

# 浅部矿井静载荷主导型冲击地压监测方法与实践

潘俊锋<sup>1,2</sup> 王书文<sup>1,2</sup> 刘少虹<sup>1,2</sup> 冯美华<sup>1,2</sup> 秦子晗<sup>1,2</sup>

(1. 煤炭科学研究院 开采设计研究分院 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部 北京 100013)

**摘要:** 针对浅埋强冲击危险区静载荷高度集中、无顶板活动就面临冲击危险的特征,以古山煤矿为例,确定其冲击地压发生类型为集中静载荷主导型。对集中静载荷采用地震CT技术、数值模拟、现场实测等方法开展了分步评价、分步驱散、联合检验。结果表明:浅埋厚硬单层岩浆岩顶板提供集中静载荷,本次冲击地压无动载荷参与,冲击地压监测应以监控静载荷为主;据采前地震CT探测结果揭示冲击发生后,仍然存在静载荷高度集中区域;开采过程中静载荷实时监测与数值模拟揭示的强冲击危险区相吻合,微震、地音监测技术提供的动载荷信息检验了静载荷监测结果,表明工作面推进中顶板未垮断,高集中静载荷导致底板、煤层破裂。

**关键词:** 采矿工程; 冲击地压; 静载荷; 冲击地压评价; 强冲击危险区

中图分类号: TD324 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2016)06-0064-08

## Practices and monitoring method of static loading dominant type mine strata pressure bump in shallow depth mine

Pan Junfeng<sup>1,2</sup>, Wang Shuwen<sup>1,2</sup>, Liu Shaohong<sup>1,2</sup>, Feng Meihua<sup>1,2</sup>, Qin Zihan<sup>1,2</sup>

(1. Coal Mining and Design Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Coal Mining and Design Department, Tiandi Science and Technology Company Limited, Beijing 100013, China)

**Abstract:** According to the shallow depth mine pressure bump danger area, static loading high concentration, no roof activity pressure bump danger features based on Gushan Mine as an engineering background, the paper theoretically determined the types of the mine pressure bump occurred and pointed out the main leading role of the concentrated static loading. A step by step evaluation, step by step dispersion and combined inspection were conducted on the concentrated static loading with the seismic CT technology, numerical simulation, site measurement and other methods. The results showed that the concentrated loading was provided by the roof of the shallow depth single layer magmatic rock, the mine pressure bump case was occurred with no dynamic loading sources participated and the monitoring of the mine pressure bump would be the static loading mainly. Before the mining operation conducted, the seismic CT detection results showed that after the mine pressure bump occurred, the high concentrated area of the static loading would be existed still. During the mining process, the real time monitoring of the static loading could be fitted with the high mine pressure bump danger area revealed by the numerical simulation. The dynamic loading information provided by the micro seismic and earth sound was applied to inspect the monitoring results of the static loading. The floor and seam fracturing were caused by the coal mining face pushing forward, the discollapse roof and high concentrated static loading.

**Key words:** mining engineering; mine strata pressure bump; static loading; evaluation on mine strata pressure bump; high bump danger area

## 0 引言

冲击地压研究的最终目的是防治<sup>[1-2]</sup>,然而没

有前期的监测评价,防治的时机,针对性就难以确定,这一问题国内外学者已经认识到,针对冲击地压监测的单一方法研究有煤体钻屑法<sup>[3]</sup>、地音法<sup>[4]</sup>、

收稿日期: 2016-02-09; 责任编辑: 赵瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2016.06.010

基金项目: 国家自然科学基金煤炭联合基金资助项目(U1261211); 天地科技开采生产力转化基金资助项目(KJ-2015-TDKC-05)

作者简介: 潘俊锋(1979—),男,陕西旬邑人,副研究员,博士。Tel: 010-84263122, E-mail: panjunfeng@yeah.net

引用格式: 潘俊锋,王书文,刘少虹等. 浅部矿井静载荷主导型冲击地压监测方法与实践[J]. 煤炭科学技术 2016, 44(6): 64-70, 98.

Pan Junfeng, Wang Shuwen, Liu Shaohong, et al. Practices and monitoring method of static loading dominant type mine strata pressure bump in shallow depth mine [J]. Coal Science and Technology 2016, 44(6): 64-70, 98.

矿震法<sup>[5]</sup>、微震法<sup>[6~7]</sup>、电磁辐射仪<sup>[8~9]</sup>等,此类研究均从煤岩冲击前兆的各类信息进行了冲击地压预测的探索。除此之外,针对某一特定条件如何采用多种或一种方法进行冲击地压监测也作了许多研究<sup>[10~15]</sup>。总之,常规的冲击地压监测思路是在采煤工作面推进过程中,在采掘活动场所安装1~2种实时监测设备,根据监测数据的异常变化来预警冲击地压危险状态,提醒工作人员采取解危措施。实践证明,此种思路对于强冲击危险区域的监测预警工作很难奏效,例如平庄古山矿、义马千秋矿、新汶华丰矿等巨厚坚硬顶板覆盖的矿井,集中静载荷充足,巷道开口就面临冲击,长壁采场一旦推进,不但集中静载荷获得增量,由于顶板的活动造成集中动载荷源也同时加入,造成冲击地压防治强度与难度剧增,防治失败概率加大。

基于集中静载荷诱发冲击启动的内因作用,笔者以古山煤矿强冲击危险区冲击地压灾害防治为工程背景,在冲击地压发生原理、类型确定基础上,提出在工作面推进前后都必须以集中静载荷演化规律评价与监测为主,并对高度集中静载荷采用分步评价,分步驱散联合检验的方法。实践证明该方法主动、超前、高效,不但降低了后期防治强度,也使得严重冲击地压灾害防治得以成功,类似条件矿井可借鉴应用。

## 1 工程背景

平庄矿区古山煤矿主采6~2煤层,煤层倾角平均为26°,厚度平均为14 m,单轴抗压强度10.51 MPa,具有弱冲击倾向性。矿井为岩浆岩侵入区,造成煤层顶板为一层辉绿岩,直通地表,目前开采区下巷顶板最厚处为232 m,单轴抗压强度为147 MPa,具有强冲击倾向性。煤层底板为60 m的砂岩。2013年年初,矿井开采十采区东翼的069~2工作面,工作面设计走向长400 m,倾斜长61 m,下巷埋深370 m。该工作面东邻三井边界,南邻上区段068~2采空区,北邻未开采区,西为采区下山巷道,如图1所示,069~2工作面上下巷分别上覆068~1和069~1采空区。

069~2工作面两巷掘进贯通后,安装准备设备时,于2012年10月17日,在下巷邻近上覆采空区位置发生一起冲击地压灾害,瞬间造成70余m巷道近似闭合,多处巷道仅有输送带架上0.3~0.5 m高度的空间,此处支护的锚杆(索)脱落,工字钢支架全部损坏,造成13人受伤,工作面停产3个月。

冲击地压造成破坏如图2所示。

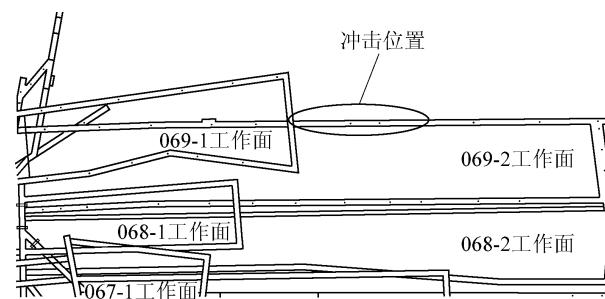


图1 工作面及冲击地压显现位置  
Fig. 1 Position of working face and rock burst occurred

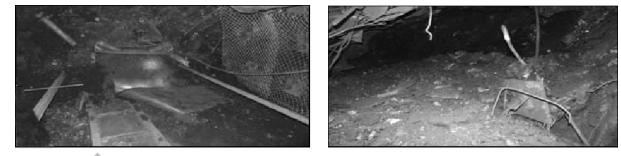


图2 冲击地压造成的巷道破坏示意  
Fig. 2 Destruction schematic of roadway caused by rockburst

## 2 浅埋厚硬单层顶板冲击地压监测理论基础

如图3所示,依据069~2工作面实际开采条件建立下巷煤岩承载模型。根据现场实测,下巷顶底板存在25 MPa的水平应力,在垂直方向,主要关注两帮极限平衡区承载函数 $T_M(G, F_C, N, F_Q, F_h)$ ,其中 $G$ 为巷道覆岩的自重, $F_C$ 为巷道两帮侧向支承压力, $N$ 为上区段采空区顶板弯曲弹性能, $F_Q$ 为工作面自身的超前支承压力, $F_h$ 为上覆采空区开切眼后方支承压力,则从理论上讲 $T_M$ 为上述参量的正相关函数。这些参量代表的载荷源主要提供弯曲弹性能或压缩弹性能,因而属于集中静载荷。

依据冲击地压的冲击启动理论<sup>[16]</sup>,该工作面下巷冲击启动与否,取决于 $T_M(G, F_C, N, F_Q, F_h)$ 函数值是否达到极限。069~2工作面下巷所处理深折算应力为9.25 MPa,该区实测应力集中系数平均为1.7,故计算得该处的平均应力为15.73 MPa,已经超过了煤层的单轴强度10.51 MPa。并且,“10·17”冲击显现点弹性能由胡克定律估算为45 kJ/m<sup>3</sup>,参考文献[17]给出的计算公式,计算动力破坏需要的最小能量 $E_c = \sigma_c^2 / (2E) = 15.34 \text{ kJ/m}^3$ ,因此 $E_j - E_c > 0$ 。根据冲击启动理论,单纯集中静载荷 $E_j$ 就能够诱发冲击启动。

因此,从理论上分析,“10·17”冲击地压发生原理如下:巨厚难垮岩浆岩顶板悬顶导致短壁工作面的下巷仍然处于弯曲弹性能 $N$ 覆盖区中,上覆采空区069~1后侧高的支承压力 $F_h$ 与本段巷道两帮

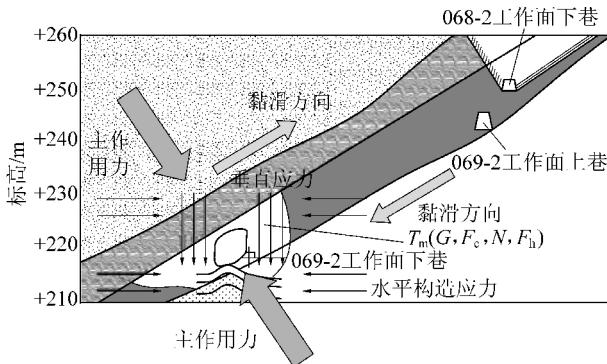


图3 工作面下巷承载示意

Fig. 3 Bearing schematic of lower roadway

侧向支承压力  $F_c$  叠加 3 种力源在巷道掘进扰动下与时间  $t$  呈正相关关系,而巷道两帮的围岩,其长期强度与时间  $t$  呈负相关关系,因此,此时集中静载荷大函数  $T_m(G, F_c(t), N(t), F_h(t))$  在缺失  $F_0$  的情况下仍满足冲击启动条件,故为集中静载荷型冲击地压,因此,课题组决定后期冲击地压的监测预警以集中静载荷演化规律研究为主。

### 3 主导冲击启动的集中静载荷演化规律分析

#### 3.1 开采前集中静载荷超前预探测

069-2 工作面在两巷掘进刚贯通,工作面尚未

推进,就发生“10·17”冲击地压,并且发生在两侧都为实体煤的下巷,表明该条巷道静载荷集中程度高,为了充分了解该区域静载荷分布状态,提前采取载荷疏导,降低后期卸压工作强度,采用地震 CT 技术进行了开采区域静载荷预探测,从工作面卸压爆破前煤体应力分布图(图 4)可知,静载荷探测到的震动波速异常系数依次增大,其中波速正异常系数最大为 0.85,负异常系数最小达到 -0.35。总体来说,绝大部分区域的正异常系数小于 0.75,但经过本次冲击地压后,仍然有近 20% 的面积,其波速探测正异常系数为 0.50~0.75,根据煤岩体中震动波速大小与应力呈正相关关系<sup>[18~19]</sup>,说明该区域内静载荷集中程度仍然较高。依据探测结果,对工作面高应力区卸压顺序进行了编排,当卸压工程结束 15 d 后,采用同样的探测方案进行静载荷分布状态复评,如图 5 所示。由图 5 可知,原来探测为高应力区,且波速正异常系数为 0.50~0.75 的区域变为零散分布,无显著的云状集中区域,并且这些零散分布的高应力区累计面积降至 12% 左右,说明通过爆破卸压,显著驱散了高应力的集中,强冲危险状态得到缓解,工作面具备安装和生产条件。

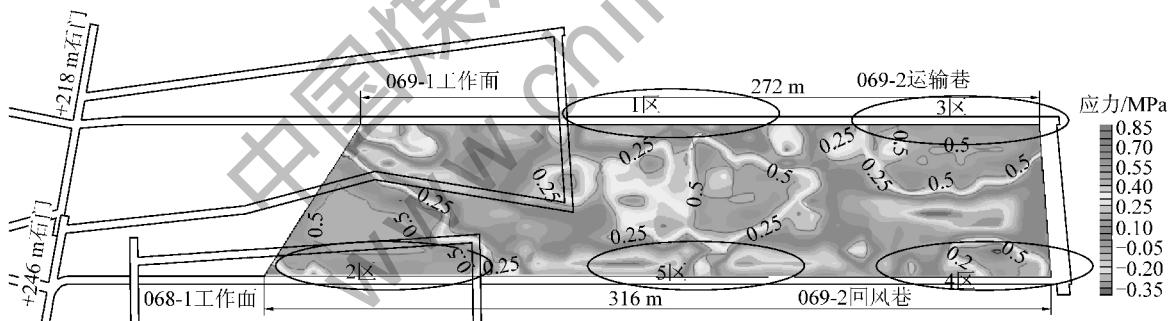


图4 工作面卸压爆破前煤体应力分布

Fig. 4 Stress distribution of coal body before relief blasting

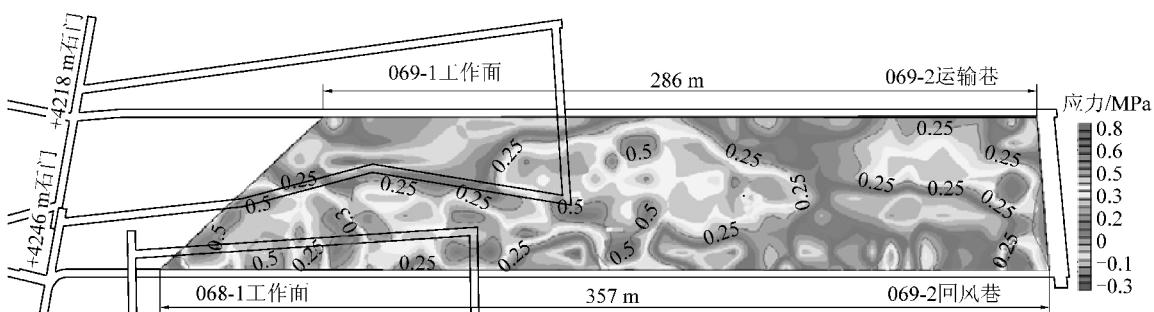


图5 工作面爆破卸压后煤体应力分布

Fig. 5 Stress distribution of coal body after relief blasting

### 3.2 工作面推进时静载荷数值模拟预评价

为预先了解当工作面推进时,采场、巷道围岩载荷演化规律,同时也为实际推采时围岩应力实时监测传感器布置提供指导。采用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟技术,提前模拟了工作面应力演化特征。由图6可知,069-2工作面下巷两侧应力较高,尤其在上覆069-1采空区后方区域应力集中明显,达12 MPa,随着069-2工作面向前推进,本工作面超前支承压力不断前移,并且逐渐与上覆069-1采空区后方区域集中应力相遇,产生叠加,因此该区域应力迅速升高,最高可达16.7 MPa,表明随着工作面推进上覆069-1采空区覆盖的069-2下巷仍然是强冲击危险区。

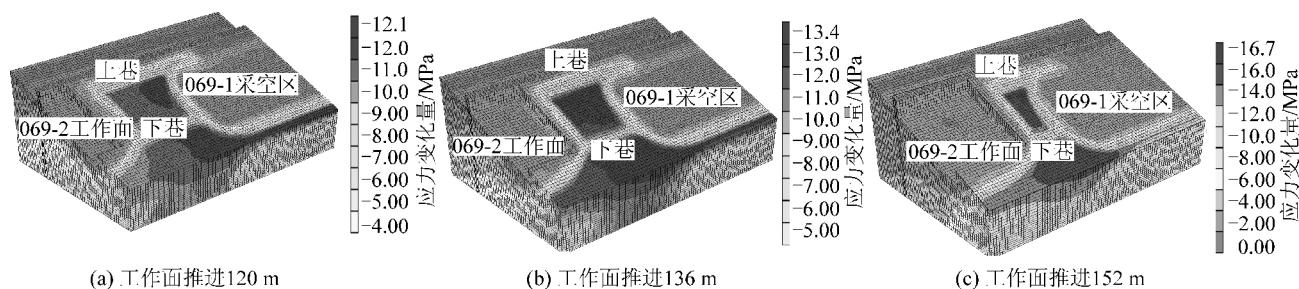


图6 工作面推进时下巷煤岩应力变化

Fig. 6 Stress of lower roadway during working face advancing

069-2工作面推进过程中,记录的煤体内应力变化情况如图7所示,与图6相同,也反映出069-2工作面推进过程中下巷两侧应力明显高于上巷,并且随着工作面向上覆采空区推进,两巷应力均表现为先增大,推进至采空区正下方后再变小的趋势,说明工作面推进至上覆069-1采空区后方时,下巷仍然面临较强的冲击危险,而进入采空区下方后,工作面整体处于低应力区开采。

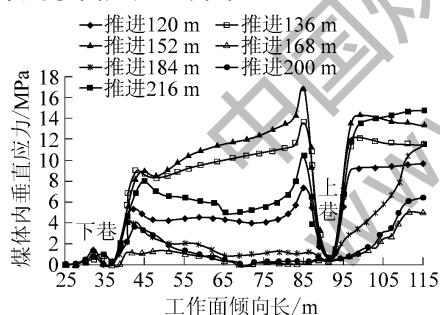


图7 工作面不同推进距离倾向应力分布曲线

Fig. 7 Dip direction stress curves in the working face with different advancing distance

### 3.3 开采中集中静载荷实时监测

#### 3.3.1 工作面超前应力集中范围实测

在“10·17”冲击地压发生后,经过工作面静载荷探测预卸压,区域静载荷得到一定的驱散,但数值模拟表明,随着采场推进,本工作面超前支承压力逐渐向上覆采空区后侧迁移,冲击危险性不断增强,为了验证这一认识,同时做到实时监测预警,实时采取解危措施,保障安全开采。在069-2工作面下巷全长布置了自主研发的KJ21冲击地压应力在线监

测系统,系统结构如图8所示。

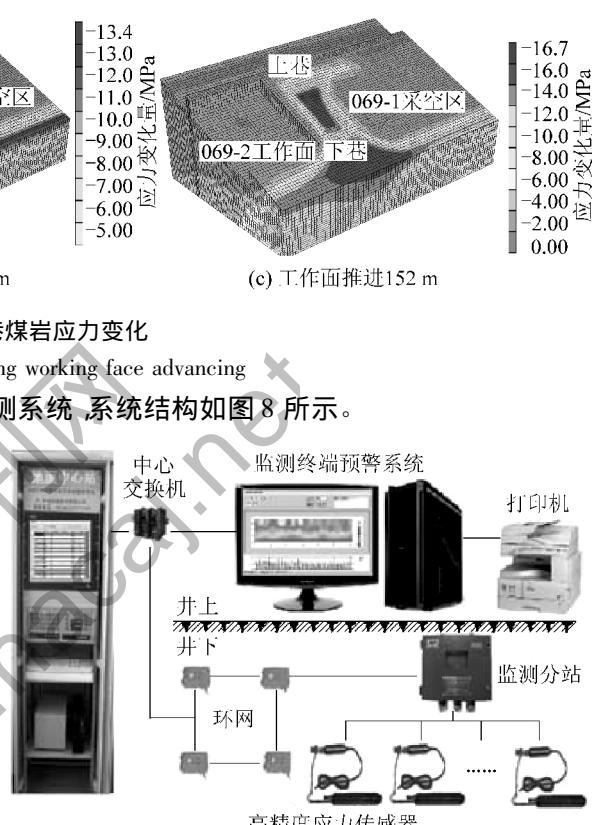


图8 冲击地压应力在线监测系统结构

Fig. 8 Structure diagram of on-line monitoring system for rockburst stress

如图9所示,共布置测站25个,每个测站包括3个测点,测点的测深分别为7、10、15 m,总计75个测点。第1个测站距离下山巷巷口10 m,各测点间距均为5 m。传感器埋深依次为7、10、15、7、10、15 m。选择第14测站15 m测点,第17测站10 m测点、15 m测点,第19测站10 m测点,将其分别编号为1、2、3和4号。主要观测随着工作面推进,煤体超前支承压力及应力集中系数,选择2013年1月1日至各自测点监测结束时间段数据进行分析,如图10所示。由图10可知,随着工作面推进,邻近069-1上覆采空区时,煤体实测应力显著增大,达到18 MPa左右,各测点表明,超前支承压力峰值位于煤壁前方13 m左右。具体实测数据见表1。

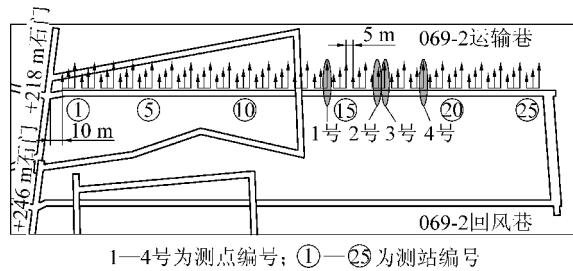


图9 下巷应力在线监测系统布置

Fig. 9 Stress on-line monitoring system layout of lower roadway

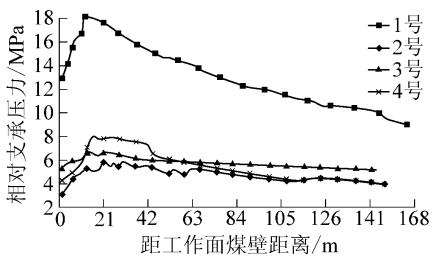


图10 工作面下巷煤体应力变化曲线

Fig. 10 Stress change curves of working face lower roadway

表1 各观测点数据统计

Table 1 Data statistics of each observation point

钻孔 编号	超前支承压力 影响范围/m	应力峰值距 工作面距离/m	应力集中 系数
1号	100	12	2.2
2号	80	16	1.5
3号	55	12	1.4
4号	82	14	2.0
平均值	79.3	13.5	1.7

由表1可知,超前支承压力影响范围约为79.3 m,应力峰值距离工作面煤壁约为13.5 m,应力集中系数为1.7。据此可将超前应力区域划分为以下3个部分。

1) 超前工作面0~13.5 m范围属于应力降低区,此区域煤体先后经过超前支承压力峰值并达到强度极限,煤体结构遭到破坏,产生塑性屈服,承受载荷能力大幅降低,应力向煤体深处转移。

2) 超前工作面13.5~79.3 m属于应力增加区,此区域由外(79.3 m处)向工作面方向压力急剧增大,直至达到应力峰值。其中应力快速增加区为超前工作面13.5~46.4 m。

根据以上分析可知,工作面超前压力影响范围为0~79.3 m,应在区域1和区域2做到重点强化支护。

### 3.3.2 冲击事件活跃期监测分析

KJ21冲击地压应力在线监测系统监测到069-2工作面下巷下帮的应力云图如图11所示,由68

图11可知,在上分层069-1工作面采空区边缘附近为应力升高区域,并随着工作面的推进,受超前支承压力的影响,应力升高程度和区域不断增大,实测结果与数值模拟结论基本吻合。

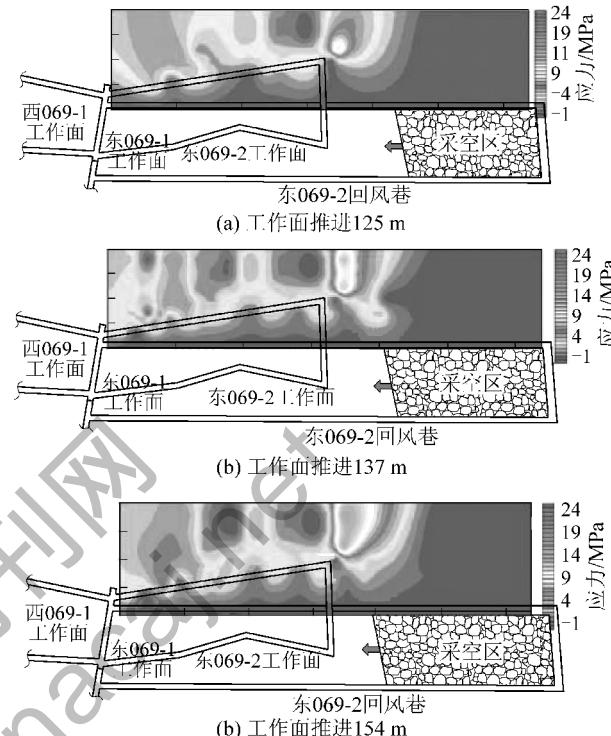


图11 不同推进度下工作面下巷下帮应力云图

Fig. 11 Stress nephogram of lower roadway in different advance degree

069-2工作面三面与采空区相邻,形成了一个巨大的孤岛煤柱,加之顶板岩层坚硬完整性好,整个069-2工作面除位于上分层068-1、069-1采空区以及上区段068-2工作面下的局部位置外,均处于应力增高区范围内;这也解释了069-2工作面下巷掘进期间发生“7·30”弱冲击事件的原因,并且“10·17”事件冲击范围在下巷200 m至开切眼全部区域。

### 4 冲击案例验证

069-2工作面微震事件集中区域投影如图12所示,由微震监测数据表明,069-2工作面下巷靠近069-1采空区处微震事件密集发生,但从其剖面图看出微震事件主要发生在煤层、底板中,表明巨厚整层岩浆岩顶板并未破裂,煤层、底板微震事件为集中静载荷压裂事件,而这些事件要释放一定的动载荷。在静、动载荷作用下,煤岩体逐渐加压,其内在微缺陷被压缩或闭合,此时产生能级很小的地音信号,当裂纹扩展到一定规模,煤岩体受载强度接近其

破坏的1/2时,开始出现大范围裂隙贯通并产生能级较大的微震事件。当载荷越接近煤岩体极限强度时,微震事件次数越多,直至煤岩体发生大的破坏。

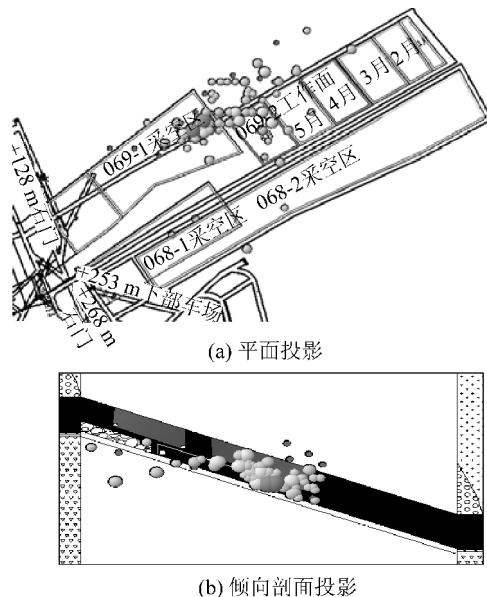


图12 069-2工作面微震事件集中区域投影

Fig. 12 Central area projection for micro seismic events distribution of No. 069-2 working face

煤岩体的破裂前兆、过程和最终破坏始终伴随应力的变化。2013年5月15日至5月30日6次量级在6次方以上高能事件发生前后煤岩体应力以及地音活动变化情况如图13所示。选择图9中1号测点作为研究对象,由图13可以看出,工作面超前支承压力背景下,随着工作面推进,煤岩体应力不断增加,对应的地音每小时活动频次和能量曲线交替形成大小不等的包络,在高能事件发生前1~2 h内地音频次和能量开始同步增加,并持续到高能事件发生1~2 h内,然后开始减弱。从图13中也可以看出,高能事件发生后,应力曲线立即走低,

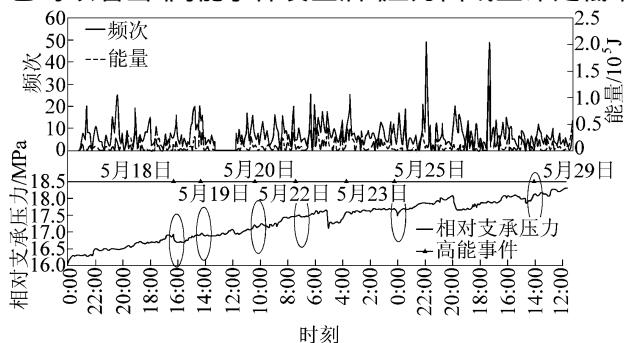


图13 高能事件发生前后煤岩体应力与地音活动相关性

Fig. 13 Correlation among burst events, coal and rock mass stress, sound activity

持续几个或十几个小时后又开始上升。表明集中静载荷主导的冲击危险区域,伴随着静载荷不断增大的过程中,交替出现高频低能的地音事件。当高集中静载荷不能得到有效驱散,持续上升过程中大量的地音事件发生质变,出现低频高能微震(或冲击)事件,由于这些微震事件为高静载荷压裂产生,因而虽然有足够的能量,但突破密实的高静载荷区,能量衰减明显,难以诱发灾害。

随着工作面推进,强冲击危险区域静载荷不断增大,在这种警示下,现场进行了多次大孔径卸压,煤层卸压爆破等,微震事件还是频频发生,15 d内发生的6次 $10^6$  J以上冲击事件(图14),大能级的

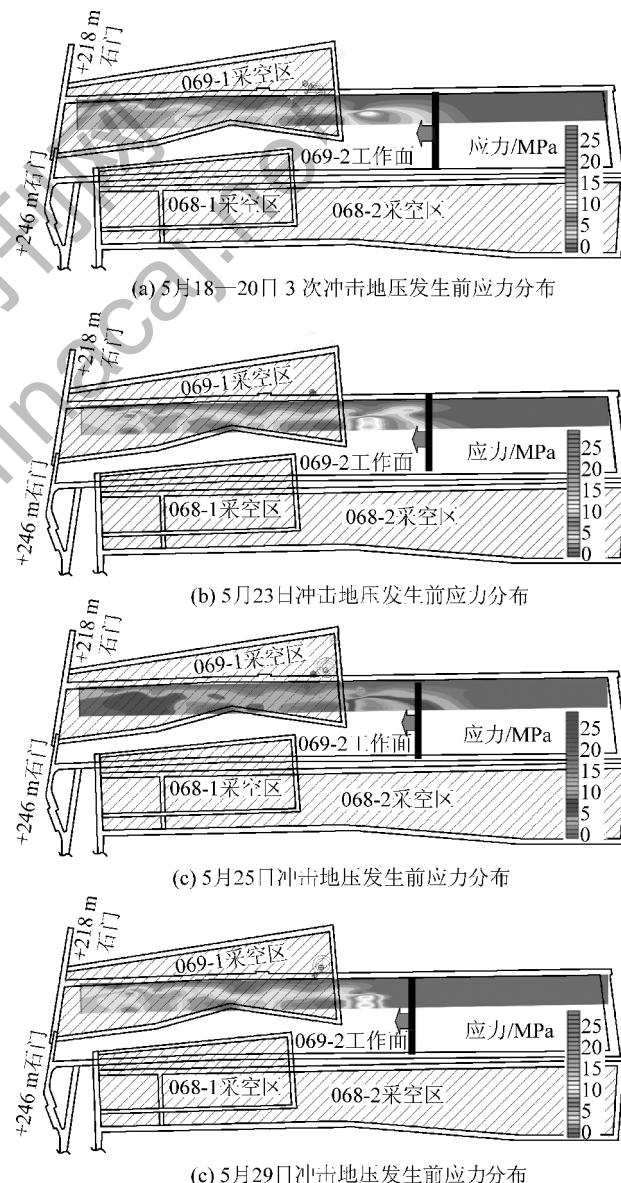


图14 冲击事件与煤体应力分布

Fig. 14 Distribution of burst events and coal body stress

事件主要分布在069-1采空区开切眼前后，并且主要为底板破裂事件，依次远离下巷下帮，几乎每3天发生1次大能级事件，并且每次地面都有震感，充分说明了高集中静载荷一旦形成很难根本性驱散。与应力实测图对比，发现高的应力集中区并非微震产生区，煤岩破裂主要集中在采空区下，此处煤岩松散，是高能量传递的通道和突破口，也是冲击显现区。由于数值模拟预评价与现场实测高度吻合，现场依据理论与实测结果预先进行了多项解危措施，6次冲击都没有影响生产正常进行，目前本工作面已经安全回采结束。

## 5 结 论

1) 地质赋存特征或者不合理的开采造成静载荷高度集中区，巷道开口就面临冲击威胁，此类冲击地压监测与防治以集中静载荷为主，并且需要采取分步评价，分步驱散，联合检验的方法。

2) 开采部署造成的严重冲击危险区域，很难通过局部措施从根本上消除冲击危险，因此掘进危险区也是回采的危险区，针对不同时期，多种方法联合评价结果吻合较好，实践证明方法得当，可以推广。

3) 鉴于微震等地球物理方法监测到的动载荷信息具有正负双向信息，而集中静载荷本身就是冲击启动的内因，又同时会转化为动载荷，因此针对采掘空间集中静载荷的评价、监测技术开发与提升将是今后研究的重点，地球物理方法起到检验与缩小研究范围的作用。

## 参考文献( References) :

- [1] 潘一山,李忠华,章梦涛. 我国冲击地压分布、类型、机制及防治研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(11):1844-1851.  
Pan Yishan Li Zhonghua Zhang Mengtao. Distribution type mechanism and prevention of rockburst in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2003 22(11):1844 - 1851.
- [2] 姜耀东,赵毅鑫,刘文岗,等. 煤岩冲击失稳的机制和试验研究[M]. 北京:科学出版社 2009.
- [3] 章梦涛. 我国冲击地压预测和防治[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版 2001,20(4):434-435.  
Zhang Mengtao. Forecast and prevention of rockburst in China [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition 2001 20(4):434 - 435.
- [4] 齐庆新,李首滨,王淑坤. 地音监测技术及其在矿压监测中的应用研究[J]. 煤炭学报,1994,19(3):221-232.  
Qi Qingxin Li Shoubin ,Wang Shukun. Application of AE method

technique in monitoring ground pressure [J]. Journal of China Coal Society ,1994 ,19( 3) :221 - 232.

- [5] 潘一山,赵扬锋,官福海,等. 矿震监测定位系统的研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报 2007,26(5):1002-1011.  
Pan Yishan Zhao Yangfeng Guan Fuhai *et al.* Study on rockburst monitoring and orientation system and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2007 26(5) :1002 - 1011.
- [6] 夏永学,蓝航,魏向志. 基于微震和地音监测的冲击危险性综合评价技术研究[J]. 煤炭学报 2011,36(S1):354-359.  
Xia Yongxue ,Lan Hang ,Wei Xiangzhi. Study of comprehensive evaluation technology for rock burst hazard based on microseismic and underground sound monitoring [J]. Journal of China Coal Society 2011 ,36( S1) :354 - 359.
- [7] 姜福兴,杨淑华,成云海,等. 煤矿冲击地压的微地震监测研究[J]. 地球物理学报 2006,49(5):1511-1516.  
Jiang Fuxing ,Yang Shuhua ,Cheng Yunhai *et al.* A study on microseismic monitoring of rockburst in coal mine [J]. Chinese Journal of Geophysics 2006 49(5) :1511 - 1516.
- [8] 聂百胜,何学秋,王恩元,等. 电磁辐射法预测煤矿冲击地压[J]. 太原理工大学学报 2000,31(6):609-611.  
Nie Baisheng He Xueqiu ,Wang Enyuan *et al.* Forecasting rockburst with the electromagnetic emission method in coal mine [J]. Journal of Taiyuan University of Technology 2000 31(6) :609 - 611.
- [9] 王恩元,何学秋,刘贞堂,等. 煤岩动力灾害电磁辐射监测仪及其应用[J]. 煤炭学报 2003,28(4):366-369.  
Wang Enyuan ,He Xueqiu ,Liu Zhentang ,*et al.* Electromagnetic radiation detector of coal or rock dynamic disasters and its application [J]. China Safety Science Journal 2003 ,28( 4) :366 - 369.
- [10] 刘晓斐,王恩元,赵恩来,等. 孤岛工作面冲击地压危险综合预测及效果验证[J]. 采矿与安全工程学报 2010,27(2):215-219.  
Liu Xiaofei ,Wang Enyuan Zhao Enlai *et al.* Island face percussive ground pressure dangerous integrated forecasting and effect validation [J]. Journal of Mining and Safety Engineering 2010 27 ( 2) :215 - 219.
- [11] 王存文,姜福兴,孙庆国,等. 基于覆岩空间理论的冲击地压预测技术及应用[J]. 煤炭学报 2009,34(2):150-155.  
Wang Cunwen Jiang Fuxing Sun Qingguo *et al.* The forecasting method of rock - burst and the application based on overlying multi - strata spatial structure theory [J]. Journal of China Coal Society 2009 ,34( 2) :150 - 155.
- [12] 曹安业,窦林名,李志华,等. 高应力区微震监测信号特征分析[J]. 采矿与安全工程学报 2007,24(2):146-149,154.  
Cao Anye ,Dou Linming Li Zhihua *et al.* Characteristic of micro seismic monitoring signal in high stressed zone [J]. Journal of Mining and Safety Engineering 2007 24(2) :146 - 149 ,154.
- [13] 王超. 基于未确知测度理论的冲击地压危险性综合评价模型及应用研究[D]. 徐州:中国矿业大学 2011.
- [14] 刘金海,翟明华,郭信山,等. 震动场、应力场联合监测冲击地压的理论与应用[J]. 煤炭学报 2014,39(2):353-363.

(下转第 98 页)

- [2] 王金华. 特厚煤层大采高综放工作面成套装备关键技术[J]. 煤炭科学技术 2013 ,41( 9 ): 1 - 5 28.  
Wang Jinhua. Key technology of complete equipment for fully - mechanized top coal caving face with large mining height in extra - thick seam [J]. Coal Science and Technology 2013 ,41( 9 ): 1 - 5 28.
- [3] 苏林军, 朱峰. 放顶煤液压支架的创新与发展[J]. 煤炭科学技术 2011 ,39( 4 ): 84 - 88.  
Su Linjun ,Zhu Feng. Innovation and development of hydraulic powered caving support [J]. Coal Science and Technology ,2011 ,39( 4 ): 84 - 88.
- [4] 孟国营, 李国平, 沃磊等. 重型刮板输送机成套装备智能化关键技术[J]. 煤炭科学技术 2014 ,42( 9 ): 57 - 60.  
Meng Guoying ,Li Guoping ,Wo Lei *et al*. Intelligent key technologies of complete heavy scraper conveyor equipment [J]. Coal Science and Technology 2014 ,42( 9 ): 57 - 60.
- [5] 杨培举, 刘长友. 综放面端头基本顶结构与合理支护参数[J]. 采矿与安全工程学报 2012 ,29( 1 ): 26 - 32.  
Yang Peiju ,Liu Changyou. Structure forms of basic roof and reasonable supporting parameters in ends of fully - mechanized top caving face [J]. Journal of Mining & Safety Engineering ,2012 ,29 ( 1 ): 26 - 32.
- [6] 任怀伟, 王国法, 李首滨等. 7m 大采高综采智能化工作面成套装备研制[J]. 煤炭科学技术 2015 ,43( 11 ): 116 - 121.  
Ren Huawei ,Wang Guofa ,Li Shoubin *et al*. Development of intelligent sets equipment for fully - mechanized 7m height mining face [J]. Coal Science and Technology 2015 ,43( 11 ): 116 - 121.
- [7] 王国法. 煤矿高效开采工作面成套装备技术创新与发展[J]. 煤炭科学技术 2010 ,38( 1 ): 63 - 68.  
Wang Guofa. Innovation and development of completed set equipment and technology for high efficient coal mining face in underground mine [J]. Coal Science and Technology 2010 ,38( 1 ): 63 - 68.
- [8] 朱军. 年产千万吨综采工作面液压支架的研制[J]. 煤矿开采 2011 ,16( 3 ): 98 - 100 88.  
Zhu Jun. Development of powered support for full - mechanized mining face with 10Mt/a [J]. Coal Mining Technology ,2011 ,16 ( 3 ): 98 - 100 88.
- (上接第 70 页)
- Liu Jinhai ,Zhai Minghua ,Guo Xinshan ,*et al*. Theory of coal burst monitoring using technology of vibration field combined with stress field and its application [J]. Journal of China Coal Society 2014 ,39( 2 ): 353 - 363.
- [15] 姜福兴, 冯宇, 刘晔. 采场回采前冲击危险性动态评估方法研究[J]. 岩石力学与工程学报 2014 ,33( 10 ): 2101 - 2106.  
Jiang Fuxing ,Feng Yu ,Liu Ye. Dynamic evaluation method for rockburst risk before stopping [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2014 ,33( 10 ): 2101 - 2106.
- [16] 潘俊锋, 宁宇, 毛德兵等. 煤矿开采冲击地压启动理论[J]. 岩石力学与工程学报 2012 ,31( 3 ): 586 - 596.  
Pan Junfeng ,Ning Yu ,Mao Debing ,*et al*. Theory of rock burst start - up during coal mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2012 ,31( 3 ): 586 - 596.
- [9] 程骏, 张严敬, 荣和芳. 7m 大采高综采液压支架设计及配套[J]. 煤矿开采 2013 ,18( 1 ): 25 - 27.  
Cheng Jun ,Zhang Yanjin ,Rong Hefang. Design of powered support and equipment matching for 7m mining height [J]. Coal Mining Technology 2013 ,18( 1 ): 25 - 27.
- [10] 毛德兵, 姚建国. 大采高综放开采适应性研究[J]. 煤炭学报, 2010 ,35( 11 ): 1837 - 1841.  
Mao Debing ,Yao Jianguo. Adaptability of longwall top coal caving with high cutting height [J]. Journal of China Coal Society 2010 ,35( 11 ): 1837 - 1841.
- [11] 闫少宏, 尹希文. 大采高综放开采几个理论问题的研究[J]. 煤炭学报 2008 ,33( 5 ): 481 - 484.  
Yan Shaohong ,Yin Xiwen. Discussing about the main theoretical problems of longwall with top coal caving [J]. Journal of China Coal Society 2008 ,33( 5 ): 481 - 484.
- [12] 李明忠, 刘珂珉, 曾明胜等. 大采高放顶煤开采技术及其发展前景[J]. 煤矿开采 2006 ,11( 5 ): 28 - 29 43.  
Li Mingzhong ,Liu Kemian ,Zeng Mingsheng ,*et al*. Full seam cutting and caving mining technology in and its development prospect [J]. Coal Mining Technology 2006 ,11( 5 ): 28 - 29 43.
- [13] 曹新奇, 马立强, 杨明福等. 大倾角煤层工作面端头支护及超前支护技术[J]. 煤炭科学技术 2012 ,40( 7 ): 1 - 4.  
Cao Xinqi ,Ma Liqiang ,Yang Mingfu ,*et al*. Face end support and advance support technology in high inclined seam [J]. Coal Science and Technology 2012 ,40( 7 ): 1 - 4.
- [14] 黄庆国. 回采工作面端头支护探析[J]. 煤炭科学技术 ,1998 ,26( 8 ): 46 - 48.  
Huang Qingguo. Spatial analysis of support technique in face end [J]. Coal Science and Technology ,1998 ,26( 8 ): 46 - 48.
- [15] 刘昌平. 大倾角厚煤层长壁综放工作面端头支护技术实践[J]. 煤炭科学技术 2005 ,33( 10 ): 23 - 25.  
Liu Changping. Practices on face end support technology for fully mechanized top coal caving mining face in deep inclined thick seam [J]. Coal Science and Technology 2005 ,33( 10 ): 23 - 25.
- [17] 赵阳升, 冯增朝, 常宗旭. 试论岩体动力破坏的最小能量原理[J]. 岩石力学与工程学报 2002 ,21( S1 ): 1931 - 1933.  
Zhao Yangsheng ,Feng Zengchao ,Chang Zongxu. The least energy principle of dynamical rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2002 ,21( S1 ): 1931 - 1933.
- [18] 王书文, 徐圣集, 蓝航等. 地震 CT 技术在采煤工作面的应用研究[J]. 煤炭科学技术 2012 ,40( 7 ): 24 - 27 84.  
Wang Shuwen ,Xu Shengji ,Lan Hang ,*et al*. Study on Seismic CT technology applied to coal mining face [J]. Coal Science and Technology 2012 ,40( 7 ): 24 - 27 84.
- [19] 潘俊锋, 王书文, 刘少虹等. 基于集中静载荷探测的冲击地压危险性预评价[J]. 岩土工程学报 2014 ,36( 7 ): 1227 - 1234.  
Pan Junfeng ,Wang Shuwen ,Liu Shaohong ,*et al*. Pre - evaluation of burst hazards based on concentrated static load detection [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2014 ,36( 7 ): 1227 - 1234.