



移动扫码阅读

李 康,陈建强,赵志鹏,等.临空巷道冲击地压耦合致灾因素及时空演化过程研究[J].煤炭科学技术,2019, 47(12):76-82. doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.12.011

LI Kang, CHEN Jianqiang, ZHAO Zhipeng, et al. Study on disaster-causing factors and evolution process of rock burst in roadway near gob [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47 (12): 76 - 82. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.12.011

临空巷道冲击地压耦合致灾因素及时空演化过程研究

李 康¹,陈建强¹,赵志鹏¹,闫瑞兵¹,杜涛涛^{2,3}

(1.神华新疆能源有限责任公司,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:为了研究 I010203 工作面临空巷道多次矿震诱发冲击显现的原因及规律,采用 ARAMIS M/E 微震监测系统、PASAT-M 便携式微震监测系统和冲击地压应力监测系统进行实时监测,通过地质因素和开采因素分析确定了 6 个影响因素,进一步根据煤体应力监测数据、支架压力监测数据、微震监测数据,分析了 I010203 工作面回采过程煤体应力的集中程度、演化过程,研究了工作面周期来压期间、断层区域、侧向顶板的微震活动演化过程,针对回采期间发生的一次矿震引起的弱冲击显现案例,利用 PASAT-M 便携式微震监测系统对弱冲击显现区域进行了探测,依据综合监测分析结果探讨了煤体应力、围岩活动的相互关系及致灾过程,确定了 I010203 工作面临空巷道矿震诱发冲击显现的原因及规律。结果表明:I010203 工作面临空巷道煤体应力集中程度高,实体侧应力集中系数达到 2.05~8.59、煤柱侧达到 1.76~3.16,采动与构造应力叠加后形成的高静载接近或达到煤体冲击地压发生的临界应力,断层、侧向顶板结构以及顶板周期破断是影响矿震发生的主要因素,高集中程度的静载荷为冲击致灾提供易满足的应力条件,工作面来压期间,断层、侧向顶板结构的能量突然释放,诱发大能量矿震发生,以动载形式至采场空间,使接近或临界应力条件的煤体进一步升高,达到冲击地压发生的临界条件,从而诱发冲击显现。

关键词:矿震;冲击地压;静-动载;致灾因素

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)12-0076-07

Study on disaster-causing factors and evolution process of rock burst in roadway near gob

LI Kang¹, CHEN Jianqiang¹, ZHAO Zhipeng¹, YAN Ruibing¹, DU Taotao^{2,3}

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

Abstract: In order to study the causes and laws of the multiple mine earthquake induced shocks in the gob area of I010203, the ARAMIS M/E microseismic monitoring system, PASAT-M portable seismic monitoring system and impact ground pressure stress monitoring system are used for real-time monitoring, through the analysis of geological and mining factors, the six influencing factors were determined. According to the coal stress monitoring data, the monitoring data of the support pressure and the microseismic monitoring data, the concentration and evolution process of the coal body stress during the mining process of I010203 working face were analyzed and the working surface cycle was studied. The evolution process of microseismic activity during the period of working face cycle, fault zone and lateral roof was studied, and the weak shock caused by a mine shock occurred during the mining period was also analyzed. In the case study, the PASAT-M portable microseismic monitoring system was used to detect the weak impact area. According to the results of comprehensive monitoring and analysis, the relationship between coal body stress and surrounding rock activities and the disaster-causing process were discussed. The causes and laws of mine-induced earthquake induced impact of I010203 working face were determined. The results show that I010203

收稿日期:2019-05-25;责任编辑:杨正凯

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804205);国家自然科学基金资助项目(51874231,51504184)

作者简介:李 康(1986—),男,新疆沙湾人,工程师。E-mail:1109380781@qq.com

working area faces high stress concentration in the gob, the physical side reaches 2.05~8.59, and the coal pillar side reaches 1.76~3.16. The high static load formed by the superposition of mining and tectonic stress is close to or reaches the impact pressure of coal body. Critical stress, fault, lateral roof structure and roof cycle breaking are the main factors affecting the occurrence of mining earthquakes. The static load with high concentration provides easy-to-satisfy stress conditions for impact disasters, working face pressure, fault, lateral roof structure. The sudden release of energy of structure induces occurrence of large-energy mine earthquakes, and the dynamic load form is transferred to stope space, so that the coal body near the critical or critical stress condition is further raised to the critical condition where the rock burst pressure occurs, thereby inducing the impact.

Key words: mine earthquake; rock burst pressure; static-dynamic load; disaster-causing factors

0 引 言

冲击地压^[1-4]是煤岩动力灾害之一,其致灾因素与致灾过程复杂,因矿井条件而异。窦林名等^[5]通过理论研究掌握了冲击地压的发生为动载与静载互相叠加使得能量和应力条件同时临界载荷而诱发冲击地压,系统地提出了动静载叠加诱发冲击矿压的原理;李铁等^[6]基于长时间和高精度冲击地压观测与采矿作业数据分析,从采掘活动与发生冲击地压的定量关系,探索采掘扰动对岩体动力响应的调制作用;曹安业等^[7]通过分析冲击地压激发震动波能量的传播模式、衰减特征,得出冲击地压震动能量的传播衰减特征主要依赖于能量几何扩散、传播岩体介质的阻尼衰减,以及冲击地压震源的震动位移场和能量辐射特征的综合影响。潘俊锋等^[8,9]提出冲击启动理论认为冲击地压发生依次经历冲击启动、冲击能量传递、冲击地压显现 3 个阶段,冲击的载荷源分为内因与外因,采动围岩近场系统内集中静载荷的积聚是冲击启动的内因,采动围岩远场系统外集中动载荷对静载荷的扰动、加载是冲击启动的外因,可能的冲击启动区为极限平衡区应力峰值最大区;冲击地压响应不仅与冲击地压强度有关,还与震动波传播衰减有关^[10-11],初始震动比较剧烈但衰减很快,传播一定距离后震动能量明显降低。

通过以上学者的研究表明:冲击地压的發生的影响因素为动、静载荷的相互叠加以及震动在煤岩体介质中的传播特征。笔者将依托神华新疆能源有限责任公司宽沟煤矿 I010203 工作面矿压显现特征,通过冲击地压发生、显现位置,现场监测情况,针对临空巷道多次冲击地压诱发冲击显现的问题,考虑临空巷道的冲击地压影响因素,包括区段煤柱形成侧向结构、断层等局部构造、顶板周期来压等,进一步揭示冲击地压影致灾过程及致灾关系。

1 工程概况

1.1 矿井及工作面概况

宽沟煤矿位于呼图壁县城西南 70 km 处,地形

南高北低,西高东低,南部基岩裸露,受近东西向白杨沟河切割的影响,南部地形陡峻,向北地形逐渐变缓,形成近南北向的宽阔“V”字形冲沟。矿区主要可采煤层有 B0、B1、B2、B3、B4-1、B4-1 下、B4-2 煤层共 6 层,现开采 B2 煤层,采用两翼布置,综放开采。

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;工作面下平巷水平标高为+1 318 m,工艺巷水平标高为+1 339 m,上平巷水平标高为+1 365 m;工作面对应地面标高为+1 612—+1 660 m。I010203 工作面倾斜长度 192 m,可采走向长度 1 469 m,采高 3.2 m,放煤厚度 6.3 m,工作面倾角平均 14°。I010203 工作面上部为已开采的 I010405、I010403 工作面采空区,I010203 工作面上部 0~740 m 为 I010405 工作面采空区,平均埋深 320 m,煤层具有弱冲击倾向,顶板具有强冲击倾向。

工作面回采过程中,经常伴有较大的矿震事件,以 2018 年 3 月 7 日为例,工作面推进至 1 398 m,下平巷煤柱侧顶板发生 1 次 3.1×10^5 J 大能量事件,超前 I010203 工作面 60 m,震源位置如图 1 所示。

造成下平巷里程 1 348~1 344 m(超前工作面 50~55 m)段下帮肩窝有网兜。

1.2 冲击地压主要影响因素概况

1) 坚硬顶板。研究表明,关键层对冲击地压发生影响显著,工作面有个两关键层,即第 1 关键层岩性为细砂岩,平均厚度 19.3 m,单轴抗压强度平均 115.25 MPa;第 2 关键层为第 11 层,岩性为粗砂岩,平均厚度 26 m,单轴抗压强度平均 102.65 MPa,该岩层特征容易积聚弹性能。

2) 坚硬煤层。根据 B2 煤层的力学性质测试结果煤层上部单轴抗压强度 24.14 MPa,煤层中部单轴抗压强度 34.37 MPa,煤层下部单轴抗压强度 19.10 MPa,煤层强度高,具有较强的积聚弹性能能力。

3) 地应力。根据地应力测试结果,宽沟矿最大主应力范围为 12.8~13.9 MPa;中间主应力范围 6.5~8.1 MPa;最小主应力范围 5.50~7.37 MPa;最

大主应力方向为 184° 左右,主应力与水平面的夹角

皆为近水平方向 ($-9.9^\circ \sim 3.4^\circ$)。

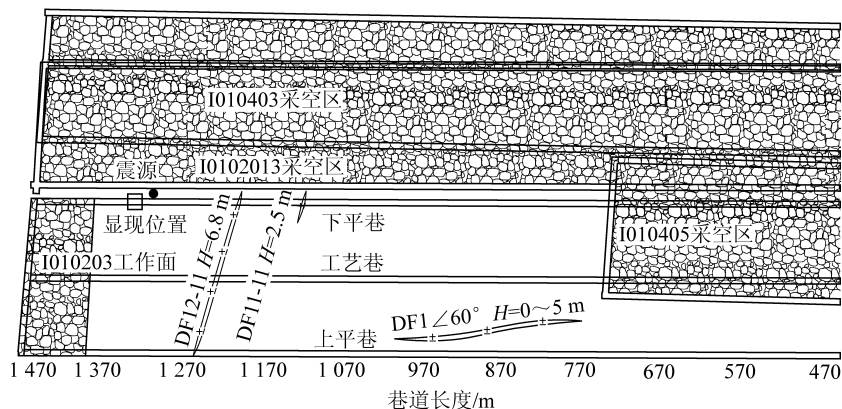


图1 工作面震源及显现位置

Fig.1 Source and location of working face

4) 局部构造。地质报告及三维勘探未揭露有些小断层,但实际掘进揭露了 I010203 工作面在 $1\,350 \sim 1\,050\text{ m}$ 、 $800 \sim 400\text{ m}$ 范围存在小背斜、断层。局部构造容易引起局部范围的应力集中和围岩活动的异常,是地质因素中对冲击地压危险影响比较显著的因素。

5) 侧向顶板结构。受临近 I010201 工作面开采的影响, I010203 工作面下平巷受侧向支承压力的作用,与采动应力叠加后,应力水平进一步升高,当 I010203 工作面采动应力进一步叠加,多因素叠加使工作面冲击危险性升高。

6) 上层煤开采后空间结构。I010203 工作面开采与其上方 B4 煤层 I010405 工作面开采,形成了侧向采空区结构、上方采空区结构的多结构条件,围岩活动、应力分布具有特殊性,是影响冲击地压的重要开采因素条件。

综上 6 个方面主要地质因素和开采技术因素对 I010203 工作面冲击地压发生有影响,但各因素又起不同作用,坚硬煤层容易积聚能量、具备形成高应力集中的条件,地应力加剧静载应力集中起重要作用;坚硬顶板、侧向结构、上覆结构不仅对静载有影响,同时提供动载荷作用。通过分源监测,从动静载形成的致灾因素及致灾过程开展研究,为冲击地压防治提供依据。

2 静-动载荷致灾因素监测分析

2.1 静-动载荷分源监测

采动围岩近场静载荷的积聚是冲击地压发生的基础,当基础静载荷大于发生冲击地压的临界应力,即使无外界载荷作用也会发生冲击显现;当基础静载荷高,但未达到发生冲击地压的临界应力,则需要很小外界动载荷就可诱发;当基础静载荷低,则需要

足够大外界动载荷扰动才能诱发。因此,根据冲击地压的发生条件^[12]分源实测静载荷的水平 and 动载荷影响。

$$\sigma_j + \sigma_d \geq \sigma_{b, \min} \quad (1)$$

式中: σ_j 为煤岩体中的静载荷; σ_d 为煤岩体中诱发的动载荷; $\sigma_{b, \min}$ 为冲击地压发生时的临界应力。

一般情况下,采掘围岩静载由原岩应力和支承压力组成,即

$$\sigma_j = \sigma_{j1} + \sigma_{j2} = (k + \lambda) \gamma h \quad (2)$$

式中: γ 为上覆岩层的容重; h 为上覆岩层厚度; λ 为构造应力集中系数; k 为支承压力集中系数。

1) 静载监测方法。煤体应力监测。KJ21 冲击地压应力监测系统可实测支承压力分布规律,为冲击危险区域的静载荷应力演化规律^[13]的重要手段。

地震波 CT 探测。采用 PASATM 便携式微震仪进行煤体静载异常探测,基于地震波波速对煤岩体应力状态探测技术,建立的冲击地压危险致灾因素辨识模型^[14-15],确定 C 作为冲击地压危险性指数。

地震波在不同的煤岩体介质中传播,传播速度及波速梯度存在差异,因此引进“波速异常系数 AC ”及“波速梯度系数 GC ”。

$$AC = \frac{V_p - V_p^0}{V_{pc} - V_p^0} \quad (3)$$

式中: V_p 为探测区域内某点纵波波速; V_p^0 为探测区域内纵波波速平均值; V_{pc} 为探测区域煤岩体极限纵波波速(煤岩体临界破坏时)。

$$GC = \frac{G_p}{G_p^c} \quad (4)$$

式中: G_p 为探测区域某点的纵波波速梯度; G_p^c 为现场条件下探测区域煤岩体极限纵波波速梯度(煤岩体临界破坏时)。

为综合反映波速和波速梯度对冲击危险性的影响,最终的冲击地压危险性评价模型为

$$C=aAC + bGC \tag{5}$$

式中: C 为冲击地压危险性指数; a 、 b 分别为两因子的权重系数,各取 0.5。

C 值与冲击地压危险等级对应标准见表 1。

表 1 冲击地压危险性分类

Table 1 Rockburst hazard classification

类别	I	II	III	IV
等级	无	弱	中	强
C 值	<0.25	$0.25 \leq C < 0.50$	$0.50 \leq C < 0.75$	$0.75 \leq C \leq 1.00$

2) 动载监测方法。采用 ARAMIS M/E 微震监测系统^[16]监测震动能量大于 100 J、频率范围在 0~150 Hz 的震动事件。在现场实测的基础上,分析震动能量、震动频次与其他压力监测数据的对应关系,确定震动能量和震动频次的阈值,当微震监测结果达到所确定的阈值时,煤岩体受到动载荷的影响,以此实现动载荷的监测。

2.2 临空巷道静载荷实测分析

通过开采过程煤体应力演化过程监测,得出临空巷道支承压力压力集中系数 k 。①实体煤侧 k 实测结果为 2.05~8.59,显著影响范围为工作面前方 60 m。②煤柱侧 k 实测结果为 1.76~3.16,显著影响范围为工作面前方 60 m。监测结果如图 2 所示。

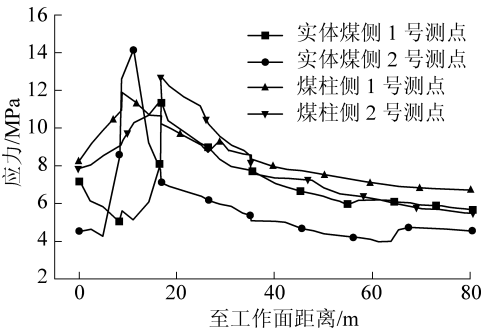


图 2 临空巷支承压力监测结果

Fig.2 Monitoring results of supporting pressure in the roadway

由地应力测试结果,构造应力集中系数为 1.72~1.97;根据煤体应力监测结果,支承压力集中系数为:实体侧为 2.05~8.59,煤柱侧实测结果为 1.76~3.16。根据式(2),临空巷静载实测结果为实体煤侧静载:

$$\sigma_j = (3.77 \sim 10.56) \gamma h \tag{6}$$

煤柱静载:

$$\sigma_j = (3.48 \sim 5.13) \gamma h \tag{7}$$

I010203 工作面埋深 295~342 m,平均埋深 320 m,上覆岩层的容重取 25 kN/m³,经计算实体煤侧静

载为 30.16~84.48 MPa;煤柱静载为 27.84~41.04 MPa。

通过现场实测表明,临空巷道煤体静载最大达到原岩应力的 10 倍,局部煤体应力达到或超过煤体单轴抗压强度,冲击地压发生的临界应力一般高于单轴抗压强度,但高静载作用下造成巷道发生塑形变形破坏,减小其承载能力,在较小的动载扰动下可能会诱发冲击显现。

2.3 临空巷道动载荷监测分析

现场实践表明,动载作用主要以围岩破裂、失稳过程产生的冲击地压动载作用为主,爆破扰动等产生动载不在本文分析的范畴。

1) 坚硬顶板周期破断。2018 年支架压力与微震事件能量频次关系如图 3 所示。

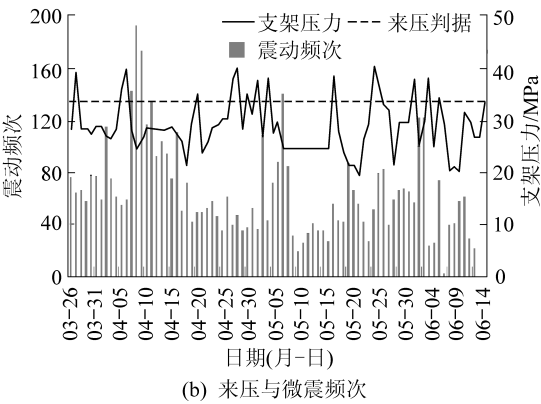
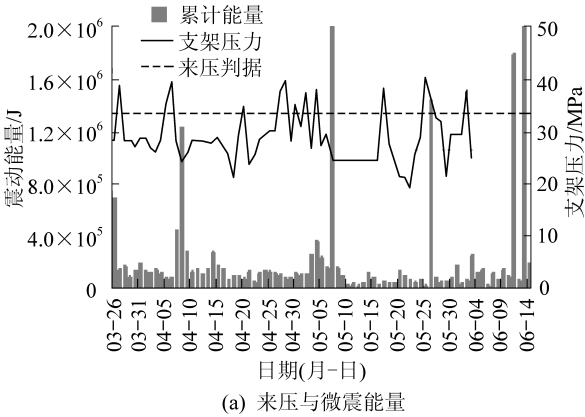


图 3 支架压力与微震事件能量频次关系
Fig.3 The relationship between the pressure of the support and the energy and frequency of the microseismic event

通过支架压力监测分析得到坚硬顶板周期破断发生在 1 370.8 m(2018 年 3 月 27 日)、1 347.6 m(2018 年 4 月 6 日)、1 317.0 m(2018 年 4 月 21 日)、1 285.6 m(2018 年 5 月 7 日)、1 268.0 m(2018 年 5 月 26 日)、1 248.6 m(2018 年 6 月 12 日)日前后,通过 ARAMIS M/E 微震监测得到,在以上坚硬顶板破断时,引起 2018 年 3 月 26 日、4 月 7 日、5 月 7 日、5 月 26 日、6 月 12 日、6 月 13 日冲击地压的发

生,同时在顶板周期破断时,围岩活动比较频繁。坚硬顶板周期破断过程易发生冲击地压^[17-18],引起围岩频繁活动,以动载形式传播至震源近、远场,引起煤体应力突然变化。

2) 临空围岩失稳。侧向围岩活动微震事件曲线如图4所示,为开采过程临空围岩的微震事件能量频次曲线,初采期间至2018年2月3日工作面推进至1452 m时,侧向围岩活动强度开始增加;推进至2018年2月28日工作面位置1414 m时,侧向围岩活动的频次和强度均增加;工作面推进至1398 m时,侧向围岩产生了冲击地压;工作面在推进至1367 m过程,临空巷道再次发生冲击地压。侧向顶板活动也具有一定的周期性^[19],步距由17.8~39.7 m不等,冲击地压发生主要具有2个特征:①侧向顶板失稳过程产生冲击地压;②侧向顶板活动集中区域的煤体产生冲击地压。2种冲击地压产生形式,均对工作面近场产生巷道变形的影响。

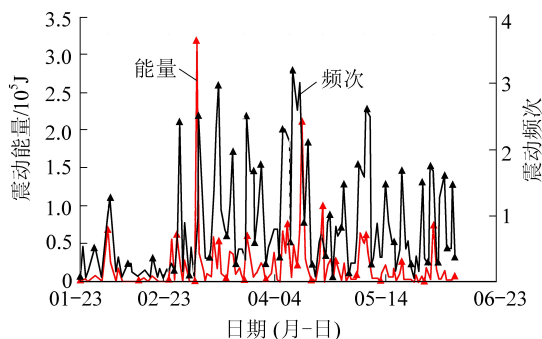


图4 侧向围岩活动微震事件曲线

Fig.4 Microseismic event curve of lateral surrounding rock

3) 断层影响。断层区域微震事件变化曲线如图5所示,自2018年3月18日,工作面位置1380 m开始,该DF12-11断层区域的微震事件开始增多,此时工作面距离DF12-11断层162 m;距离DF11-12断层162~148 m时,DF11-12断层附近围岩活动明显增加,DF11-11断层开始聚集震动事件;工作面距DF11-12断层推进过程(148~108 m),DF11-12断层附近围岩频繁活动,以DF11-12断层活动为主,DF11-11断层活动也开始增加;工作面向DF11-12断层推进过程(108~83 m),DF11-12断层附近围岩活动减弱,DF11-11断层活动也逐渐增强;工作面向DF11-12断层推进过程(83~54 m),DF11-12断层附近围岩活动持续减弱,以DF11-11断层活动为主;工作面向DF11-12断层推进过程(54~25 m),DF11-12断层附近围岩活动再次集中。冲击地压在断层区域多次发生,可造成临空巷道变形显现,为冲击地压易发区^[20],是冲击地压动载致灾的主要因素。

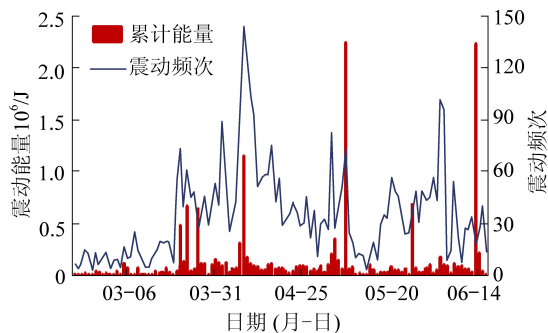


图5 断层区域微震事件变化曲线

Fig.5 Variation curve of microseismic event in fault region

综上所述,I010203工作面临空巷道静载荷集中程度高,冲击地压频发发生于坚硬顶板周期断裂、侧向顶板结构失稳以及断层附近,为主要动载致灾因素。

3 临空巷道致灾过程监测分析

结合静-动载致灾演化规律分析“3·7”弱冲击显现事件。

3.1 静载应力演化过程

CT探测结果如图6所示。

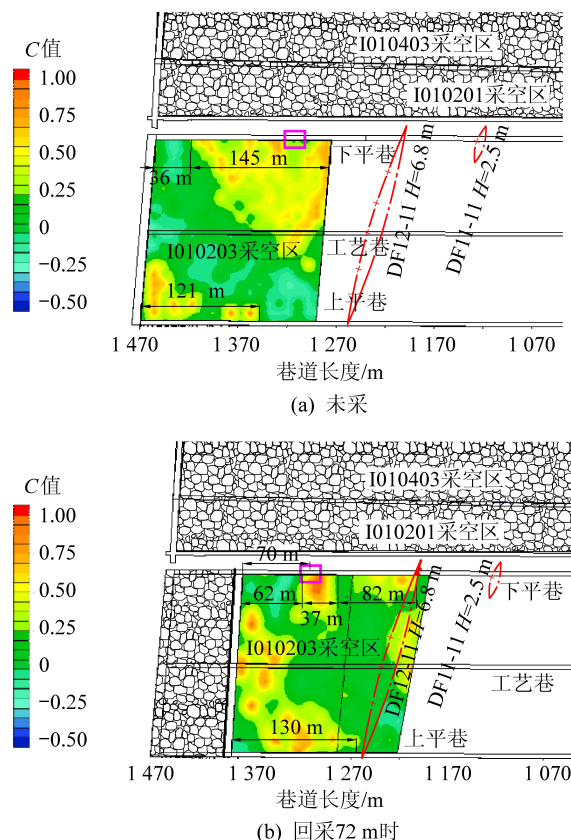


图6 工作面应力演化过程

Fig.6 Stress evolution process of working face

在发生冲击显现1344~1348 m范围,即如图中黄颜色区域,其C值为0.50~0.75,具有中等冲击

危险,采前探测该区域属于应力集中区;发生冲击显现后,在该区域仍存在应力集中现象。根据探测结果分析静载应力演化过程,采前具有一定程度的应力集中,但距离工作面较远,煤体应力集中程度处于升高过程,随工作面的推进,工作面前方 60 m 高应力集中区局部区域的煤体应力集中程度达到冲击临界应力水平,冲击危险性程度高。

因此,发生冲击显现的位置具有较高的应力集中,为冲击地压致灾提供了静载应力条件。

3.2 动载作用演化过程

工作面围岩活动演化过程如图 7a 所示。

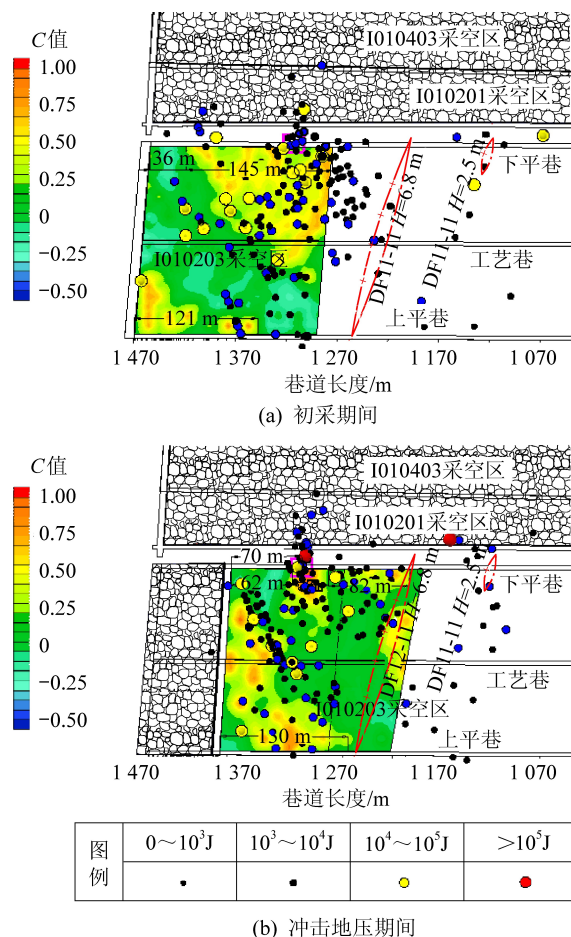


图7 工作面围岩活动演化过程

Fig.7 Evolution process of surrounding rock in working face

第一方面作用演化过程为:初采期间,1 344~1 348 m属于静载应力集中区,震源位置 1 338 m附近也存在应力集中,且微震事件主要集中 1 300~1 348 m附近,对比图 7b 结果,1 300~1 348 m区域的冲击地压事件频发,对煤体应力集中起到加剧的作用。冲击地压发生的演化过程为:冲击地压发生在坚硬顶板破断期间,通过图 7b 结果,工作面附近应力集中也进一步验证顶板破断;图 7b 中事件分布是冲击地压发生前几天内的投影,也明显可以看出

在震源位置,本工作面和侧向围岩均集中了大量事件,表明该区域围岩产生破裂、发展,至冲击地压发生时的失稳过程。

因此,冲击地压发生以动载形式诱发处于临界应力条件的煤体显现,为冲击地压致灾提供了动载扰动条件。

通过分析可知,I010203 工作面临空巷道冲击地压致灾规律为:①构造应力、侧向支承压力及超前支承压力三者叠加使临空巷道围岩静载荷升高,构成高应力集中区;②在周期来压期间,顶板岩层破断产生动载以弹性波形式传播,使工作面近场煤体应力超过其所能承受的临界水平,从而造成临空巷道冲击致灾。

4 结 论

根据冲击地压发生的应力条件,ARAMIS M/E 微震监测系统、PASAT-M 便携式微震监测系统和冲击地压应力监测系统开展了临空巷道冲击致灾因素及过程研究,得到主要结论如下:

1)通过现场实测获得了实体煤侧支承压力集中系数 k 为 2.05~8.59,煤柱侧为 1.76~3.16,显著影响范围为工作面前方 60 m。构造应力集中系数 λ 为 1.72~1.97。

2)临空巷道具有高静载。实测临空巷实体侧煤体静载为 $(3.77 \sim 10.56) \gamma h$;临空巷道煤柱静载为 $(3.48 \sim 5.13) \gamma h$,采动影响区具有高静载。

3)微震监测表明,断层、侧向顶板结构以及顶板周期破断是影响冲击地压发生的主要因素,容易引起工作面岩层破坏发展,发生冲击地压。

4)冲击致灾过程为,高集中程度的基础静载荷,工作面来压期间坚硬顶板破断,引起断层、侧向顶板结构突然能量释放,发生冲击地压,以动载作用使工作面接近临界应力条件近场的煤体诱发冲击显现。

参考文献 (References):

- [1] 窦林名,何学秋.冲击矿压防治理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2001.
- [2] 蓝 航.浅埋煤层冲击地压发生类型及防治对策[J].煤炭科学技术,2014,42(1):9-13
LAN Hang.Prevention measures and types of mine strata pressure bump occurred in shallow depth seam[J].Coal Science and Technology,2014,42(1):9-13.
- [3] 夏永学,冯美华,李浩荡.冲击地压地球物理监测方法研究[J].煤炭科学技术,2018,46(12):54-60.
XIA Yongxue,FENG Meihua,LI Haodang.Study on rock burst geophysical monitoring method[J].Coal Science and Technology,

- 2018,46(12):54-60.
- [4] 窦林名,何江,曹安业,等.煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J].煤炭学报,2015,40(7):1469-1476.
DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, *et al.* Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7):1469-1476.
 - [5] 李铁,张建伟,吕毓国,等.采掘活动与矿震关系[J].煤炭学报,2011,36(12):2127-2132.
LI Tie, ZHANG Jianwei, LYU Yuguo, *et al.* Relationship between mining and mining-induced seismicity[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12):2127-2132.
 - [6] 曹安业,范军,牟宗龙,等.矿震动载对围岩的冲击破坏[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] 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.
 - [8] 潘俊锋,毛德兵.冲击地压启动理论与成套技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2016:73-88.
 - [9] 高明仕,窦林名,张农,等.岩土介质中冲击震动波传播规律的微震试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(7):1365-1371.
GAO Mingshi, DOU Linming, ZHANG Nong, *et al.* Experimental study on earthquake tremor for transmitting law of rock burst in geomaterials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7):1365-1371.
 - [10] 杜涛涛.矿震震动传播与响应规律[J].岩土工程学报,2018,40(3):418-425.
DU Taotao. Propagation and response laws of mine seism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3):418-425.
 - [11] 刘少虹,潘俊锋,刘金亮,等.基于卸支耦合的冲击地压煤层卸压爆破参数优化[J].煤炭科学技术,2018,46(11):21-29.
LIU Shaohong, PAN Junfeng, LIU Jinliang, *et al.* Optimization of blasting parameters for rock burst coal seam based on pressure release and support coupling[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11):21-29.
 - [12] 王书文,毛德兵,杜涛涛,等.基于地震CT技术的冲击地压危险性评价模型[J].煤炭学报,2012,37(S1):1-6.
WANG Shuwen, MAO Debing, DU Taotao, *et al.* Rockburst hazard evaluation model based on seismic CT technology[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S1):1-6.
 - [13] 朱志洁,张宏伟,兰天伟,等.重叠煤柱作用下综放采场围岩应力演化规律研究[J].煤炭科学技术,2017,45(3):26-31.
ZHU Zhijie, ZHANG Hongwei, LAN Tianwei, *et al.* Study on surrounding rock stress evolution law of fully-mechanized top coal caving mining face under role of overlapping coal pillars[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(3):26-31.
 - [14] 张平松,刘盛东,吴荣新.地震波CT技术探测煤层上覆岩层破坏规律[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15):2510-2513.
ZHANG Pingsong, LIU Shengdong, WU Rongxin. Observation of overburden failure of coal seam by CT of seismic wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15):2510-2513.
 - [15] 贾瑞生,孙红梅,樊建聪,等.一种冲击地压多参量前兆信息辨识模型及方法[J].岩石力学与工程学报,2014,33(8):1513-1519.
JIA Ruisheng, SUN Hongmei, FAN Jiancong, *et al.* Multiparameter precursor information identification model and method for rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(8):1513-1519.
 - [16] 于雷,闫少宏,毛德兵,等.基于ARAMIS M/E微震监测的大采高综放顶板活动规律[J].煤炭学报,2011,36(S2):293-298.
YU Lei, YAN Shaohong, MAO Debing, *et al.* Movement of roof strata of long wall with top coal caving with great mining height based on ARAMIS M/E micro-seismic monitoring[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2):293-298.
 - [17] 李新华,张向东.浅埋煤层坚硬直接顶破断诱发冲击地压机理及防治[J].煤炭学报,2017,42(2):510-517.
LI Xinhua, ZHANG Xiangdong. Mechanism and prevention of rock-burst induced by immediate roof breakage in shallow-buried coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2):510-517.
 - [18] 陈建强,闫瑞兵,刘昆轮.乌鲁木齐矿区冲击地压危险性评价方法研究[J].煤炭科学技术,2018,46(10):22-29.
CHEN Jianqiang, YAN Ruibing, LIU Kunlun. Study on evaluation method of rock burst danger in Urumqi Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10):22-29.
 - [19] 潘岳,顾士坦.周期性来压坚硬顶板裂纹萌生初始阶段的弯矩、剪力、挠度和应变能变化分析[J].岩石力学与工程学报,2014,33(6):1123-1134.
PAN Yu, GU Shitan. Analysis of bending moment, shear force, deflection and strain energy of hard roof at initial stage of cracking during periodic pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6):1123-1134.
 - [20] 潘立友,李彩荣,陈理强.断层夹持型不规则工作面冲击地压成因与防控[J].煤炭科学技术,2018,46(10):45-50.
PAN Liyou, LI Cairong, CHEN Liqiang. Causes and prevention of rock burst from irregular face clamped with fault[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10):45-50.