

矿山压力与灾害控制

## 二次采动下临空留巷冲击地压机理

鲁喜辉<sup>1</sup>, 武少国<sup>1</sup>, 丁国利<sup>1</sup>, 缪小冬<sup>2</sup>, 王书文<sup>3,4</sup>

(1. 中天合创能源有限责任公司 葫芦素煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017300; 2. 中天合创能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017300;  
3. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 4. 天地科技股份有限公司 开设计划事业部, 北京 100013)

**[摘 要]** 针对二次采动影响下临空留巷冲击地压难题, 从冲击启动的载荷源入手分析冲击地压发生机理, 结果表明: 二次采动影响之前, 临空宽煤柱应力高度集中, 二次采动作用下, 工作面超前 58m 范围应力再次升高, 应力集中系数 2.20~5.39。煤柱内开掘硐室或联巷导致周围应力再次升高至 1.5~4.2 倍, 并诱发低位高能级微震事件频发。在采空区侧向支承压力、二次扰动引起的超前支承压力和煤柱硐室周边集中应力的共同作用下, 煤柱局部区段静载荷积聚至临界水平, 回采扰动下动载荷叠加后, 达到煤柱冲击启动的载荷条件。

**[关键词]** 二次采动; 临空巷道; 冲击地压; 留巷; 支承压力

**[中图分类号]** TD324 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2018) 05-0087-04

### Rock Burst Mechanism of Retaining Roadways along Goaf under Secondary Mining

LU Xi-hui<sup>1</sup>, WU Shao-guo<sup>1</sup>, DING Guo-li<sup>1</sup>, MIU Xiao-dong<sup>2</sup>, WANG Shu-wen<sup>3,4</sup>

(1. Hulusu Coal Mine, Zhongtian Hechuang Energy Co., Ltd., Ordos 017300, China; 2. Zhongtian Hechuang Energy Co., Ltd., Ordos 017300, China; 3. Mining Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;  
4. Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** To rock burst difficulty problem of retaining roadway under secondary mining influence, and then rock burst mechanism was analyzed from loading source of rock burst initiating. The results showed that, before secondary mining influence, high stress concentration appeared at width coal pillar along goaf, under secondary mining influence, stress within 58m scope of ahead working face raised again, and stress concentration index was 2.20~5.39, surrounding stress increased to 1.5~4.2 times as chamber and roadway tunneled within coal pillar scope, lower and high energy level micro seismic appeared frequency. Under combined stresses of lateral abutment pressure, abutment pressured induced by secondary disturbing and stress concentration around coal pillar chamber, static loading of some local area of coal pillar accumulated to critical level, after static loading accumulated under mining distributed, and then coal pillar rock burst initiating loading level arrived.

**Key words:** secondary mining; retaining roadway along goaf; rock burst; roadway retained; abutment pressure

冲击地压指煤矿井巷或工作面周围煤岩体, 由于弹性变形能的瞬时释放而产生突然剧烈破坏的动力现象, 常伴有煤岩体抛出、巨响及气浪等, 具有很强的破坏性, 是煤矿重大灾害之一<sup>[1]</sup>。我国煤矿开采条件复杂多样, 冲击地压发生条件千差万别, 但从发生巷道的空间位置看, 回采工作面冲击地压主要发生在临空巷道内, 并以工作面超前区域为主<sup>[2-5]</sup>。临空巷道可分为临空掘巷和留巷, 其中临空掘巷是指上一工作面已经回采完毕, 在采空区侧向开掘新的巷道。临空留巷是指上工作面一侧或两侧采用了双巷或多巷布置, 外侧巷道留用为下一工作面服务。临空留巷将先后受两次回采扰动影响, 冲击地压发生机理更为复杂。我国双巷或多巷

布置工作面数量总体占比较小, 多分布在淮南、晋城、潞安、彬长、神东、呼吉尔特等矿区, 主要用于解决运输、通风、瓦斯及采掘接续等问题<sup>[6-7]</sup>。2013 年以来, 彬长、潞安及呼吉尔特矿区部分矿井的临空留巷出现了冲击地压灾害<sup>[7-9]</sup>。本文针对葫芦素煤矿 21103 回风巷临空留巷冲击地压, 从冲击启动的载荷源入手分析冲击地压发生机理, 以期二次采动下临空留巷冲击地压防治提供依据。

### 1 工程背景

#### 1.1 工作面概况

葫芦素煤矿 21103 工作面为首采区第二个回采工作面, 西邻 21102 工作面采空区, 区段煤柱

[收稿日期] 2018-05-10

[基金项目] 国家重点研发计划 (2017YFC0804204); 天地科技重点基金 (KJ-2016-TDKC-01)

[作者简介] 鲁喜辉 (1976-), 男, 河北定州人, 高级工程师, 主要从事煤矿开采技术及安全管理工作。

[引用格式] 鲁喜辉, 武少国, 丁国利, 等. 二次采动下临空留巷冲击地压机理 [J]. 煤矿开采, 2018, 23 (5): 87-90, 14.

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2018.05.022

30m, 东临 21104 准备工作面, 南临矿井实体煤边界, 工作面巷道布置如图 1 所示。工作面倾向长度 320m, 走向长度 4150m, 采用一面三巷的布置方式, 其中回风巷为邻近 21102 工作面回采后的留巷。工作面开采 2-1 煤层, 煤层倾角为  $-3^{\circ} \sim +3^{\circ}$ , 煤厚 1.8 ~ 2.97m, 平均 2.54m。鉴定结果表明, 葫芦素煤矿 2-1 煤具有强冲击倾向性。煤层顶板岩性多以粉砂岩、砂质泥岩为主, 底板岩性多为砂质泥岩及粉砂岩。工作面主运巷、辅运巷、回风巷断面宽×高均为 5.4m×2.7m, 沿顶、沿底布置, 采用锚网索支护。

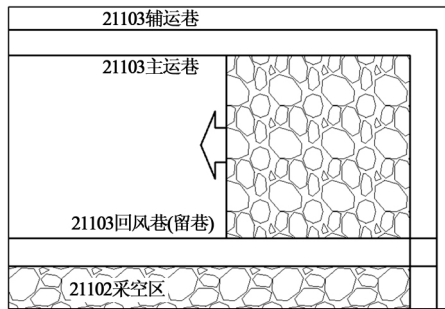


图 1 21103 工作面巷道布置

### 1.2 冲击地压发生情况

工作面回采初期未发生明显的动力显现。截至 2017 年 11 月 18 日 7:40, 工作面累计推进 548m, 生产过程中, 回风巷超前 0~60m 范围发生冲击显现, 瞬间造成煤柱侧帮鼓, 最大 0.7m, 位于超前 0~10m 范围内, 导致机尾无安全出口, 电缆落地, 底鼓 0.3m, 共破坏锚杆 30 根, 锚索 15 根, 损坏单体 10 根。

分析发现, 本次具有明显的方向性, 以煤柱侧冲击为主, 底鼓次之, 实体煤、顶板基本没有破坏, 这表明冲击地压的能量释放主体为 30m 宽度的临空煤柱。

## 2 冲击地压载荷源分析

### 2.1 冲击地压启动机理

根据冲击启动理论<sup>[10]</sup>, 冲击地压发生依次经历冲击启动—冲击能量传递—冲击地压显现等 3 个阶段, 采动围岩近场系统内静载荷的集聚是冲击启动的内因, 采动围岩远场系统外动载荷对静载荷的叠加、扰动是冲击启动的外因。冲击地压启动的载荷源主要分为两类: 采动围岩近场系统内静载荷和远场系统外动载荷。系统内静载荷以采掘空间围岩内的采动应力为主; 系统外动载荷以采空区及周边顶板活动、采掘爆破等产生的动态应力波为主。冲

击启动区为近场围岩应力峰值最大区, 冲击启动的能量判据为:

$$E_{静} + E_{动} - E_c > 0$$

式中,  $E_{静}$  为极限平衡区集中静载荷作用下积聚的能量;  $E_{动}$  为远场弹性能传递至极限平衡区的能量;  $E_c$  为极限平衡区发生动力破坏所需要的最小能量<sup>[15]</sup>。

### 2.2 静载荷源分析

#### 2.2.1 二次扰动前临空煤柱侧向应力分布

21102 工作面回采后, 临空巷道受到采空区顶板压力传递影响, 围岩应力水平整体升高。为掌握临空宽煤柱侧向应力分布情况, 在 21103 工作面回采之前, 采用  $\phi 42\text{mm}$  直径钻屑法对临空宽煤柱进行检测, 钻屑量分布曲线如图 2 所示。煤柱侧 4m 以浅范围钻屑量小于 3kg/m, 煤柱帮 5m 以深煤粉量大幅增加, 峰值区位于 8m 处, 煤粉量达到 55kg/m, 9m 以深范围则逐渐减小。可见, 二次采动影响之前, 临空宽煤柱应力集中程度已经处于高位, 尤其煤柱里侧 6~10m 区间集中程度最高。

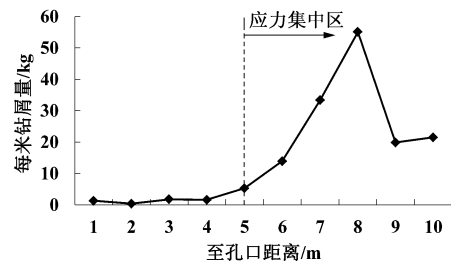


图 2 30m 宽煤柱钻屑法记录曲线

#### 2.2.2 二次采动影响下临空煤柱走向应力分布

采用 KJ21 冲击地压应力在线监测系统对 21103 回风巷帮部进行应力监测, 选取 5 个典型应力曲线进行分析, 结果如表 1 及图 3 所示。统计可知, 21103 工作面超前支承压力的影响范围为 50~73m, 平均 58m; 应力峰值超前工作面距离 5~16m, 平均 7.7m, 应力集中系数 2.20~5.39, 平均 3.61。对比可知, 回风巷冲击破坏范围为超前工作面 0~60m, 与监测获取的超前支承压力的影响范围 (58m) 基本一致。另外, 破坏最为严重的区域为 0~10m 范围, 也是超前应力峰值分布的区间。可见, 冲击显现的地点及严重程度与超前支承压力的分布较为吻合, 总体为支承压力的越大, 冲击破坏越严重。

#### 2.2.3 煤柱硐室附近应力分布规律

图 4 为 2017 年 11 月 26 日, 21103 回风巷两帮应力监测数据。可见, 压力最大值分布在工作面附近, 随着远离工作面, 回风巷帮部压力逐渐下降,

表 1 21103 回风巷采动应力监测结果

应力计编号	超前支承压力影响范围/m	应力峰值超前距离/m	应力集中系数
16	53	5	5.39
14	58	6	3.87
12	73	16	2.20
10	56	5.6	4.05
8	50	6	2.52
平均	58	7.7	3.61

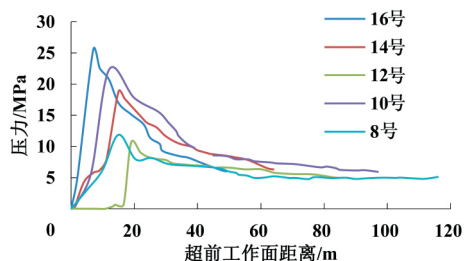


图 3 21103 回风巷采动应力实测曲线

直至稳定在 4~5MPa。同时发现，煤柱内硐室或联巷周围应力是正常煤柱区应力的 1.5~4.2 倍，这表明煤柱硐室对应力的影响极为显著，容易发展成为冲击危险源。

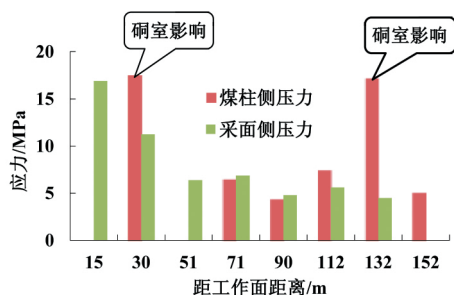


图 4 21103 回风巷帮部应力

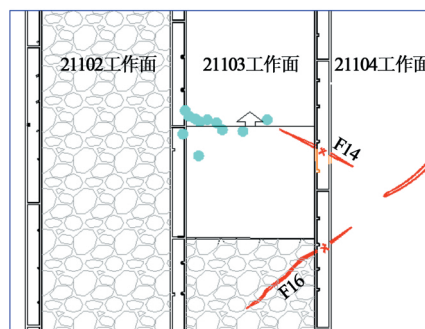
### 2.3 动载荷源分析

采用波兰 ARAMIS M/E 微震监测系统对 21103 工作面微震活动进行监测，分析其平面、剖面分布规律。

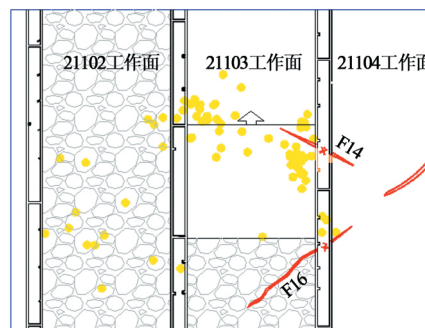
#### 2.3.1 微震事件平面分布规律

图 5 为不同能级微震事件的平面分布情况，可见，不同能级的微震事件分布区域差别较大，主要规律：高能级的  $10^4$ J 以上事件全部集中在开掘了联巷的临空煤柱附近；断层可引起  $10^3$ J 事件频发，但尚不足以诱发  $10^4$ J 事件； $10^2$ J 事件在两巷附近大量分布，但在采空区中部较少； $10^1$ J 事件在工作面范围广泛分布。诱发因素的类型决定了微震事件的能级，该规律可用于预判强矿震及冲击地压危险性，具体表现为：

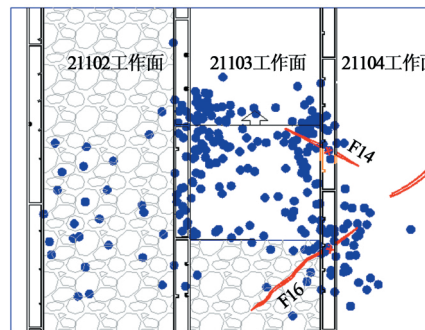
(1) 临空煤柱内开掘了联络巷可导致高能事件频发，诱发冲击地压概率较高，应加强超前卸



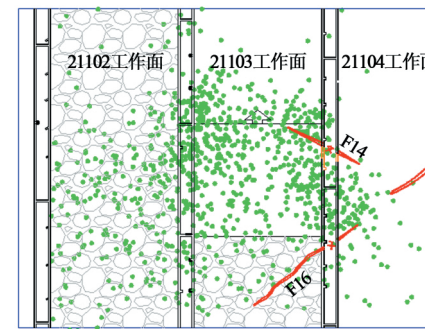
(a) 4次方事件



(b) 3次方事件



(c) 2次方事件



(d) 1次方事件

图 5 不同能级微震事件平面分布

压。

(2) 断层附近煤岩层活动异常，微震能量释放相对活跃，但引起的微震事件最大能量限定在  $10^3$ J 级别，一般条件下尚不足以诱发冲击显现，但应采取防范措施。

(3)  $10^1$ J、 $10^2$ J 微震事件分布范围更广，但采空区中部偏少，这可能是由于采空区内部微震事件向巷道内拾震器传播过程中衰减过快，未被有效记录。

### 2.3.2 微震事件垂向分布规律

图 6 为 21103 工作面微震事件沿倾向垂直剖面的投影。从煤岩层破裂高度上来看,工作面回采后,微震活动分布在煤层上方 160m 范围内,表明覆岩最大破裂高度约 160m。但高能事件发生层位更低,其中  $10^3$ J 级别微震事件发生在煤层上方 80m 范围,  $10^4$ J 级别微震事件发生在煤层上方 30m 范围。低位坚硬顶板活动形成的高能量微震震源距离采掘巷道更近,应力波传递至巷道围岩的极限平衡区时,衰减程度较小,诱发冲击地压风险概率更高。

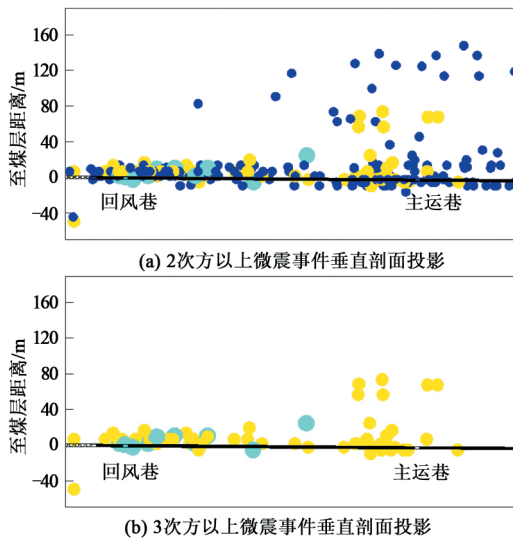


图 6 不同能级微震事件垂直剖面投影

### 2.3.3 微震活动与班次的关系

图 7 为不同能级微震事件在夜班 (0 时-8 时)、早班 (8 时-16 时)、中班 (16 时-24 时) 的分布比例。可得以下规律:

- (1) 从所有微震发生的频次来看,夜班>中班>早班,表明夜班受开采扰动最强烈,中班次之,早班(检修班)最小。
- (2) 62%的 3 次方事件、100%的 4 次方事件发生在夜班,可见,夜班高能量震级冲击地压风险最高。这主要是因为工作面经历 8~16h 的连续生产,顶板暴露面积不断增大,活动强度不断增大,动载荷释放强度也就增大。
- (3) 早班为检修班,回风巷超前段作业人员较多,该时间段内虽未发生过 4 次方事件,但 3 次方事件达到 20 次,仍具有一定的诱冲风险。这主要是因为工作面已经经历了连续 16h 的高强度生产,虽然早班停机,但顶板活动尚未完全停止。

## 3 临空留巷冲击地压发生机理

基于冲击地压动、静载荷源监测分析结果,葫

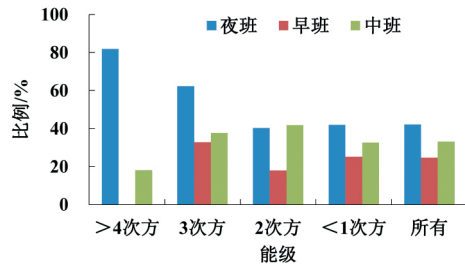


图 7 不同班次里不同能级微震事件频次的比例

芦素煤矿 21103 回风巷冲击地压发生机理可描述为:厚硬顶板、宽煤柱等关键因素影响下,采空区侧向支承压力引起临空宽煤柱静载荷整体高度集中,在本工作面回采引起的超前支承压力以及煤柱硐室、联巷周边集中应力的共同作用下,超前区域煤柱局部区段的静载荷水平急剧升高。回采扰动下动静载荷发生叠加,达到煤柱冲击启动的载荷条件,进而发生冲击地压。

煤层的冲击倾向性决定了煤柱具备发生瞬时动力破坏的基本属性。集中静载荷水平处于高位的临空宽煤柱弹性区为冲击启动位置。冲击能量向周围传播过程中,对留巷帮部冲击作用最为强烈,但由于巷帮支护强度较高,整体性较好,因此只发生了整体变形。而巷道底板早已发生塑性破坏,抗冲击能量差,成为能量释放的主要通道。顶板为相对坚硬的岩石,且支护完好,基本无破坏。

## 4 结 论

- (1) 二次采动影响之前,临空宽煤柱应力已高度集中,其中 6~10m 区间集中水平最高。二次采动作用下,工作面超前 58m 范围应力再次升高,应力集中系数 2.20~5.39。煤柱内开掘硐室或联巷可导致周围应力再次升高至 1.5~4.2 倍。
- (2) 微震监测表明,高能级微震事件全部集中在开掘联巷或硐室的临空煤柱附近,且主要发生在距离煤层 30m 范围内,诱发冲击地压风险概率更大。
- (3) 采空区侧向支承压力引起临空宽煤柱静载荷整体高度集中,在二次回采扰动引起的超前支承压力和煤柱硐室周边集中应力的共同作用下,煤柱局部区段静载荷积聚至临界水平,回采扰动下动静载荷叠加后,达到煤柱冲击启动的载荷条件。

### [参考文献]

[1] 齐庆新, 龚林名. 冲击地压理论与技术 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.

(下转 14 页)

$$- 1.927 \sqrt{\frac{S}{\sqrt{RT}}} \sigma_c^2 \sigma_1 R_0 RT \sqrt{\varphi_i^2} \sin\left(\theta_i - \alpha_i - \frac{\varphi_i}{2}\right) \vec{k}$$

式中， $\vec{k}$  为  $\vec{i} \times \vec{j}$

可以推出，滚刀任一位置，滚筒破岩时，需要提供的推力  $\vec{F}_\Sigma$  和驱动转矩  $\vec{T}_\Sigma$  为：

$$\vec{F}_\Sigma = - \sum_{\theta_i} \vec{F}_{iy} = 1.927 \sqrt{\frac{S}{\sqrt{RT}}} \sigma_c^2 \sigma_1 R_0 RT \sum_{\theta_i} \sqrt{\varphi_i^2} \sin\left(\alpha_i + \frac{\varphi_i}{2}\right) \vec{j} \quad (3)$$

$$\vec{T}_\Sigma = - \sum_{\theta_i} \vec{T}_i = 1.927 \sqrt{\frac{S}{\sqrt{RT}}} \sigma_c^2 \sigma_1 R_0 RT \sum_{\theta_i} \sqrt{\varphi_i^2} \sin\left(\alpha_i + \frac{\varphi_i}{2}\right) \vec{k} \quad (4)$$

式中， $\theta_i \in [\theta_1, \theta_2]$ ， $\theta_1$  和  $\theta_2$  的定义见 2.3 节所述。

#### 4 结 论

(1) 本文建立了装备盘形滚刀滚筒刀盘的数学模型，通过对该数学模型的分析，得出了滚刀盘形滚刀切削的轨迹为长幅摆线的外等距曲线，并推出了该曲线的参数方程。

(2) 通过对外等距曲线的几何分析，结合实际应用，给出了滚刀在任意角度的重要切削参数截割深度和接岩角度的数学解释。

(3) 基于 CSM 模型，推出了滚筒刀盘破岩时的推力和驱动转矩公式，为计算机程序解题提供了数学依据，可为滚筒刀盘的设计及实际施工力学预测提供科学指导。

本文对滚筒刀盘进行了深入的数学分析，仅加入了切削过程中所需要的正滚刀，实际应用中还有边滚刀等其他刀具，在本文中未涉及；另外，本文中所用到的 CSM 力学模型，用到了线性压力分布。文中所推出的力学公式，还有待进一步的试验验证。

#### 【参考文献】

[1] Jamal Rostami, Levent Ozdemir, A new model for performance

prediction of hard rock TBMs. [J]. Rect proceedings, 1993, chapter 50.  
 [2] 张照煌. 盘形滚刀与岩石相互作用理论研究现状及分析 [J]. 工程机械, 2009, 40 (9): 18-22.  
 [3] 傅德明, 张冠军. 我国矩形掘进机隧道施工技术发展与应用 [J]. 上海建设科技, 2008 (2): 4-5.  
 [4] 夏毅敏, 吴元, 郭金成, 等. TBM 边缘滚刀破岩机理的数值研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (1): 172-178.  
 [5] 彭琦. 围压对 TBM 滚刀破岩影响机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (S1): 2743-2749.  
 [6] 李辉, 王树林, 汪加科. TBM 盘形滚刀受力分析 [J]. 现代隧道技术, 2012, 49 (3): 193-197.  
 [7] 姜兴宇, 高超, 高伟贤, 等. 基于库仑-莫尔准则的盘形滚刀破岩力预测研究 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (20): 126-136.  
 [8] 冯欢欢, 陈馈, 周建军, 等. 掘进机滚刀最优破岩刀间距的分析与计算 [J]. 现代隧道技术, 2014, 51 (3): 124-130.  
 [9] 王召迁, 王吉业, 张志敏, 等. 盘形滚刀破岩力影响因素试验研究 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2014, 35 (7): 1015-1018.  
 [10] 郭伟, 宋立玮, 朱殿华, 等. 基于等量原理的 TBM 刀盘掘进参数与刀间距匹配特性分析 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版) 2017, 50 (2): 128-134.  
 [11] 宋克志, 袁大军, 王梦恕, 等. 盘形滚刀与岩石相互作用研究综述 [J]. 铁道工程学报, 2005, 22 (6): 66-69.  
 [12] 刘春生. 滚筒式采煤机理论设计基础 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.  
 [13] Jamal Rostami. Development of a Force Estimation Model for Rock Fragmentation with Disc Cutters Through Theoretical Modeling and Physical Measurement of Crushed Zone Pressure [D]. Ph. D. Thesis, Colorado school of Mines, Golden, Colorado, USA: 249.  
 [14] M. Z. Naghadehi, A. Ramezanzadeh, Models for estimation of TBM Performance in granitic and mica gneiss hard rocks in a hydropower tunnel [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76 (4): 1627.  
 [15] J. Hassarpour, J. Rostami, J. Zhao, A New Hard Rock TBM performance prediction model for project planning [J]. Tunneling and underground space Technology, 2011: 595-603.

【责任编辑：李青】

#### (上接 90 页)

[2] 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.  
 [3] 蓝航, 齐庆新, 潘俊锋, 等. 我国煤矿冲击地压特点及防治技术分析 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39 (1): 11-15, 36.  
 [4] 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.  
 [5] 姜耀东, 赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状: 机制、预警与控制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (11): 2188-2204.  
 [6] 康红普, 颜立新, 郭相平, 等. 回采工作面多巷布置留巷围岩变形特征与支护技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31

(10): 2022-2036.  
 [7] 王书文, 鞠文君, 潘俊锋. 临空留巷底板冲击地压启动区判定与分步防治技术 [J]. 煤炭学报, 2017, 42 (11): 2799-2807.  
 [8] 翁明月, 王书文. 内蒙古呼吉尔特矿区新建矿井冲击地压治理模式探索 [J]. 煤矿开采, 2018, 23 (1): 60-64.  
 [9] 潘俊锋, 王书文, 刘少虹. 双巷布置工作面外围巷道冲击地压启动机理 [J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35 (1): 291-298.  
 [10] 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.

【责任编辑：潘俊锋】