

DOI: 10.11779/CJGE201506019

# 高应力区分层开采冲击地压事故发生机理研究

姜福兴, 史先锋\*, 王存文, 魏全德, 姚顺利, 朱斯陶, 耿超

(北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 以某矿厚硬顶板条件下特厚煤层上分层开采发生的巷道与工作面同时冲击的事故为背景, 研究事故发生的机理与治理方法。研究表明: 引起事故的主要力源来自上层煤煤柱、不等宽区段煤柱、巨厚坚硬顶板和大断层等形成的集中应力; 主要冲击灾害体是巷道和工作面内的底煤; 底煤发生冲击的主要力学机理是底煤在水平应力突变条件下发生屈曲破坏, 并在垂直应力作用下发生冲击性滑移。提出了上层煤柱对下层煤采动影响范围与冲击危险范围的评估方法, 为制定恢复生产方案提供了科学依据。根据发生事故的机理, 制定并实施了恢复生产的方案, 通过实施危险区卸压措施和建立冲击危险实时监测预警体系, 工作面恢复了生产, 保障了安全开采。

**关键词:** 冲击地压; 发生机理; 集中应力; 上层煤煤柱影响; 底煤冲击

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2015)06-1123-09

**作者简介:** 姜福兴(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿山压力与岩层控制、微震监测工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiangfuxing1@163.com。

## Mechanical mechanism of rock burst accidents in slice mining face under high pressure

JIANG Fu-xing, SHI Xian-feng, WANG Cun-wen, WEI Quan-de, YAO Shun-li, ZHU Si-tao, GENG Chao

(Civil and Environmental Engineering School, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The mechanism and prevention of rock burst are investigated based on a rare rock burst accident in which the rock burst around working face and roadway occur simultaneously in the upper slice mining face of extremely thick coal seam with thick and hard roof. The results show that the main cause is the concentrated stress from the top coal pillar, sectional coal pillar with different widths, thick and hard roof and large fault. The bottom coal under roadway and working face is the main hazard body of rock burst. The main mechanical mechanism of rock burst is that the bottom coal produces buckling failure under sudden horizontal stress, and then slips to roadway and working face under the vertical stress. An evaluation method for the influence scope of the top coal pillar and the danger scope of rock burst is proposed in order to provide a scientific basis for making programs to resume production. The relevant programs to resume production are developed and implemented based on the research achievements. Through the implementation of pressure relief in the danger area of rock burst and the real-time monitoring of pressure bumping risk, the production is resumed and the safe mining is ensured.

**Key words:** rock burst; mechanical mechanism; concentrated stress; top coal pillar influence; rock burst in bottom coal

## 0 引言

自1933年抚顺胜利煤矿发生中国首次冲击地压事故以来, 随着开采条件的逐步恶化, 冲击地压发生的危害程度和矿井数量不断扩大, 其影响已波及整个华北、华东及东北地区。近几年新汶、兖州、义马、北京、华亭、阜新、鹤岗等多个矿务局所属煤矿发生冲击地压事故, 给矿井的安全生产带来极大的隐患, 同时人员的生命安全受到严重威胁。冲击地压已成为中国煤矿面临的最为严重的动力灾害之一<sup>[1-3]</sup>。

在此期间中国学者对冲击地压发生机理及防治技术进行了大量的研究, 并取得了丰富成果, 如章梦涛<sup>[4]</sup>

提出了冲击地压失稳理论; 李玉生<sup>[5]</sup>提出冲击地压发生的“三准则”理论; 齐庆新<sup>[6]</sup>提出“三因素”理论; 潘一山等<sup>[7]</sup>提出临界阻力区的概念; 姜耀东等<sup>[8]</sup>应用数值模拟研究了采动影响下断层的活化规律; 窦林名等<sup>[9]</sup>提出冲击地压的强度弱化减冲理论; 缪协兴等<sup>[10]</sup>建立了岩(煤)壁附近压裂纹的非时间相关和时间相

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51174016, 51274022); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51204010)

**收稿日期:** 2014-09-19

\*通讯作者

关的滑移扩展方程对冲击地压进行预测预报;高明仕等<sup>[1]</sup>提出冲击地压巷道围岩稳定性控制的强弱强结构理念;潘立友等<sup>[12]</sup>建立了冲击地压的扩容模型;潘俊峰等<sup>[13]</sup>提出冲击地压启动观点。

2013 年 3 月 15 日,某矿特厚煤层上分层开采工作面发生重大冲击地压事故,事故导致 5 名工人死亡,多处设备损坏,造成经济损失超过 4 亿元。

本文根据冲击地压事故的调查分析和现场地质条件,研究事故工作面所处的地层与开采结构,分析了事故区域应力集中的原因、事故发生的灾害体,提出了本次事故中冲击地压发生的力学机理,提出了上下煤层采动影响范围与冲击危险范围的评估方法,为制定针对性的恢复生产方案提供了科学依据。最后根据发生事故的机理制定并实施了恢复生产的方案,通过实施危险区卸压和危险性实时监测预警措施,工作面已安全恢复生产。

## 1 概 况

### 1.1 工作面概况

三水平北 17 层三四区一段一分层综采工作面采深为 482~583 m,走向长 1637 m,倾斜长 168 m。工作面于 2012 年 8 月开采,事故前已经开采 766 m。井下位置为南到设计停采线,西邻二水平北 17 层 3 段工作面采空区,工作面东部及北部均无采掘活动。工作面内无对回采影响较大地质构造,工作面北部为井田边界断层 F1,南部为 L1 断层,上部为 F7 断层,3 条断层水平断距均在 100 m 以上,对工作面采掘影响较大(图 1)。工作面巷道沿煤层顶板布置,西侧为回风道,东侧为机道。

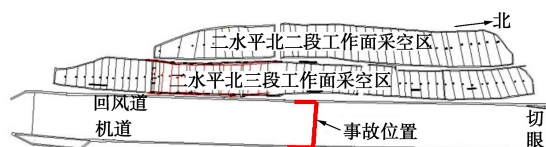


图 1 事故工作面周围开采情况

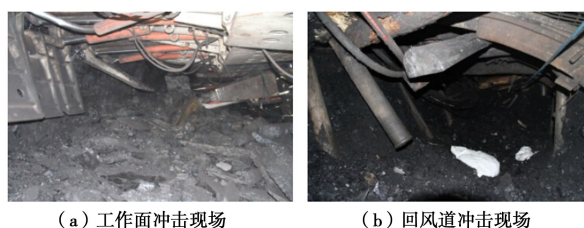
Fig. 1 Mining condition of accident coal face

工作面回采 17 煤层,煤层倾角  $29^{\circ} \sim 32^{\circ}$ , 平均  $30^{\circ}$ 。煤层平均厚度为 11.2 m,工作面回采上分层,设计采高 4.0 m,采用走向长壁综合机械化采煤法。煤层伪顶为 0.2~3.3 m 炭页岩,煤层直接顶为 5.2~14.9 m 厚灰色粉砂岩,老顶为 12~55.2 m 厚中粗砂岩,局部含砾,底板为 4.5~5.5 m 厚凝灰质粉砂岩。根据 2011 年测定结果,该煤层具有弱冲击倾向性,顶板具有强冲击倾向性。

### 1.2 冲击地压事故概况

事故发生于 2013 年 3 月 15 日凌晨 5 时 20 分,导

致回风道由工作面向外 50 m 范围内底煤冲出将巷道合严,绞车被掀至巷道中间;机道由工作面向外 60 m 范围底煤冲出将巷道合严,转载机被弹至顶板;工作面内硬帮煤壁发生位移,支架前梁嵌入煤壁,冲出的底煤将刮板输送机弹至顶板,将采煤机弹起,工作面内仅有微风通过。事故最终造成 5 名工人死亡,采煤机、刮板输送机、多组液压支架损坏。事故现场如图 2 所示。



(a) 工作面冲击现场

(b) 回风道冲击现场

图 2 冲击地压事故现场情况

Fig. 2 Site condition of rock burst accident

## 2 事故区域应力集中原因分析

### 2.1 上层煤柱引起应力集中

本矿可采煤层为 3、9、11、17、21 层煤,其中 9、11 层煤采掘活动对 17 层煤影响较大。为了研究事故工作面周围开采结构,在工作面关键位置作多个剖面,剖面位置见图 3。根据剖面揭示信息分别建立多煤层开采的剖面模型,确定工作面受上下煤层及本煤层开采结构的影响。

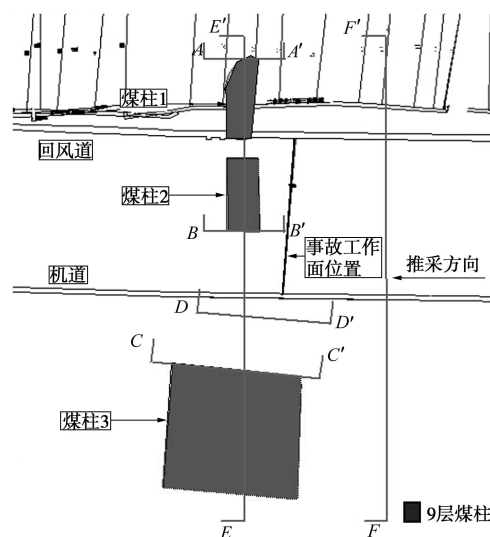


图 3 多层煤开采投影平面图

Fig. 3 Projection of multi-seam mining

由图 4 中 5 幅剖面图可直观显示出三水平北 17 层一段一分层工作面所处的开采结构:工作面上方 9 层、11 层煤均存有采动活动遗留下的采空区及煤柱。9 层煤遗留下对三水平北 17 层一段工作面开采有影响

的煤柱有 3 个, 分别对其编号煤柱 1, 2, 3, 见图 3。煤柱 1 的尺寸为 24 m×75 m, 煤柱 2 的尺寸为 31 m×70 m, 煤柱 3 的尺寸为 120 m×112 m。9 层煤 3 个孤岛煤柱正下方所对应的 11 层煤均为实体煤, 煤柱上方集中的高应力直接传递作用到 17 层煤。9 层煤柱对 17 层煤影响计算见后文。

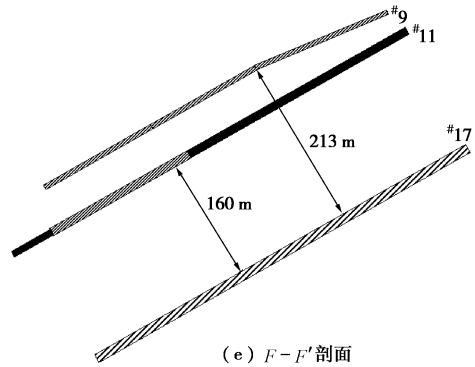
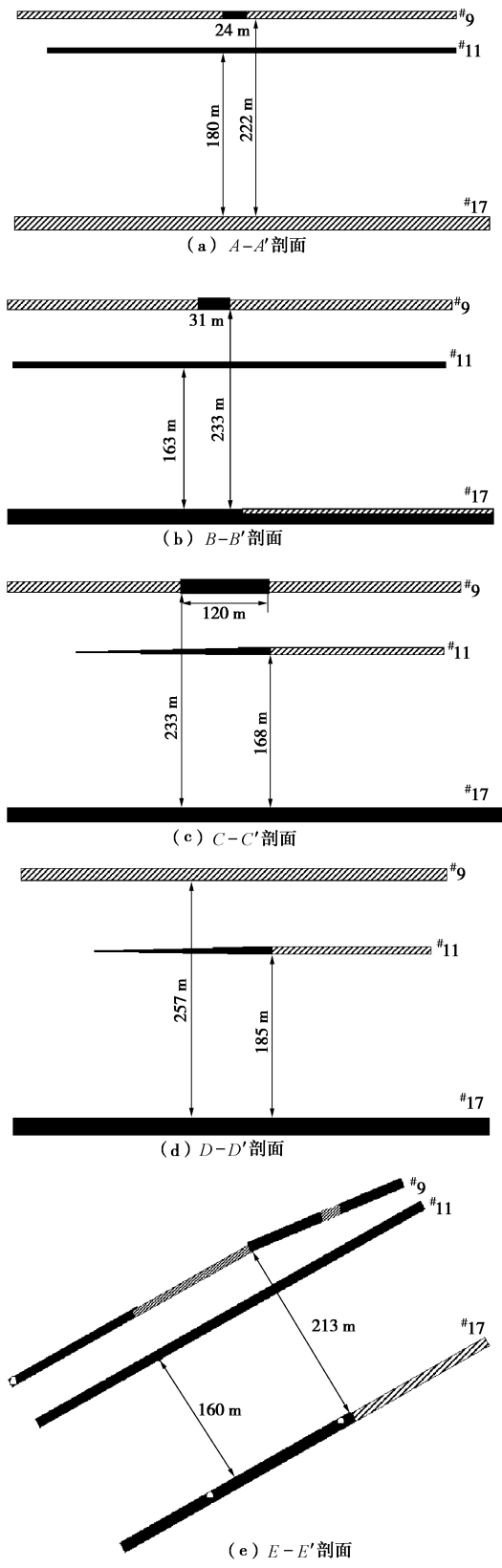


图 4 多煤层开采结构剖面图

Fig. 4 Structural profile of multi-seam mining

2.2 不等宽区段煤柱引起应力集中

本工作面西邻二水平北 17 层三段工作面采空区, 由于上一工作面开采布局不规则, 导致和本工作面之间遗留有不规则煤柱, 宽度变化较大, 宽度最小处为 7.2 m, 事故发生时工作面上端头位置处煤柱宽度为 23.6 m, 见图 5。

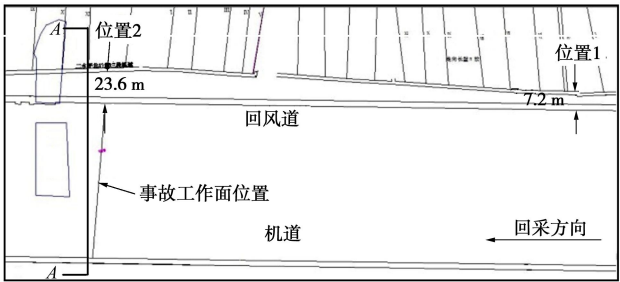


图 5 区段煤柱宽度变化情况

Fig. 5 Variation of width of sectional coal pillar

文献[14, 15]中认为煤层上支承压力 $\sigma$ 由以下两部分组成:

(1)在采空区上方各关键层暴露部分传递到两侧煤体上的压力之和称为支承压力增量 $\Delta\sigma$ ,  $\Delta\sigma = \sum \sigma_i$ ,  $i = 1 \sim n$ ,  $i$ 为第 $i$ 个关键层。

(2)自重产生的支承压力 $\sigma_q$ 。

支承压力由下式计算:

$$\sigma = \Delta\sigma + \sigma_q \quad (1)$$

为得到不同宽度区段煤柱对回风道及工作面的影响, 根据二水平北 17 层三段工作面条件得到采空区侧向支承压力估算曲线, 见图 6。

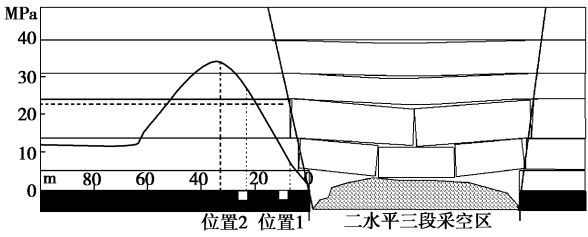


图 6 二水平三段采空区侧支承压力估算曲线

Fig. 6 Curve of estimated pressure at side abutment of nearby goaf

随着区段煤柱宽度的变化,回风道所处侧向支承压力位置不同,图 6 中虚线对应巷道位置 1 为区段煤柱宽度 7.2 m 时回风道所处位置;虚线对应巷道位置 2 为区段煤柱宽度 23.6 m 时回风道所处位置;红色虚线为冲击危险判断线,取 17 煤单轴抗压强度的 1.5 倍应力值,即  $1.5[\sigma_c]$ 。由此可知,随着区段煤柱宽度变大,回风道所处位置逐渐向侧向支承压力峰值位置靠近:当区段煤柱宽度为 7.2 m 时,巷道开挖后引起的应力集中峰值远小于判断线;当区段煤柱宽度为 23.6 m 时,巷道所处位置支承压力已超过判断线,巷道开挖后引起的应力集中值均大于判断线。

2.3 巨厚坚硬顶板引起应力集中

根据工作面柱状图(图 7)可知,17 煤上方 21.8 m 为厚度 16.6 m 的细粒砂岩,上方 38.4 m 为厚度 92.2 m 的粗粒砂岩。巨厚坚硬顶板在回采过程中矿压显现更加剧烈,坚硬顶板在断裂前会悬吊相当长的距离,由此会造成弹性能积聚并导致工作面超前支承压力的应力集中系数变大。

当悬臂达到一定长度就会断裂,由于巨厚顶板断裂块度大,影响范围广,释放大量的弹性能,这种断裂本身就是一种冲击载荷,极易导致大范围冲击地压发生。

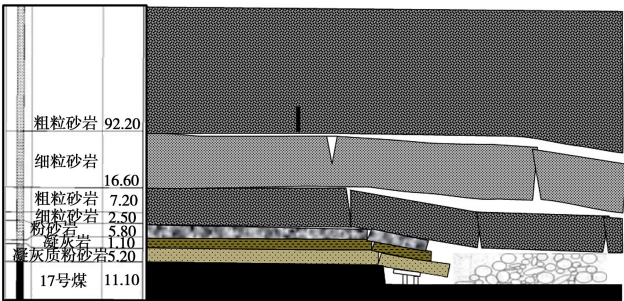


图 7 17 煤坚硬顶板断裂后岩层结构

Fig. 7 Configuration of surrounding rock after fracture of hard roof of coal layer No.17

2.4 大断层引起应力集中

本采区周围存在 3 条断距较大的断层构造将采区包围,见图 8。断层构造的存在割裂关键层(表 1),影响了关键层传递应力的能力,从而使采区内形成“孤岛”区域,区域高应力无法继续向外侧传递。同时,地质构造形成时的残余应力也作用于采区上方,使采区上方应力进一步增加。

2.5 冲击灾害体

17 煤平均厚度 11.2 m,事故工作面开采上分层采高 4 m,底煤厚度 7.2 m。巷道开挖后会对两帮及顶板进行高强度支护(图 9(a)),工作面内顶板有液压支

架的支护(图 9(b)),但是底煤并没有进行有效支护。根据相关研究<sup>[16-17]</sup>,厚煤层中开采上分层时,在采动影响范围内,水平应力增加,底板产生水平应力集中,底煤较厚又未经卸压处理或加强支护的情况下,在外界扰动下极易发生底煤冲击显现。所以底煤为此次冲击地压事故中的“灾害体”。

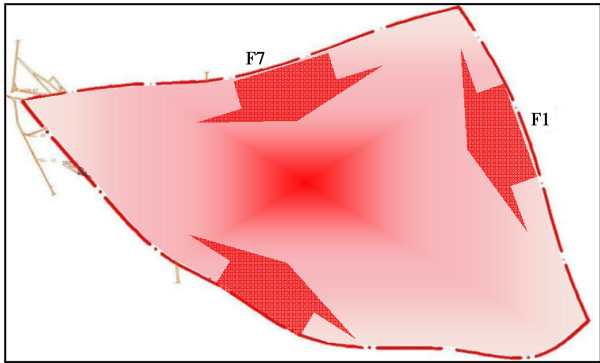


图 8 大断层引起应力集中

Fig. 8 Stress concentration caused by large fault

表 1 对工作面回采影响较大断层参数

Table 1 Parameters of fault with great influence on mining

名称	类型	走向	倾向	倾角 /(°)	水平断距 /m
F1	正断层	NE	NW	15~25	280~350
L1	正断层	NE	NW	25~35	130~160
F7	正断层	弧形	弧形	15~22	160~270

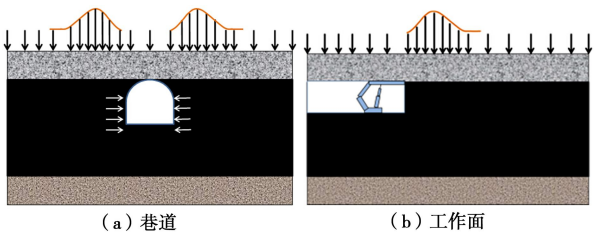


图 9 底煤成为冲击灾害体

Fig. 9 Bottom coal becoming hazard body of rock burst

3 冲击地压事故发生机理

3.1 上层煤柱应力影响区与冲击危险区关系

事故发生时工作面位置并不在 9 煤煤柱正下方,距离煤柱水平距离 30 m,见图 10。这表明在巨厚坚硬顶板存在的条件下,煤柱对下层煤体的影响不只局限于正下方区域,而是一个较大范围。

(1) 上层煤柱应力对下层煤影响模型

冲击地压的控制因素是“应力”,所以上层煤柱对下层煤冲击地压危险的影响是通过煤柱上方集中应力传递至下层煤,并使围岩内产生应力增量实现的。由



于岩层结构为非均质体, 精确计算煤柱应力传递角度是困难的。为方便现场冲击地压防治工作, 根据矿山压力与现场实测经验建立煤柱对下层煤体沿走向影响估算模型, 模型见图 11。



图 10 9 煤煤柱与事故工作面位置关系

Fig. 10 Position relation between pillar of No. 9 layer and accident working face

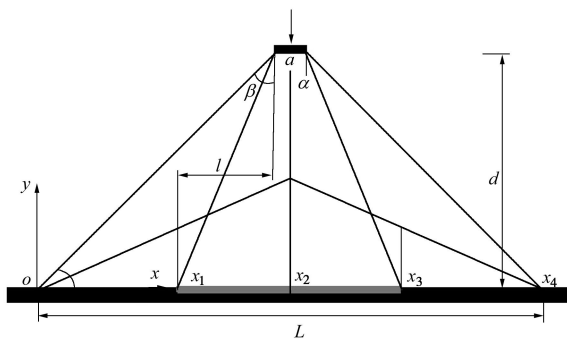


图 11 9 煤煤柱对 17 煤沿走向影响范围和冲击危险范围评估模型

Fig. 11 Evaluation model for influence scope and danger scope of rock burst along strike of coal layer No.17 under influence of coal pillar of coal layer No.9

模型中主要参数为上层煤柱应力集中系数、煤柱应力影响角度  $\beta$ , 冲击危险角度  $\alpha$ 。工作面进入上层煤柱应力影响区域 ( $0 \rightarrow x_1$ ), 由于上层煤柱应力引起应力增量较小, 围岩并不具备发生冲击地压应力条件, 随着工作面推进上层煤柱应力变大, 工作面围岩具备冲击地压发生的应力状态 ( $x_1 \rightarrow x_3$ )。

以影响区域的边界为原点建立坐标系, 煤柱对下层工作面沿倾向影响范围  $L_q$  为

$$L_q = a + \frac{d}{\tan \theta}, \quad (2)$$

式中,  $a$  为煤柱走向宽度,  $d$  为煤柱与影响煤层间距,  $\theta = 90^\circ - \beta$ ,  $\beta$  为煤柱集中应力在底板中的传递角。

煤柱影响区内集中应力  $\sigma_p$  分布的函数为

$$\sigma_p = \begin{cases} \frac{k_1 \sigma_{r2}}{x_2} x & [0, x_2] \\ -\frac{k_1 \sigma_{r2}}{x_4 - x_2} x + \frac{k_1 \sigma_{r2} x_4}{x_4 - x_2} & (x_2, x_4] \end{cases}, \quad (3)$$

式中,  $\sigma_{r2}$  为孤岛煤柱上方承受的自重应力,  $k_1$  为孤岛煤柱上方应力集中系数

将煤柱集中应力  $\sigma_p$  与本层煤上方所承受上覆岩层自重应力  $\sigma_{r1}$  叠加即得到煤层内沿走向的垂直应力:

$$\sigma_q = \begin{cases} \frac{k_1 \sigma_{r2}}{x_2} x + \sigma_{r1} & [0, x_2] \\ -\frac{k_1 \sigma_{r2}}{x_4 - x_2} x + \frac{k_1 \sigma_{r2} x_4}{x_4 - x_2} + \sigma_{r1} & (x_2, x_4] \end{cases}. \quad (4)$$

在岩爆等动力灾害研究领域<sup>[18-20]</sup>多以岩体静态强度的若干倍作为是否发生动力灾害的判断依据, 根据煤的力学性质, 综合考虑动态强度和静态强度, 以垂直应力与煤体单轴抗压强度大于 1.5 作为冲击危险临界判据, 即当煤体承受垂直应力满足以下条件则煤体处于冲击危险状态:

$$\frac{\sigma}{[\sigma_c]} \geq 1.5, \quad (5)$$

式中,  $\sigma$  为煤体承受垂直应力,  $[\sigma_c]$  为煤体单轴抗压强度

根据以上判据, 图 11 中  $x \in (x_1, x_3)$  区域即为煤柱应力影响下的冲击危险区。

## (2) 9 煤煤柱影响区与冲击影响区

根据峻德煤矿三水平北 17 层一段工作面具体参数进行计算,  $\beta = 45^\circ$ ,  $a = 31$  m,  $d = 230$  m, 由此可得 9 煤煤柱对 17 煤影响范围长度  $L = 491$  m (图 12 中虚线之间区域)。

根据式 (4) 中建立的 17 煤垂直应力  $\sigma_q$  的函数可得

$$\sigma_q = \begin{cases} \frac{814}{12275} x + 13.4 & [0, 245.5] \\ -\frac{814}{12275} x + 45.96 & (245.5, 491] \end{cases}. \quad (6)$$

根据测定结果, 17 煤的单轴抗压强度  $[\sigma_c] = 16.2$  MPa, 以  $\sigma / [\sigma_c] > 1.5$  为判据可知,  $x \in (164, 327)$ , 即煤柱影响下的冲击危险范围长度  $L_b = 163$  m。

进而可知  $l = 66$  m, 即工作面距离煤柱水平距离 66 m 时进入冲击危险区 (图 12 中实线之间区域)。

## 3.2 底煤失稳机理

此次冲击地压事故为全国罕见的工作面与顺槽同时发生严重冲击的典型事故。虽然工作面与两顺槽均发生冲击地压, 但发生原因是有所差异的。

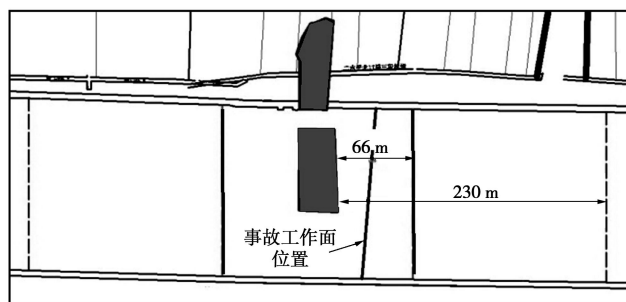


图 12 9 煤煤柱对事故工作面影响区范围和冲击危险区范围划分

Fig. 12 Classification of influence scope and danger scope of rock burst of accident working face under influence of coal pillar of coal layer No.9

### (1) 巷道底煤屈曲冲击

在均匀岩体内, 岩体的自重应力状态下, 水平应力为<sup>[21]</sup>

$$\sigma_x = \lambda \sigma_y, \quad (7)$$

其中,  $\lambda$  为侧压系数,  $\lambda = \mu / (1 + \mu)$ 。

假设泊松比不变, 由于本区域集中应力较高, 水平应力也将升高。

根据文献[16, 17]中研究结论可知, 巷道开挖且稳定后, 围岩中水平应力向顶板、底板中转移, 导致底板承受水平应力变大, 接近临界值 (图 13 (a)), 在工作面回采扰动下, 底板的水平应力达到临界水平应力, 从而导致底板产生屈曲破坏 (图 13 (b)), 屈曲破坏后的煤体与底煤间形成自由空间, 该空间成为底煤运动的自由面, 在两帮煤体内集中垂直应力作用下, 塑性破坏的底煤产生冲击性滑移 (图 13 (c)), 由底板方向冲入巷道而形成灾害。

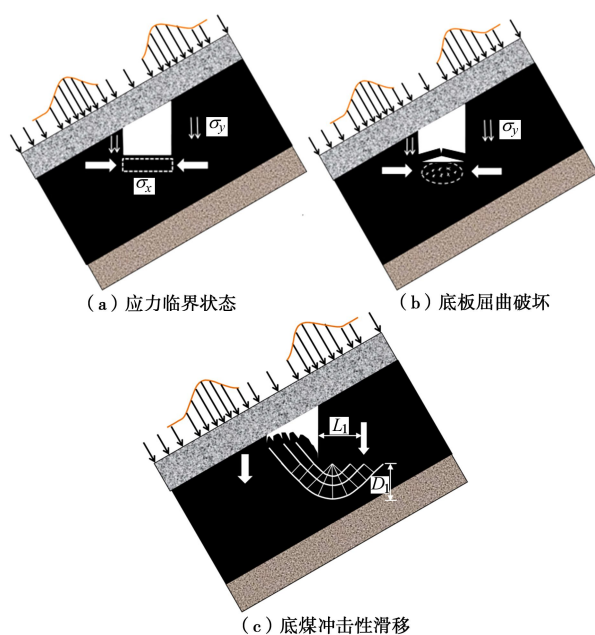


图 13 巷道冲击地压发生机理示意图

Fig. 13 Mechanical mechanism of rock burst in roadway

确定巷道底煤滑移冲击状态的主要参数为底煤塑性区距巷帮沿水平方向最大距离  $L_1$  和底煤最大破坏深度  $D_1$ 。

底煤塑性区距巷帮沿水平方向最大长度可由钻屑量检测进行确定。图 14 为巷道内垂直巷帮水平施工的直径为  $\phi 42$  mm 钻孔的钻屑量统计结果, 由结果可知钻屑量峰值在距巷帮 8 m 位置。钻屑量和应力大小成正相关, 所以煤体内应力峰值位置距巷帮 8 m, 即  $L_1=8$  m。标志着由距巷帮 8 m 位置底煤进入塑性区并能够产生滑移冲击。

根据巷道底煤钻探情况和冲击地压事故现场宏观现象分析可知, 巷道两侧底煤破坏最大深度  $D_1$  约为 3.5 m。

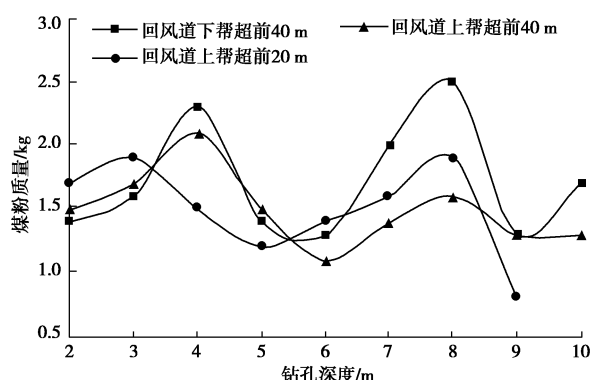


图 14 巷道钻屑量检测曲线

Fig. 14 Curves of drilling bits in roadway

### (2) 工作面底煤滑移冲击

与巷道两帮煤体均受集中应力作用不同, 工作面煤体只在超前区域受到集中应力作用, 煤壁的采空侧因存在运输机道和端面距, 属于空顶范围, 所以工作面底煤相对巷道底煤而言, 具有更大的自由面, 冲击时煤体的量更大, 因此, 危害更严重。

随着工作面推采, 超前支承压力不断前移 (图 15 (a)), 当工作面推采至 9 煤煤柱影响区域时, 超前支承压力与外应力场重合, 垂直应力突变, 根据太沙基理论<sup>[22]</sup>, 当支承压力达到部分煤体破坏的最大载荷时, 支承压力作用区域周围的煤体塑性区连成一片 (图 15 (b)), 致使处于卸压状态的采空区内底板隆起, 产生滑移的煤体将形成一个连续的滑移面, 此时底煤由底板冲入工作面内 (图 15 (c))。

与巷道底煤同理, 确定工作面底煤滑移冲击状态的主要参数为底煤塑性区距巷帮沿水平方向最大距离  $L_2$  和底煤最大破坏深度  $D_2$ 。

底煤塑性区距工作面煤壁沿水平方向最大长度可由钻屑量检测进行确定。图 16 为工作面内垂直煤壁水平施工的直径为  $\phi 42$  mm 钻孔的钻屑量统计结果, 由结果可知钻屑量峰值在距煤壁 10 m 位置, 即  $L_2=10$  m。

标志着由距工作面煤壁 10 m 位置底煤进入塑性区并能够产生滑移冲击。

根据工作面底煤钻探情况和冲击地压事故现场宏观现象分析可知, 工作面前方底煤破坏最大深度  $D_2$  约为 4 m。

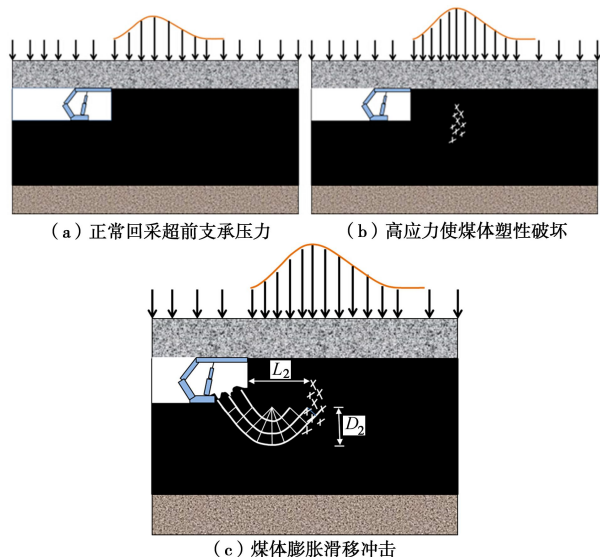


图 15 工作面冲击地压发生机理示意图

Fig. 15 Mechanical mechanism of rock burst in working face

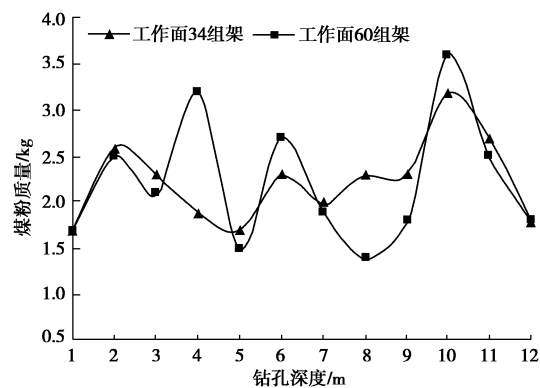


图 16 工作面钻屑量检测曲线

Fig. 16 Curves of drilling bits in working face

3.3 分层开采与放顶煤开采冲击地压发生机理差异

煤岩组合条件相同的煤层, 采用放顶煤开采时相对于分层开采, 上覆岩层运动范围更大, 导致工作面超前支承压力影响范围更大, 应力峰值更大, 同时应力峰值位置比分层开采距煤壁距离更大, 见图 17。由此可知, 在放顶煤开采条件下, 虽然超前支承压力峰值更大, 但是其距离煤壁更远, 同时放顶煤开采巷道均沿底板布置, 底板岩石比底煤强度更高, 不易发生滑移性冲击, 所以放顶煤开采条件下冲击地压事故多发生在巷道顶板和两帮。但是在分层开采条件下, 工作面超前支承压力距离煤壁距离较小, 同时工作面和巷道下方均存在强度低于底板岩石的底煤, 在这种条件下, 高应力区极易引起工作面和巷道的底煤冲击的

事故。

巷道两帮及顶煤可以采取加强支护措施, 但底煤冲击隐患不易消除, 由此可见, 无论存在工作面滑移冲击或巷道底煤屈曲冲击, 特厚及厚煤层开采应尽量不留底煤。因此在同等条件下应尽可能采用放顶煤开采。

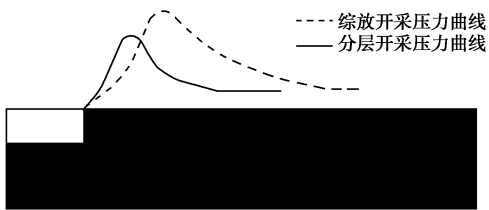


图 17 分层与综放开采超前支承压力曲线示意图

Fig. 17 Curves of advanced support pressure in slice mining and sub-level caving mining

4 恢复生产要点及实施效果检验

4.1 恢复生产要点

- (1) 对于工作面内存在高应力带的区域, 应严格遵循先卸压, 后回采的原则。
- (2) 注意冲击危险源(煤柱、地质构造等)影响范围, 提前确定冲击危险距离。
- (3) 对于底煤致灾体应进行断底, 切断塑性膨胀破碎煤体的滑移线路。
- (4) 对于存在高度冲击危险的工作面, 回采期间必须有震动场、应力场的实时监测手段。

4.2 恢复生产方案效果检验

根据以上要点, 制定了事故工作面恢复生产的方案: 针对区域高应力进行高强度的煤层卸压; 针对底煤弱结构进行断底、卸压。在原有微地震监测手段的基础上, 工作面超前 120 m 范围内进行实时应力在线监测, 监测软件界面见图 18。

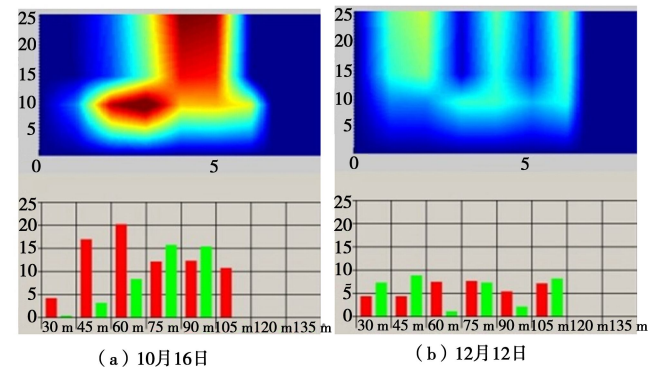


图 18 卸压前后工作面超前 100 m 应力云图

Fig. 18 Stress nephograms before and after pressure relief of working face 100 m ahead

恢复生产准备工作于 2013 年 9 月份开始按照已制定的恢复生产方案施工, 施工初期区域应力大, 见图 18 中 10 月 16 日应力云图(红色代表高应力, 蓝色代表低应力), 卸压钻孔施工过程中动力现象明显, 钻屑颗粒如花生大小。经过长达 3 个月的反复卸压之后, 区域高应力下降, 见图 18 中 12 月 12 日云图, 钻屑颗粒变为粉末状, 钻屑过程中动力现场明显减少。

## 5 结 论

(1) 具有冲击倾向性厚煤层应优先采用放顶煤开采, 并尽量避免沿顶板布置巷道。

(2) 明确本次冲击地压事故发生的“力源”为: 9 层煤煤柱、不等宽区段煤柱、巨厚坚硬顶板、大断层共同作用引起的区域集中应力。巷道和工作面内的底煤是主要的冲击灾害体。

(3) 提出巷道发生冲击的主要力学机理是底煤在水平应力突变作用下发生屈曲破坏, 并在垂直应力作用下发生冲击性滑移; 工作面发生冲击的主要力学机理是底煤在集中应力作用下产生塑性膨胀并发生冲击性滑移。

(4) 提出了上下煤层采动影响区范围与冲击危险区范围的评估方法。通过建立煤柱对下部煤层影响的力学模型, 得到 17 煤工作面推采至距 9 煤煤柱水平距离 230 m 进入煤柱影响区, 距 9 煤煤柱水平距离 66 m 进入冲击危险区。

(5) 针对冲击地压发生机理制定了事故工作面恢复生产方案和正常回采期间防冲方案, 恢复生产期间需对应力集中区域进行高强度卸压和断底措施; 正常生产期间处理底煤和建立实时应力监测体系是保障安全生产的重要手段。

事故工作面按照本文研究结果制定的恢复生产方案于 2013 年 9 月份开始施工, 工作面于 2014 年 1 月 1 日恢复生产, 至 2015 年 1 月 30 日已回采 620 m, 安全推采过 9 煤煤柱引起的冲击危险区, 进入了正常开采阶段。

## 参考文献:

- [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 Yi-shan, LI Zhong-hua, ZHANG Meng-tao. Distribution, type mechanism and prevention of rock-burst in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1844 - 1851. (in Chinese))
- [2] 齐庆新, 窦林名. 冲击地压理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008: 1 - 8. (QI Qing-xin, DOU Lin-ming. Theory and technology of rockburst[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008: 1 - 8. (in Chinese))
- [3] 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: 1 - 17. (DOU Lin-ming, HE Xue-qiu. Theory and technology of rockburst prevention[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001: 1 - 17. (in Chinese))
- [4] 章梦涛. 冲击地压失稳理论与数值模拟计算[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(3): 197 - 204. (ZHANG Meng-tao. Instability theory and mathematical model for coal rock bursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987, 6(3): 197 - 204. (in Chinese))
- [5] 李玉生. 冲击地压机理及其初步应用[J]. 中国矿业学院学报, 1985(3): 37 - 43. (LI Yu-sheng. Preliminary application of rock burst mechanism[J]. Journal of China Mining Institute, 1985(3): 37 - 43. (in Chinese))
- [6] 齐庆新. 层状煤岩体结构破坏的冲击矿压理论与实践研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 1996. (QI Qing-xin. The theory of rockburst led by structure failure of bedded coal rock mass[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 1996. (in Chinese))
- [7] 潘一山, 章梦涛. 冲击地压失稳理论的解析分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(增刊): 504 - 510. (PAN Yi-shan, ZHANG Meng-tao. The exact solution for rockburst in coal mine by unstability rockburst theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(S0): 504 - 510. (in Chinese))
- [8] 姜耀东, 王涛, 赵毅鑫, 等. 采动影响下断层活化规律的数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(1): 1 - 5. (JIANG Yao-dong, WANG Tao, ZHAO Yi-xin, et al. Numerical simulation of fault activation pattern induced by coal extraction[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(1): 1 - 5. (in Chinese))
- [9] 窦林名, 陆菜平, 牟宗龙, 等. 冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J]. 煤炭学报, 2005, 30(5): 690 - 694. (DOU Lin-ming, LU Cai-ping, MU Zong-long, et al. Intensity weakening theory for rockburst and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(5): 690 - 694. (in Chinese))
- [10] 缪协兴, 安千里, 翟明华. 岩(煤)壁中滑移裂纹扩展的冲击矿压模型[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(2): 113 - 117. (MIAO Xie-xing, AN Qian-li, ZHAI Ming-hua. Model of rockburst for extension of slip fracture in pali-sades[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999,



- 28(2): 113 - 117. (in Chinese))
- [11] 高明仕, 窦林名, 张 农, 等. 冲击矿压巷道围岩控制的强弱强力学模型及其应用分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 359 - 363. (GAO Ming-shi, DOU Lin-ming, ZHANG Nong, et al. Burst strength of surrounding rock control of powerful learning model and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 359 - 363. (in Chinese))
- [12] 潘立友, 杨慧珠. 冲击地压前兆信息识别的扩容理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊 1): 4528 - 4530. (PAN Li-you, YANG Hui-zhu. Dilatancy theory for identification of premonitory information of rock burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(S1): 4528 - 4530. (in Chinese))
- [13] 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 Jun-feng, NING Yu, MAO De-bing, et al. Theory of rockburst start-up during coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 586 - 596. (in Chinese))
- [14] 刘金海, 姜福兴, 王乃国, 等. 深井特厚煤层综放工作面区段煤柱合理宽度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 921 - 927. (LIU Jin-hai, JIANG Fu-xing WANG Nai-guo, et al. Research on reasonable width of segment pillar of fully mechanized caving face in extra-thick coal seam of deep shaft[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 921 - 927. (in Chinese))
- [15] 姜福兴, 魏全德, 王存文, 等. 巨厚砾岩与逆冲断层控制型特厚煤层冲击地压机理分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1191 - 1196. (JIANG Fu-xing, WEI Quan-de, WANG Cun-wen, et al. Analysis of rock burst mechanism in extra-thick coal seam controlled by huge thick conglomerate and thrust fault[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1191 - 1196. (in Chinese))
- [16] 徐学锋, 窦林名, 刘 军, 等. 动载扰动诱发底板冲击矿压演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 334 - 338. (XU Xue-feng, DOU Lin-ming, LIU Jun, et al. Analysis on evolution laws of floor burst induced by dynamic disturbance[J]. Journal of Mining & Engineering, 2012, 29(3): 334 - 338. (in Chinese))
- [17] 曲效成. 厚层坚硬顶板采场动力灾害与控制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2013. (QU Xiao-cheng. Research on the mechanism and control over burst disasters in working face with hard and thick roof[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2013. (in Chinese))
- [18] 张镜剑, 傅冰骏. 岩爆及其判据和防治[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2034 - 2042. (ZHANG Jing-jian, FU Bing-jun. Rockburst and its criteria and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2034 - 2042. (in Chinese))
- [19] 徐林生, 王兰生, 李永林. 岩爆形成机制与判据研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 300 - 303. (XU Lin-sheng, WANG Lan-sheng, LI Yong-lin. Study on mechanism and judgement of rockbursts[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(3): 300 - 303. (in Chinese))
- [20] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 基于能量原理的卸围压试验与岩爆判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1530 - 1540. (CHEN Wei-zhong, LÜ Sen-peng, GUO Xiao-hong, et al. Research on unloading confining pressure tests and rockburst criterion based on energy theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1530 - 1540. (in Chinese))
- [21] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 218 - 219. (QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu. Mining pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2013: 218 - 219. (in Chinese))
- [22] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986. (CHEN Xi-zhe. Soil mechanics and geotechnical engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996. (in Chinese))