小、作业人员密集、人员管控难、解危过程危险性高的问题,因此,加强预卸压,提高超前工作面60~120 m煤体的预卸压效果;第2阶段卸压,即动态多轮卸压,超前工作面60 m范围内为显著影响区,该区域为重点的动态解危区域。卸压参数根据应力峰值的位置,上帮实体侧煤体应力集中4~6 m峰值区的处理,联合直径75 mm煤体爆破孔直径42 mm煤体爆破孔的布置方式,即深部应力集中区9~13 m,采用直径75 mm孔进行爆破,

装药深度调6 m,如图8a中的2号孔;浅部爆破采用直径42 mm的孔,孔深10 m,装药长度为5 m。图8b中M1为第1轮直径42 mm、75 mm煤体爆破,P1为第1轮大直径153 mm钻孔,P2为第2轮直径42 mm煤体爆破。



(a) 峰值位置



(b) 布置方式

图8 煤体卸压阶段及方式

Fig. 8 Phase and mode of stress relief of coal

### 3.2 顶板控制实践

为避免因顶板活动及破断产生矿震而诱发冲击地压显现,应降低悬顶长度和近场矿震对冲击地压的影响,减少大面积悬顶造成的能量积聚,控制近场的矿震,达到降低动载扰动造成冲击显现的外在力源的目的。

1) 煤柱侧顶板控制。2018年3月8日开始,对煤柱侧顶板采取深孔预裂爆破的方法进行处理,采用ZDY1000和ZDY4000s煤矿用全液压坑道钻机,钻机及配套钻杆施工,实施初期,间距5 m,每排1孔,基本顶处理高度19 m,如图9所示。

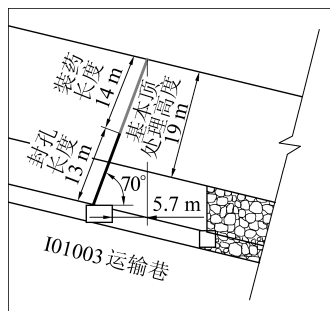


图9 煤柱侧顶板孔布置

Fig. 9 Layout of coal pillar side roof

2) 超前深孔预裂爆破。每10 m一组炮孔,炮

眼布置垂直于巷道中心线,具体钻孔参数如图10所示。采用三级乳化炸药、毫秒瞬发雷管,正向装药,连线方式采用孔内并联孔外串联。

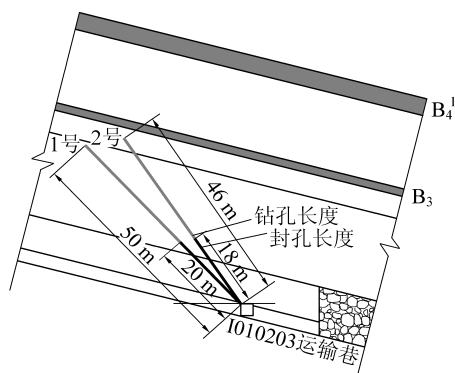


图10 深孔预裂爆破孔布置

Fig. 10 Pre splitting blasting deep hole arrangement

### 3.3 支护强度补强

1) 锚索梁加强支护。为增加支护强度, I010203工作面运输巷冲击危险区巷道顶部沿巷道走向施工锚索梁、单体液压支柱进行补强支护, 锚索梁每组2根, 间距2 000 mm, 每组间距500 mm, 锚索梁长4 500 mm, 锚索眼距1 750 mm, 锚索梁采用“1梁3索”, 锚索梁与顶板间加背板。

2) 单体液压支柱加强支护。单体液压支柱施工2排, 行人侧距南帮1 000 mm, 非行人侧距北帮800 mm, 柱距1 200 mm, 顶部上铰接梁, 铰接梁使用8号铁丝与锚网进行固定, 单体液压支柱与铰接梁间加垫皮, 单体液压支柱间加双排硬链接, 上部系防倒绳, 下部穿柱鞋。

### 3.4 动态调整过程

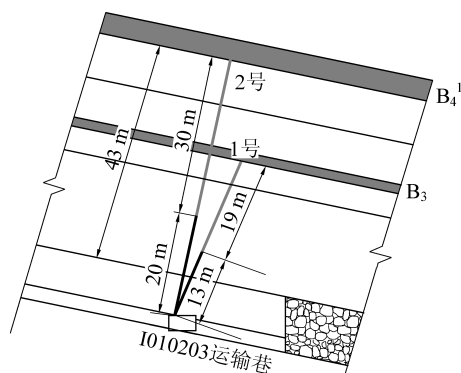
通过现场实践, 针对不同的冲击危险区域, 煤体及顶板措施需要进行动态调整, 现阶段实践表明, 大能量矿震的控制需进一步加强, 根据大能量矿震发生在 $B_3$ 煤层至 $B_4^1$ 煤层之间的岩层, 且对工作面冲击地压产生较大影响, 基于大能量事件发生的控制思想, 处理高度也调整至该范围, 如图11所示。调整后, 将对大能量矿震控制效果重点分析。

### 3.5 控制效果分析

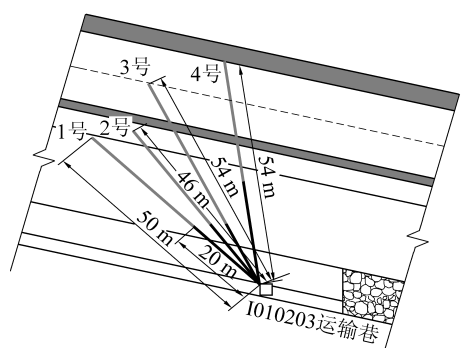
2018年3月17日至2018年4月26日运输巷实体煤侧距工艺巷开口处1 265 m防冲实践过程一次案例, 如图12所示。采取煤体爆破进行了2轮卸压, 第1轮煤体爆破使煤体应力得到部分降低, 表明爆破产生的煤体应力降低程度小于采动应力使煤体应力升高的程度, 由图12可知, 进行第2轮卸压后煤体应力才明显降低。

2018年3月22日至2018年4月22日煤柱侧顶板爆破孔实施后, 采用微震监测进行了分析, 选取

爆破区域煤柱顶板一定范围, 通过爆破前后, 微震事件能量频次变化曲线(图13), 可知爆破降低了煤柱侧顶板的能量释放。



(a) 煤柱侧调整后



(b) 实体煤侧调整后

图11 顶板钻孔调整后布置

Fig. 11 Adjusted layout of roof hole

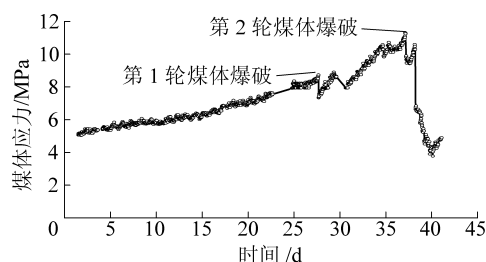


图12 煤体爆破与应力变化关系

Fig. 12 Relationship between coal blasting and stress change

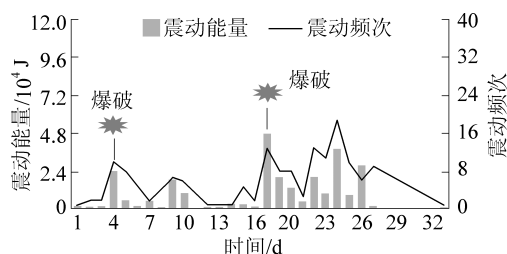


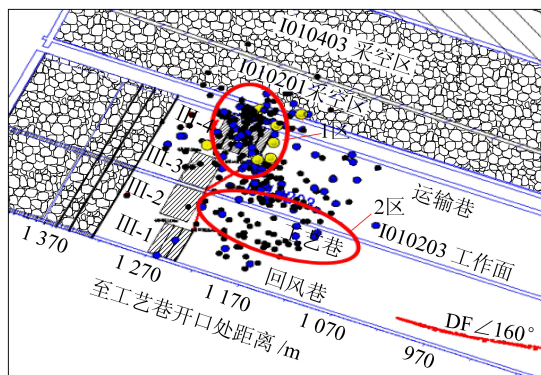
图13 煤柱侧顶板爆破效果

Fig. 13 Blasting effect of coal pillar side roof

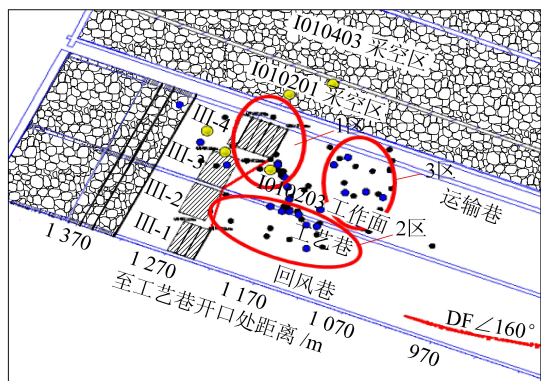
顶板预裂爆破前后微震事件对比如图14所示, 超前深孔预裂爆破区域为Ⅲ-1至Ⅲ-4, 爆破前, 微震事件在爆破区域形成聚集区, 分布在工作面下部, 微震事件在非爆破区域内的聚集区, 分布在工艺巷



两侧约40 m区域,运输巷、回风巷先爆破,工艺巷后爆破,爆破后,爆破区域微震事件大幅减少, $>10^4$  J微震事件大幅减少,并向工作面前方转移,非爆破区域的微震事件聚集区,微震事件减少。



(a) 爆破前



(b) 爆破后

微震能量	$0 \sim 10^3$ J	$10^3 \sim 10^4$ J	$10^4 \sim 10^5$ J
图例	•	•	•

图14 顶板预裂爆破前后微震事件对比

Fig. 14 Microseisms before and after pre splitting blasting of roof

整体上,通过卸压、加强支护后,现场发生大能量矿震时,巷道变形得到有效控制,巷道受影响的程度大幅降低。

## 4 结 论

1) 监测表明,冲击地压主控因素为高静载、强矿震和低支护强度。实体煤侧静载为  $3.77\gamma h \sim 10.56\gamma h$ ; 煤柱侧静载为  $3.48\gamma h \sim 5.13\gamma h$ ; 顶板破断前后常引起高能事件发生,以动载的形式作用于煤体;多因素使得巷道的支护强度变低,抵抗动静载作用变弱。

2) 煤体卸压分2个阶段:第1阶段,在采动影响范围外预卸压;第2阶段,在显著影响区,采用煤体卸压爆破进行动态多轮卸压。

3) 通过顶板深孔预裂爆破,有效降低爆破区域

和非爆破区域的顶板活动强度,煤体应力集中程度和大能量事件的发生频次。

## 参考文献 (References):

- [1] 窦林名,曹胜根,刘贞堂,等.三河尖煤矿坚硬顶板对冲击地压的影响分析[J].中国矿业大学学报,2003,32(4):388-392.  
DOU Linming, CAO Shenggen, LIU Zhentang, et al. Influence of key roof on rock burst in Sanhejian Mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 388-392.
- [2] 窦林名,何学秋.冲击地压防治理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001.
- [3] 吕进国,姜耀东,李守国,等.巨厚坚硬顶板条件下断层诱冲特征及机制[J].煤炭学报,2014,39(10):1961-1969.  
LYU Jinguo, JIANG Yaodong, LI Shouguo, et al. Characteristics and mechanism research of coal bumps induced by faults based on extra thick and hard roof[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1961-1969.
- [4] 李新元,马念杰,钟亚平,等.坚硬顶板断裂过程中弹性能量积聚与释放的分布规律[J].岩石力学与工程学报,2007,26(S1):2786-2793.  
LI Xinyuan, MA Nianjie, ZHONG Yaping, et al. Storage and release regular of elastic energy distribution in tight roof fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2786-2793.
- [5] 苗小虎,姜福兴,王存文,等.微地震监测揭示的矿震诱发冲击地压机理研究[J].岩土工程学报,2011,33(6):971-976.  
MIAO Xiaohu, JIANG Fuxing, WANG Cunwen, et al. Mechanism of microseism induced rock burst revealed by microseismic monitoring[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 971-976.
- [6] 曹安业,范军,牟宗龙,等.矿震动载对围岩的冲击破坏效应[J].煤炭学报,2010,35(12):2006-2010.  
CAO Anye, FAN Jun, MU Zonglong, et al. Burst failure effect of mining induced tremor on roadway surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2006-2010.
- [7] 牟宗龙,窦林名,张广文,等.坚硬顶板型冲击地压灾害防治研究[J].中国矿业大学学报,2006,35(6):737-741.  
MU Zonglong, DOU Linming, ZHANG Guangwen, et al. Study of prevention methods of rock burst disaster caused by hard rock roof[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(6): 737-741.
- [8] 何江,窦林名,巩思园,等.倾斜薄煤层切顶巷预裂顶板防治冲击地压技术研究[J].煤炭学报,2015,40(6):1347-1352.  
HE Jiang, DOU Linming, GONG Siyuan, et al. Research on rock burst prevention technology of roof-cutting roadway in inclined thin coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(6): 1347-1352.
- [9] 王金鑫.深孔预裂爆破在综放工作面坚硬顶板控制中的试验研究[J].煤矿安全,2018,49(1):73-75.  
WANG Jinxin. Experimental study on deep-hole pre-splitting explosion in hard roof control of fully mechanized caving face[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(1): 73-75.
- [10] 蒋建军,邓志刚,赵善坤,等.动载荷诱发卸荷煤体冲击失稳动

- 态响应机制探讨[J].煤炭科学技术,2018,46(7):41-47,92.
- JIANG Junjun, DENG Zhigang, ZHAO Shankun, *et al.* Discussion on dynamic response mechanism of dynamic load-induced unloading coal [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(7): 41-47, 92.
- [11] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击地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.
- [12] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205-213.
- Jiang Yaodong, Pan Yishan, Jiang Fuxing, *et al.* State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 205-213.
- [13] 何江, 窦林名, 王崧玮, 等. 坚硬顶板诱发冲击地压机理及类型研究[J]. 采矿与安全工程学报. 2017, 34(6): 1121-1127.
- HE Jiang, DOU Linming, WANG Songwei, *et al.* Study on mechanism and types of hard roof inducing rock burst [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(6): 1121-1127.
- [14] 陆菜平, 窦林名, 王耀峰, 等. 坚硬顶板诱发煤体冲击破坏的微震效应[J]. 地球物理学报, 2010, 53(2): 450-456.
- LU Caiping, DOU Linming, WANG Yaofeng, *et al.* Microseismic effect of coal materials rock burst failure induced by hard roof [J]. Chinese Journal of Geophys, 2010, 53(2): 450-456.
- [15] 潘俊锋. 煤矿冲击地压启动理论及其成套技术体系研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 173-182.
- PAN Junfeng. Theory of rock burst start-up and its complete technology system [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 173-182.
- [16] 高明仕, 窦林名, 张农, 等. 冲击地压巷道围岩控制的强弱力学模型及其应用分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 359-364.
- GAO Mingshi, DOU Linming, ZHANG Nong, *et al.* Strong-soft strong mechanical model for controlling roadway surrounding rock subjected to rock burst and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 359-364.
- [17] 张自政, 柏建彪, 陈勇, 等. 浅孔爆破机制及其在厚层坚硬顶板沿空留巷中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 3008-3017.
- ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, CHEN Yong, *et al.* Shallow-hole blasting mechanism and its application for gob-side entry retaining with thick and hard roof [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 3008-3017.
- [18] 冯彦军, 康红普. 定向水力压裂控制煤矿坚硬难垮顶板试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1148-1155.
- FENG Yanjun, KANG Hongpu. Test on hard and stable roof control by means of directional hydraulic fracturing in coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1148-1155.
- [19] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.