

DOI: 10.11779/CJGE201508018

# 深部两软煤层沿空巷道冲击地压成因与防治研究

潘立友<sup>1, 2</sup>, 陈理强<sup>3</sup>, 张若祥<sup>4</sup>

(1. 山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学采矿工程研究院, 山东 泰安 271019;  
3. 山东科技大学矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266510; 4. 山东能源龙口矿业集团有限公司, 山东 烟台 265700)

**摘要:** 针对两软煤层的地质条件, 建立了两软煤层冲击地压发生的力学模型。通过对模型的力学分析与现场实践, 得出了深部两软煤层条件下冲击地压发生的主要原因, 是受上部力源层和下部稳定层夹持下的软弱冲击层出现应力集中和能量积聚, 采动活动诱发积聚的能量向破碎缓和区突然释放, 造成煤岩块瞬时喷出, 形成冲击地压。从深部两软煤层冲击地压发生的应力条件、能量条件、物质条件和冲击地压诱发因素等方面进行分析研究, 制定了转移应力、保持护巷煤柱稳定性、巷帮加固、松动帮部、形成顶板支护体阻挡结构的冲击地压防治措施, 并进行了现场实践, 实现了工作面安全高效无冲击开采。

**关键词:** 软煤层; 沿空巷道; 冲击地压; 力学机制; 防治原理

**中图分类号:** TD713      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2015)08-1484-06

**作者简介:** 潘立友(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事冲击地压、矿山压力与岩层控制的科研和教学工作。

E-mail: panliyou7930@sina.com.

## Causes for rockburst and control of gob side entry in deep two soft coal seams

PAN Li-you<sup>1,2</sup>, CHEN Li-qiang<sup>3</sup>, ZHANG Ruo-xiang<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Mining Engineering of Research Institute, Shandong University of Science and Technology, Taian 271019, China; 3. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China; 4. Shandong Energy Longkou Mining Group Co. Ltd., Yantai 265700, China)

**Abstract:** For the geological conditions of two soft coal seams, mechanical models for rockburst occurring in two soft coal seams. Mechanical analysis and field practice of these models show that the main causes for rockburst in deep two soft coal seams are the stress concentration and energy accumulation in the soft alluvium that is clamped in the upper force source layer and the lower stable layer, and the energy accumulated from mining activities which releases to crushing mitigation areas, causing instantaneous ejection of coal and rock blocks and forming the rock burst. Through the researches on stress, energy, material conditions and inducing factors for burst of deep two soft coal seams, the prevention measures for rockburst of block structure of the roof support structure such as transferring stress, maintaining the stability of chain pillars, strengthening coal side, and loosening working slope are formulated. Field practice is made so as to realize the safe and high-efficiency non-impact mining at working faces.

**Key words:** soft coal seam; gob side entry; rockburst; mechanical mechanism; control principle

## 0 引言

随着煤矿开采深度和开采强度的不断增加, 冲击地压<sup>[1-2]</sup>越来越频发和严重, 很大程度上制约着中国矿山生产和运行的安全。直接顶与直接底软, 而煤层具有冲击危险的煤层称为两软冲击煤层, 随着矿井的开采向深部发展, 越来越多的两软冲击煤层<sup>[3]</sup>也发生了冲击地压, 特别是存在坚硬岩层、冲击危险性强的煤层, 更增大了冲击地压的发生频率与强度。因此, 进

行深部两软煤层冲击地压的应力场分布和成因的研究是很有必要的, 基于该理论研究基础上的冲击地压防治原理的突破研究也越来越迫切。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51074101); 山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2014TDJH103); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB201206); 山东煤炭安全高效开采技术与装备协同创新中心资助项目  
收稿日期: 2014-03-31

唐口煤矿二采区采深达千米, 直接顶底板强度较低, 煤层具有冲击倾向性, 为典型的深部两软煤层开采矿区, 深井重力应力场大, 在重力应力场约束下保存的构造应力场及采动造成的集中应力已使煤(岩)体产生“强烈”的破坏, 易于发生冲击地压。

两软煤层冲击地压主要发生在沿空侧的巷道, 为解决两软冲击煤层的安全开采问题, 本文在唐口煤矿具体工作面进行了冲击地压的防治试验研究, 重点分析了沿空区域的冲击地压成因与防治技术<sup>[4-5]</sup>, 特别是对沿空侧巷道冲击地压的防治进行了系统的研究, 获得一些研究成果。

## 1 两软煤层应力场分布特征

### 1.1 冲击地压煤层围岩结构分析

图1为硬、软煤层岩工作面应力分布示意图。

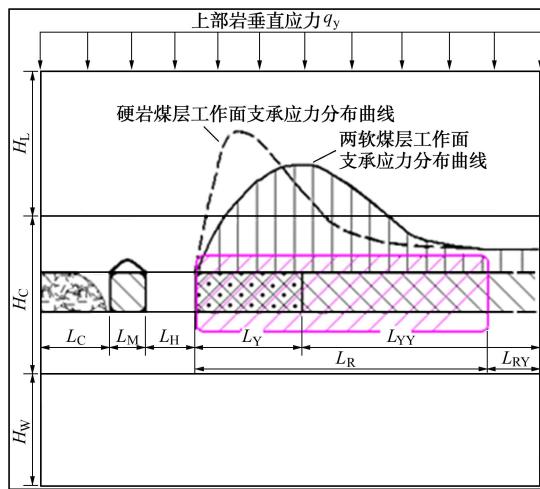


图1 两软煤层应力分布

Fig. 1 Stress distribution of two soft seams

深部大采空两软煤层工作面冲击地压结构从垂直方向共分为3部分: 上部为冲击地压力源层( $H_L$ ), 属于坚硬顶板岩层(主要为基本顶及以上部分坚硬岩层), 能够积聚大的应力和能量, 是冲击地压发生的力源(应力条件); 底部为冲击地压稳定层( $H_W$ ), 也属于坚硬岩层(主要为基本底及以下部分坚硬岩层); 两者之间的两软岩层及煤层属于冲击层( $H_C$ ), 它是由煤层和强度较低的直接顶和直接底(一般为泥岩)组成复合结构, 是冲击地压发生的直接煤岩层。该结构上部边界为力学作用界, 下部边界为稳定岩层界。

冲击地压的煤层围岩属性结构水平分为5个部分, 依次为大采空区长度( $L_C$ )、小煤柱宽度( $L_M$ )、巷道宽度( $L_H$ )、冲击范围( $L_Y, L_R$ )和冲击范围外区域( $L_{YY}, L_{RY}$ )。 $L_Y$ 为一般意义上的冲击范围, 范围较小;  $L_R$ 为软岩条件下的冲击范围, 从煤壁向内包括: 主要以相互接触的煤岩块形成的塑性区、裂隙发

育丰富出现破碎的弹塑性区域和内部裂隙发育的弹性区域, 两软煤层该区域范围大, 甚至可达整个侧向应力影响范围。

### 1.2 应力分布特征

大埋深造成功率源层上部承受大的垂直应力( $q_y$ ), 而采空造成煤壁侧承受大的侧向支承应力。在高应力作用下, 上部力源层出现大的应力集中和能量积聚。

软岩具有可塑性、膨胀性、崩解性、流变性和易扰动性等特点, 在两软煤层条件下, 工作面煤岩体上的支承压力峰值距煤壁的距离( $L_F$ )是与煤岩体的强度(主要以单向抗压强度为指标, 表示为 $\sigma_y$ )成正比的。煤岩体的强度越小, 峰值距煤壁的距离( $L_F$ )则越大, 煤帮塑性区的范围也越大。当工作面一侧存在大采空时, 该侧支承应力峰值深入煤壁距离、峰值数值、塑性破坏范围均比单纯软岩条件下的更大。

两软煤层应力分布具有以下特征:

#### (1) 范围增大<sup>[6-7]</sup>

松软的直接顶板容易发生破坏, 导致应力向深部转移, 以平衡上部岩层的运动作用力, 塑性区的增加, 引起应力范围的扩张。

#### (2) 峰值相对降低<sup>[8]</sup>

应力场范围加大, 主要原因是软顶的破坏造成的, 与硬岩相比, 软岩的极限破坏力相对下降, 应力峰值降低。

## 2 冲击地压力学机制分析

### 2.1 力学模型

根据对深部大采空两软煤层工作面冲击地压结构分析, 建立了相应的力学模型, 如图2所示。

模型将顶板视为一个均布力的力源, 近煤壁煤层与直接底板组合成冲击结构体, 在煤柱下方是密实压缩区, 巷道底板是敞开区(可视为充填煤岩体)。应力高峰区以外是震源区。

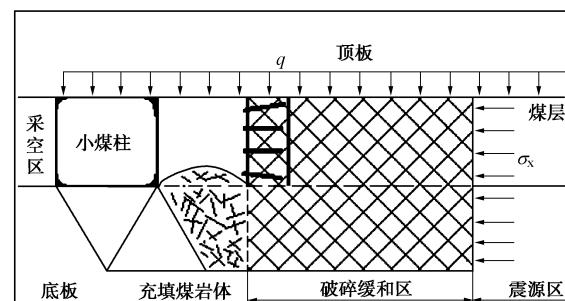


图2 力学模型

Fig. 2 Mechanical model

### 2.2 力学机制分析

将近煤壁煤层与直接底板组合成的冲击结构体视为

一个完整的刚体结构, 建立该刚体的受力模型。将煤帮支护体的作用视为一个水平阻力 ( $\tau_{D2}$ ), 将顶板和底板的力简化为水平方向的切应力 ( $\tau_{D1}$ ,  $\tau_{D4}$ ), 将小煤柱及其底部岩层简化为沿塑性滑动滑移角方向的一个阻抗切应力 ( $\tau_{D3}$ ), 将内部煤体简化为一个水平应力 ( $\sigma_x$ ), 分析刚体结构水平方向的受力情况, 见图 3。

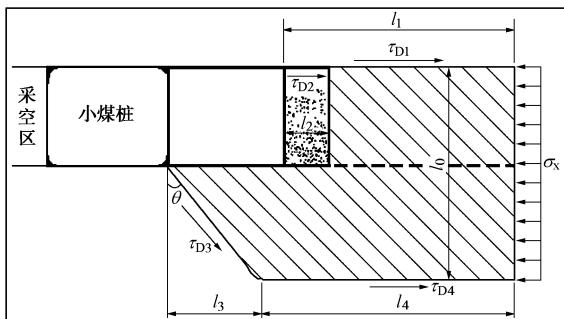


图 3 刚体受力模型

Fig. 3 Rigid stress model

假设刚体处于平衡状态, 则刚体平衡方程为

$$\sigma_x S_0 = S_1 \tau_{D1} + S_2 \tau_{D2} + S_3 \tau_{D3} \sin \theta + \tau_{D4} S_4 \quad (1)$$

式中  $\sigma_x$  为震源层施加在冲击煤岩体上的水平应力 (MPa);  $\tau_{D1}$  为顶板施加在冲击煤岩体上的阻抗切应力 (MPa);  $\tau_{D2}$  为帮部支护作用在冲击煤岩体上的阻抗切应力 (MPa);  $\tau_{D3}$  为煤柱塑性滑移阻抗切应力, MPa。 $\theta$  为塑性滑动滑移角 ( $^\circ$ );  $\tau_{D4}$  为底部底板施加在冲击煤岩体上的阻抗切应力 (MPa);  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  为  $\sigma_x$ ,  $\tau_{D1}$ ,  $\tau_{D2}$ ,  $\tau_{D4}$  各个应力在单位走向长度上的作用面积 ( $m^2$ );  $S_3$  为  $\tau_{D3}$  应力水平方向在单位走向长度上的作用面积 ( $m^2$ );  $l_0$ ,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_4$  为  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  各个作用面积对应的长度 (m), 因为单向走向长度, 因此各个作用面积数值上和对应的长度是一致的。

剪应力的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \tau_{D1} &= C_{D1} + \sigma_{D1} \cdot \tan \varphi_{D1}, \\ \tau_{D2} &= F_m \cdot K_m + \sigma_{D2} \cdot \tan \varphi_{D2}, \\ \tau_{D3} &= C_{D3} + \sigma_{D3} \cdot \tan \varphi_{D3}, \\ \tau_{D4} &= C_{D4} + \sigma_{D4} \cdot \tan \varphi_{D4}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中  $C_{Di}$  为作用面的黏聚力 (MPa);  $\sigma_{Di}$  为作用面的正应力 (MPa);  $\varphi_{Di}$  为作用面的内摩擦角 ( $^\circ$ );  $F_m$  为支护体系作用在媒体上的力;  $K_m$  为作用力的传递系数。

$$\sigma_x S_0 = S_1 (C_{D1} + \sigma_{D1} \cdot \tan \varphi_{D1}) + S_2 (F_m \cdot K_m + \sigma_{D2} \cdot \tan \varphi_{D2}) + S_3 (C_{D3} + \sigma_{D3} \cdot \tan \varphi_{D3}) + S_4 (C_{D4} + \sigma_{D4} \cdot \tan \varphi_{D4}) \quad (3)$$

在巷道采空区侧的小煤柱承受大的压应力, 一般条件下, 煤柱发生破坏, 但在支护体作用下保持稳定, 其下方的底板属于密实体结构。但巷道底部的岩层将提前发生塑性滑移变形破坏, 强度大大降低, 因此煤

柱塑性滑移阻抗切应力 ( $\tau_{D3}$ ) 也将大幅减少。

帮部煤体软弱, 随着帮部煤体的变形破坏, 帮部支护体支护效果逐渐减弱, 帮部支护作用在冲击煤岩体上的阻抗应力 ( $\tau_{D2}$ ) 逐渐降低, 甚至当帮部支护失效时, 该应力趋于零。

底板下部岩层, 由于上部底板较软, 该阻抗应力本身较小, 且随着时间的推移,  $\tau_{D3}$  的减小, 且底部岩层破坏, 底部底板施加在冲击煤岩体上的阻抗切应力 ( $\tau_{D4}$ ) 也将逐渐减少。

而顶板施加在冲击煤岩体上的阻抗切应力 ( $\tau_{D1}$ ) 主要受到巷道顶板支护结构的阻抗及顶板与煤层抗剪效应的影响, 可以通过一系列措施得到较大的加强; 因此, 提高顶板与煤层接触面的稳定性是控制深部大采空两软煤层冲击的关键因素。

当震源层施加在冲击煤岩体上的水平应力大于其阻抗应力时, 巷道将发生一系列变形破坏, 特别是受大采空悬臂作用时, 上部应力加大, 当冲击结构受震动等动压影响, 导致应力突然增加, 积聚的能量突然从力源层释放到破碎缓和区时, 破坏缓和区无法释放如此大的能量, 将造成该区域破碎煤岩体挤出甚至喷出到巷道空间, 形成冲击地压。

### 3 冲击地压防治技术研究

在软岩冲击地压力学机制分析的基础上, 得到两软煤层工作面冲击地压的防治基本原理与原则: 从其发生的应力条件、能量条件、物质条件和冲击地压诱发因素等方面进行分析, 采取有效的手段降低和消除各个条件和因素。

图 4 是防治原理模型示意图。

冲击地压防治模型中包括: 顶板区域中受支护作用的内层支护结构区和未进行支护的外层区; 煤层中实施卸压的煤体区和小煤柱区; 直接底板中冲击区和密实区。

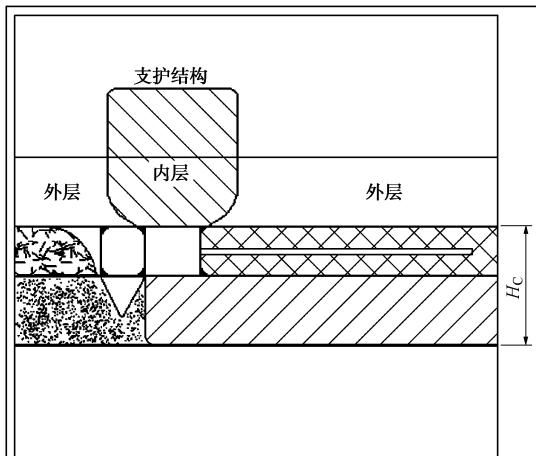


图 4 冲击地压防治原理示意图

Fig. 4 Schematic of rockburst prevention and control

### (1) 转移应力

采取卸压技术<sup>[9-10]</sup>, 达到应力和能量的分散和转移, 降低和转移冲击地压发生的力源因素。

合理布置巷道位置, 将巷道布置在内应力场和原始应力场中, 避开高应力区域; 煤柱留设要规则, 防治造成人为高应力区域的出现。

### (2) 保持护巷煤柱稳定性

加强煤柱侧巷道围岩的支护(让压技术、底角高强锚杆技术), 可使煤柱保持长期抗压功能和不失稳效应。

### (3) 巷帮加固

采用让压技术、高强锚杆(索)技术和斜拉锚索支护技术提高围岩的整体性和稳定性, 使裂隙发育、扩容和应力高峰向内部转移, 保持直接顶板与煤层的紧密接触, 增加抗滑推力。如图5所示。

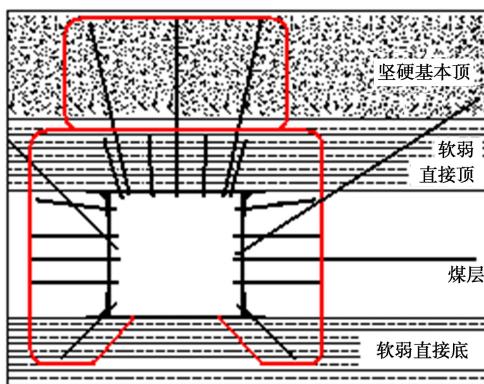


图5 巷帮加固技术示意图

Fig. 5 Reinforcement technology for entry

### (4) 形成顶板支护体阻挡结构

一是可以保持长期阻碍直接顶的作用; 二是增加一个侧向推力, 保持体系完整性, 保持内在力不减, 增加压应力作用的摩擦力。

## 4 试验研究

唐口矿2309工作面属于深部两软煤层沿空工作面, 存在埋深大、沿空、冲击地压危险性高等问题。通过在本工作面运用两软煤层冲击地压力学机制和防治技术的试验和应用, 消除了冲击地压危险, 实现了工作面安全高效开采。

### 4.1 工作面基本情况

唐口煤矿2309工作面埋深为730~960 m; 东侧为2308、2307工作面采空区; 南侧为1305工作面采空区。工作面位于3#煤层, 厚度为2.3~4.0 m, 均厚为3.6 m; 煤层结构简单; 煤层倾角为5°~18°, 均值为9°。

### 4.2 冲击显现特征

#### (1) 工作面埋深大

工作面埋深为730~960 m, 属于深部工作面。

#### (2) 煤层及顶底板冲击倾向性

2309工作面煤层 $W_{ET}=4.38$ , 属于弱冲击倾向性; 煤层直接顶底板为强度较低的泥岩, 无冲击倾向性; 煤层基本顶底板为强度较高的细砂岩和粉砂岩, 具有弱冲击倾向性。

#### (3) 工作面属于两软煤层

由工作面冲击倾向性分析可知, 工作面属于直接顶底板为软弱岩层, 基本顶底板为坚硬岩层, 煤层较为坚硬的两软煤层。

#### (4) 相邻工作面冲击显现

相邻的2308工作面回采期间, 动压显现频繁, 推采到210 m左右, 出现锚杆崩断现象, 煤粉量监测达到3.52~3.71 kg, 个别超过临界值; 工作面推采到410 m左右, 顶板煤炮较为频繁, 煤粉量达到3.65 kg, 十分接近临界值; 其他区域也出现过不同程度的煤炮和锚杆弯曲失效、托盘压平等动压显现。

### 4.3 防治技术实施分析

以两软煤层冲击地压理论分析为基础, 结合2309工作面具体地质和开采情况, 采用了“煤体卸压和围岩加固相结合”的冲击地压防治技术。

#### (1) 煤体爆破和钻孔卸压<sup>[11-12]</sup>

采用深孔爆破和大直径钻孔相结合的卸压技术, 进行工作面侧煤体的卸压, 降低近距离煤层内部的强度, 实现应力和能量的降低和向煤体内部转移, 以消除冲击地压分散的力源。

#### (2) 煤体及顶板加固技术<sup>[13-14]</sup>

在工作面侧煤体实施斜拉高强让压锚索支护技术(帮部锚索选用Φ21.6×6200 mm和Φ21.6×8300 mm锚索, 锚索与水平方向夹角30°~45°), 将锚索打到上部基本顶中, 以提高工作面煤体和顶板的整体性和强度; 采用帮部锚索, 提高近距离煤体的完整性。采用底角锚杆支护技术, 将帮部底角打到底板中, 提高煤体和顶板的整体性和强度。以上措施可以提高工作面侧围岩的完整性和强度, 以抵抗煤体内部震源核体, 防止冲击地压的发生。

#### (3) 煤柱加固技术

在煤柱采用高强锚杆支护和斜拉锚索支护技术(锚索与水平方向夹角45°~60°), 提高煤柱强度和煤柱与顶板的完整性, 实现煤柱的稳定。

### 4.4 防治效果

(1) 通过采用钻孔爆破卸压和大直径钻孔卸压后, 工作面钻屑法<sup>[15-16]</sup>监测数据大大降低(表1, 2), 且监测得到数据远小于临界值, 说明工作面冲击危险得以消除。

(2) 通过巷道围岩加固支护以后, 工作面巷道未

出现大的变形破坏情况, 锚杆变形破坏情况大大减少, 且破碎程度得以控制, 只出现了个别锚杆的变形。

(3) 通过对工作面巷道的卸压和加固, 工作面未出现二级以上的矿震, 工作面冲击地压得以消除。工作面得以安全高效开采。

表 1 卸压前钻屑法监测记录表

Table 1 Records of drilling cuttings method before pressure relief

编号	煤粉量/kg					
	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7m
1	1.7	1.9	2.0	2.2	2.2	2.5
2	1.6	1.9	2.2	2.4	2.6	2.9
3	1.5	1.7	2.0	2.1	2.3	2.6

表 2 卸压后钻屑法检测记录表

Table 2 Records of drilling cuttings method after pressure relief

编号	煤粉量/kg					
	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m
1	1.7	1.8	1.7	1.8	2.0	2.1
2	1.5	1.9	2.0	2.0	2.1	2.3
3	1.6	1.8	1.9	2.1	2.0	2.1

## 5 结 论

(1) 采用理论和力学分析, 获得了深部两软煤层工作面的冲击地压成因。工作面冲击层受上部力源层和下部稳定层夹持, 大埋深和采空形成的高应力使冲击层逐渐变形破坏, 当震源区施加给破碎缓和区的应力和能量超过其承受极限时, 破碎缓和区煤岩体抛出到巷道空间, 是冲击地压发生的主要原因。

(2) 通过理论分析和现场研究获得了深部两软煤层工作面冲击地压防治方法。以工作面冲击地压成因研究为基础, 从应力条件、能量条件、物质条件和冲击地压诱发因素等方面分析, 获得了“转移应力、保持护巷煤柱稳定性、巷帮加固、形成顶板支护体阻挡结构”的冲击地压防治方法。

(3) 以深部两软煤层工作面冲击地压发生和防治机理分析为基础, 结合具体现场条件, 形成了“煤体卸压和围岩加固相结合”的冲击地压防治技术, 实现了应用工作面的安全高效开采, 取得了良好的冲击地压防治效果。

## 参考文献:

- [1] 潘立友, 张立俊, 刘先贵. 冲击地压预测与防治实用技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006: 1 - 12. (PAN Li-you, ZHANG Li-jun, LIU Xian-gui. Burst prediction and prevention of practical techniques[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2006: 1 - 12. (in Chinese))
- [2] 潘立友, 张若祥, 孔繁鹏. 基于缺陷法孤岛工作面冲击地压防治技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6): 14 - 17. (PAN Li-you, ZHANG Ruo-xiang, KONG Fan-peng. Study on mine pressure bumping prevention and control technology of coal mining face in Seam Island based on defect method[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6): 14 - 17. (in Chinese))
- [3] 蒋金泉, 韩继胜, 石永奎. 巷道围岩结构稳定性与控制设计 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999: 15 - 24. (JIANG Jin-quan, HAN Ji-sheng, SHI Yong-kui. Structural stability of roadway's surrounding rocks and its controlling design[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1999: 15 - 24. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 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(6): 1156 - 1161. (DOU Lin-ming, LU Cai-ping, MOU Zong-long, et al. Intensity weakening theory for rock burst and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 1156 - 1161. (in Chinese))
- [6] 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: 32 - 38. (QI Qing-xin, DOU Lin-ming. Theory and technology of rock burst[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008: 32 - 38. (in Chinese))
- [7] 潘俊锋. 半孤岛面全煤巷道底板冲击启动原理分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊 2): 333 - 335. (PAN Junfeng. Start-up principium of rock burst in whole coal roadway floor in half-island face[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 333 - 335. (in Chinese))
- [8] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803 - 2813. (HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803 - 2813. (in Chinese))
- [9] 潘一山, 耿琳, 李忠华. 煤层冲击倾向性与危险性评价指标研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 1975 - 1977. (PAN

- Yi-shan, GENG Lin, LI Zhong-hua. Research and risk assessment index of burst tendency of coal seam [J]. Journal of China Coal Society, 2010, **35**(12): 1975 – 1977. (in Chinese))
- [10] 齐庆新, 李宏艳, 潘俊峰, 等. 冲击矿压防治的应力控制理论与实践[J]. 煤矿开采, 2011, **16**(3): 114 – 118. (QI Qing-xin, LI Hong-yan, PAN Jun-feng, et al. Stress control theory and practice of rock-burst prevention[J]. Coal Mining Technology, 2011, **16**(3): 114 – 118. (in Chinese))
- [11] 齐庆新, 雷摇毅, 李宏艳, 等. 深孔断顶爆破防治冲击地压的理论与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊1): 3522 – 3527. (QI Qing-xin, LEI Yi, LI Hong-yan, et al. Theory and application of prevention of rock burst by break tip blast in deep hole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S1): 3522 – 3527. (in Chinese))
- [12] 章梦涛, 徐曾和, 潘一山, 等. 冲击地压和突出的统一失稳理论[J]. 煤炭学报, 1991, **16**(4): 48 – 52. (ZHANG Meng-tao, XU Zeng-he, PAN Yi-shan, et al. A united instability theory on coal (rock) burst and outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1991, **16**(4): 48 – 52. (in Chinese))
- [13] 赵善坤, 李宏艳, 刘军, 等. 深部冲击危险矿井多参数预测预报及解危技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, **36**(增刊2): 339 – 344. (ZHAO Shan-kun, LI Hong-yan, LIU Jun, et al. The research of deep rock burst dangerous mine prediction with multi-parameter and danger rescission technology[J]. Journal of China Coal Society, 2011, **36**(S2): 339 – 344. (in Chinese))
- [14] SINGH S P. Burst energy release index [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1988, **21**(2): 149 – 155.
- [15] SEARS M M, HEASLEY K A. An application of energy release rate[C]// Proceedings-28th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, ICGCM, 2009: 10 – 16.
- [16] SINGH S P. Classification of mine workings according to their rock burst proneness[J]. Mining Science & Technology, 1989, **8**(3): 253 – 262.

## 本期广告索引

- 封 2 北京理正软件股份有限公司  
封 3 济南普业机电技术有限公司  
封 4 上海分元土木工程科技有限公司  
后插 1 庆祝南京水利科学研究院成立 80 周年  
后插 2 台州建元勘察仪器有限公司