

文章编号:0253-9993(2010)12-1997-05

# 基于地质条件的冲击危险性动态预评价体系

彭永伟<sup>1,2</sup>, 蓝航<sup>1,2</sup>, 王书文<sup>1,2</sup>, 潘俊锋<sup>1,2</sup>, 齐庆新<sup>1,2</sup>

(1. 煤炭科学研究总院 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:**分析了冲击危险性预评价现状,提出了冲击危险性的影响因素,并对煤岩冲击倾向性、煤岩地质条件、开采采动应力等因素与冲击危险性的相关性进行了深入分析,建立了相应影响因素的冲击危险性预评价指标,并以此构建冲击危险性动态预评价体系。该评价体系可实现对工作面全开采过程的冲击危险性动态预评价,为矿井动力灾害防治提供依据。利用研究成果对某矿井冲击危险性进行了预评价,证实了提出的预评价体系的合理性。

**关键词:**地质条件;冲击危险性;动态预评价

**中图分类号:**TD324.1 **文献标志码:**A

## Dynamic pre-evaluation system of bursting hazard based on geological conditions

PENG Yong-wei<sup>1,2</sup>, LAN Hang<sup>1,2</sup>, WANG Shu-wen<sup>1,2</sup>, PAN Jun-feng<sup>1,2</sup>, QI Qing-xin<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** The present status of bursting hazard and its influencing factors were involved. Based on the deep analysis bursting hazard's correlation with bursting liability, geological conditions, and mining-induced stress, the evaluation index and corresponding dynamic pre-evaluation system were established. The bursting hazard with mining process can be evaluated by this method, also may provide an important basis for dynamic disasters prevention. The practice shows that research finding is reasonable.

**Key words:** geological conditions; bursting hazard; dynamic pre-evaluation

冲击地压是矿山井巷和采场周围煤、岩体由于变形能释放而产生的以突然、急剧、猛烈破坏为特征的动力现象<sup>[1]</sup>。在冲击倾向性鉴定、防范、预测预报、解危、效果检验的整个冲击地压防治程序中,冲击倾向性鉴定是前期的基础性工作,而预测预报实际上分两部分:一是工作面生产前区域性冲击危险性的长期预报;二是生产过程中冲击地压发生前的短期预报。两个不同时期的冲击危险性预报有很大的区别,前者主要是建立在煤岩自身物理力学性质、开采条件、地质条件等因素基础上,具有超前性、长期性和区域性的特征,实际上是一种“预评价”;后者更多的是结合开采采动因素,进行短期冲击地压危险性预报,类似

于地震学上的“临震预报”。本文主要对长期性预报进行研究。

众多学者<sup>[2-10]</sup>提出了很多关于煤层冲击危险性预评价方法,取得了很好的效果。目前对于煤岩冲击危险性预评价主要有综合指数法、数量化方法、经验类比法、非线性方法等。

综合指数法<sup>[1]</sup>对地质因素和开采因素进行分析,确定各个因素对冲击地压危险状态影响的指数,将其综合起来,就可以形成冲击地压危险状态等级评定的综合指数法。数量化理论实质上是多元分析的一个分支,它根据研究问题的目的不同,常分为数量化预测方法(I类问题)和数量化判别方法(II类问

题)<sup>[4]</sup>。姜福兴等<sup>[5]</sup>用垂直应力与煤体单轴抗压强度的比值与煤层冲击倾向性指数之一的弹性能量指数两个指标模糊评价煤体的冲击危险性,是一种简单实用的评价方法。原煤炭部 1987 年制订的《冲击地压煤层开采暂行规定》中,提出经验类比法亦是冲击危险性评价方法中的一种。

鉴于冲击地压危险性与其影响因素之间的非线性关系,很多学者利用非线性数学方法对冲击危险性进行了分析。张开智等<sup>[3]</sup>根据属性识别理论,建立了有冲击危险煤岩的冲击危险程度综合评价的变权识变模型。姜谟男<sup>[6]</sup>提出了最小二乘支持向量机模式识别的冲击危险性预测方法。秦子晗等<sup>[7]</sup>提出基于模糊物元模型的冲击危险性评价方法。

国内外学者提出的冲击危险性预评价方法各有特点,在实践中取得了一定的效果。存在的主要问题是:对冲击倾向性因素考虑不全面,有的评价方法只考虑了冲击倾向性的一种因素;二是由于地质体的复杂性,受手段限制,对于地质构造等因素对冲击危险性的影响,往往只是大致给出,不能实现基于地质因素对冲击危险性的定量评价。鉴于此,本文在充分考虑煤岩本身物理力学性质和地质因素上,结合煤层开采条件构建一种新的兼具实用性与可操作性的冲击危险性预评价体系。

## 1 冲击危险性影响因素

冲击地压发生的影响因素很多,一般包括 3 个主要因素,即煤岩自身的冲击倾向性、地质因素、开采技术条件等。

(1)煤岩冲击倾向性。煤岩冲击倾向性是指煤岩体具有的积聚变形能并产生冲击破坏的性质<sup>[1]</sup>,是煤岩体所具有的一种内在力学属性。煤岩体自身的冲击倾向性强弱是煤层冲击危险性影响因素之一。近年的研究表明,煤岩冲击倾向性受多种因素影响<sup>[11-14]</sup>,但在实践中对于冲击倾向性的鉴定仍以行业标准为主<sup>[15-16]</sup>。

(2)地质因素。煤层冲击危险性与开采深度、结构、顶板岩层厚度、断层等地质构造等因素有关。

(3)开采技术条件。煤层冲击危险性也与采掘顺序、采煤方法、巷道布置、煤柱留设等开采因素密切相关。

## 2 冲击危险性动态预评价体系的建立

### 2.1 由煤岩的冲击倾向性判定冲击危险性

对于煤的冲击倾向性的测定,暂依据 2000 年发布的行业标准<sup>[15]</sup>进行实验判定,见表 1。

表 1 煤的冲击倾向性分类

Table 1 Classification of bursting liability of coal

类别	I	II	III
冲击倾向	无	弱	强
动态破坏时间	$t_d > 500$	$50 < t_d \leq 500$	$t_d \leq 50$
指数			
弹性能量指数	$W_{ET} < 2$	$2 \leq W_{ET} < 5$	$W_{ET} \geq 5$
冲击能量指数	$K_E < 1.5$	$1.5 \leq K_E < 5.0$	$K_E \geq 5.0$

目前煤层冲击倾向性判定指标有 3 个,若指标出现矛盾,需要综合判定其冲击倾向,给出一种简单的综合判定方法。令评判函数为

$$f_1 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 \quad (1)$$

式中, $a_i (i=1, 2, 3)$ 为每个指数的权重,分别为 0.4、0.3、0.3; $x_i (i=1, 2, 3)$ 为单因素评判结果,设每个指数对应冲击倾向 I、II、III 三个类别的分别取值为 0.333、0.667、1.000。

采用二次抛物型隶属函数,煤层冲击倾向性对煤层冲击危险性的隶属函数为

$$\mu_1 = \begin{cases} 0 & (f_1 \leq 0.500) \\ \left(\frac{f_1 - 0.5}{0.33}\right)^2 & (0.500 < f_1 < 0.833) \\ 1 & (f_1 \geq 0.833) \end{cases} \quad (2)$$

对于岩层冲击倾向性的测定,暂依据 2000 年发布的行业标准<sup>[16]</sup>进行实验判定,见表 2。

表 2 顶板冲击倾向性分类

Table 2 Classification of bursting liability of roof strata

类别	I	II	III
冲击倾向	无	弱	强
能量指数/kJ	$U_{wQ} \leq 10$	$10 < U_{wQ} \leq 100$	$U_{wQ} > 100$

为了分析岩层冲击倾向性对冲击危险性的影响,引入函数

$$f_2 = U_{wQ}/100 \quad (3)$$

式中, $U_{wQ}$ 为弯曲能量指数,kJ,计算公式见文献<sup>[16]</sup>。

采用二次抛物型隶属函数,岩层冲击倾向性对冲击危险性的隶属函数为

$$\mu_2 = \begin{cases} 0 & (f_2 \leq 0.1) \\ \left(\frac{f_2 - 0.1}{0.9}\right)^2 & (0.1 < f_2 \leq 1.0) \\ 1 & (f_2 > 1.0) \end{cases} \quad (4)$$

### 2.2 由地质因素评价冲击危险性

地质因素对冲击危险性的影响,主要是由于煤岩体的结构、岩层厚度、断层等地质构造使得煤岩体在

空间分布上呈各向异性、不均匀性等特点。煤岩体这种地质上的不均匀性可以反映在地震波速的变化上(图 1)。为了定量表征地震波速变化,引入波速异常系数  $f_3$  定义地质因素冲击危险性指标,即

$$f_3 = \frac{V - V^0}{V^0} \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $V$  为煤岩体波速,  $m/s$ ;  $V^0$  为平均波速,  $m/s$ 。

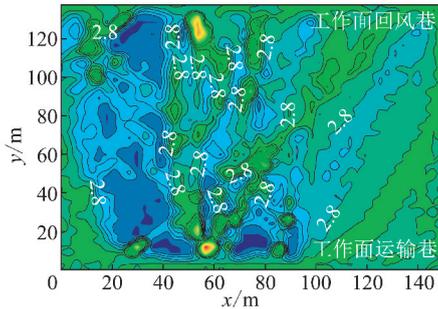


图 1 某工作面前方煤岩体波速分布

Fig. 1 Seismic wave speed distribution of ahead working face

波速异常值为实测煤岩体波速大小与未受工程扰动的平均波速大小之差,该值可以为正值,亦可为负值。波速异常系数表示由于工程扰动引起的波速变化程度。对于同一岩性而言,若  $f_3$  为正值,则表明该处煤岩体可能处于应力集中区;若  $f_3$  为负值可解释为应力释放区、顶底板破碎等地质现象。 $f_3$  的绝对值越大,表明异常程度越大。

采用二次抛物型地质因素对煤层冲击危险性的隶属函数为

$$\mu_3 = \begin{cases} 0 & (f_3 \leq 0.05) \\ \left(\frac{f_3 - 0.05}{0.45}\right)^2 & (0.05 < f_3 \leq 0.50) \\ 1 & (f_3 > 0.50) \end{cases} \quad (6)$$

### 2.3 由煤体采动应力判定冲击危险性

某煤层的冲击倾向性测定以后,其冲击倾向性是一致的。但是大量的冲击地压实例表明,冲击倾向性指标相同的同一煤层煤体,在井下不同位置处,受力状态不同,诱发冲击地压的能力也不相同,即冲击危险性不同。因此,冲击危险性评价应包括采动应力这一因素。一般情况下,采动应力对冲击危险性的评价大多采用垂直应力进行分析(图 2)。但是井下煤岩体在回采过程中处在相对复杂的受力状态,因此,笔者曾提出利用最大主应力与最小主应力之差与完整岩石单轴抗压强度比<sup>[8]</sup>作为评价煤体冲击危险性的指标之一。

采动应力冲击危险性指标按下式计算

$$f_4 = (\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_c \quad (7)$$

式中,  $\sigma_1$  为最大主应力;  $\sigma_3$  为最小应力;  $\sigma_c$  为单轴抗

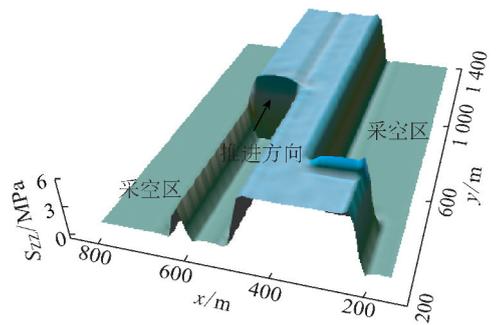


图 2 工作面前方垂直应力分布

Fig. 2 Vertical stress distribution of ahead working face

压强度。

大量的实验以及经验表明:当  $f_4 > 0.25$  时,才能引起煤岩层的破裂;当  $f_4 = 1.00$  时,煤岩体已经处于极限状态,很小的扰动就可能诱发冲击地压。所以

$$\mu_4 = \begin{cases} 0 & (f_4 \leq 0.25) \\ \left(\frac{f_4 - 0.25}{0.75}\right)^2 & (0.25 < f_4 < 1.00) \\ 1 & (f_4 \geq 1.00) \end{cases} \quad (8)$$

### 2.4 冲击危险性动态指数

由以上分析,定义冲击危险性动态指数为

$$U = c_1\mu_1 + c_2\mu_2 + c_3\mu_3 + c_4\mu_4 \quad (9)$$

式中,  $c_1, c_2, c_3, c_4$  为权重。

由式(1)~(9)进行计算得到冲击危险性动态指数  $U$ ,再根据表 3 可对开采区域冲击危险性进行动态判定。

表 3 冲击危险性动态指数分类

Table 3 Classification of bursting hazard dynamic indexes				
类别	I	II	III	IV
冲击危险性	无	弱	中	强
$U$	$0 \leq U < 0.4$	$0.4 \leq U < 0.6$	$0.6 \leq U < 0.8$	$0.8 \leq U \leq 1.0$

## 3 冲击危险性动态预评价体系的应用

### 3.1 冲击倾向性鉴定因素分析

某矿煤层冲击倾向性测定结果:  $t_d = 32 \text{ ms}$ ,  $W_{ET} = 4.2$ ,  $K_E = 5.7$ ,按式(1)、(2)计算得  $f_1 = 0.9$ ,  $\mu_1 = 1$ 。岩层弯曲能量指数为 49 kJ,按式(3)、(4)计算得  $\mu_2 = 0.19$ 。

### 3.2 采动应力因素分析

建立三维数值模拟模型。煤层埋深 700 m,工作面长度 130 m。最大水平应力 22.87 MPa,最小为 17.51 MPa,煤体的单轴抗压强度为 18 MPa,模型主要力学参数见表 4。以推进 800 m 为例,最大主应力与最小主应力差与单轴抗压强度的比值按式(7)计

算,将计算结果绘制成图,可以得到采动应力冲击危险性指标分布(图 3)。

### 3.3 工作面煤岩地质因素分析

岩体中波速的变化能够反映岩体地质体的变化。PASAT-M 便携式微震探测系统是从波兰 EMAG 公司引进的先进地震波探测设备。通过分别布置在两侧巷道的激发点和接收点所组成的观测系统获取煤

表 4 模型主要力学参数

Table 4 Main mechanical parameters of numerical model

岩层	厚度/ m	弹性模 量/GPa	泊松比	容重/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
顶板	20	17.66	0.14	25.00	13.83	29.5
煤层	20	6.09	0.34	13.81	5.66	31.5
底板	8	23.85	0.19	25.10	13.83	29.5

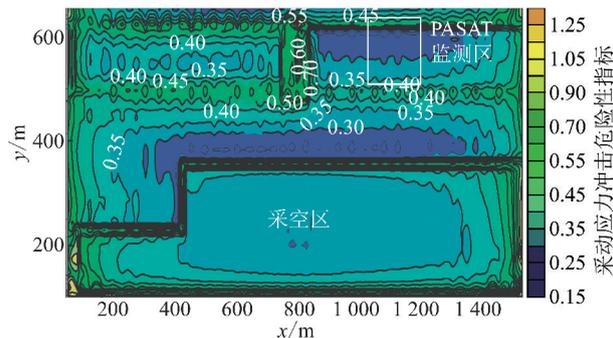


图 3 采动应力冲击危险性指标分布

Fig. 3 Bursting hazard index distribution of mining-induced stress

体信息,由激发点产生地震波,经过地质体的透射、折射、反射等物理过程,到达接收点,并用接收点所记录的直达波、反射波以及面波等震相的走时或振幅数据,在计算机上通过不同的数学处理方法得出地震波速度场分布图像,并通过速度的分布特征以及速度的大小来重建各种异常体区域的分布情况。

测区位置距切眼约 1 000 m,利用 PASAT-M 微震探测系统探测出工作面前方的波速分布,利用式(5)计算出工作面前方煤岩体内的速度变异指数分布(图 4)。由图 4 可见,在煤岩体内不存在较大的地质构造,在工作面运输巷和工作面回风巷附近,尤其是工作面运输巷附近存在波速增高和波速变化较大区域。

### 3.4 冲击危险性动态指数分布

根据现场实测及数值模拟结果,提取工作面推进不同距离时围岩的主应力,然后按式(7)、(8)进行计算,取  $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 0.25$ ,将上述结果代入式(9),即可确定不同推进距离时的冲击危险性的区域(图

5)。

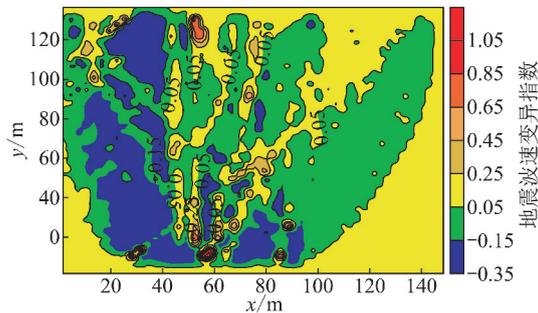
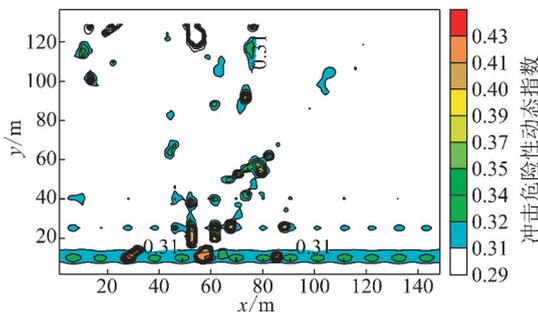
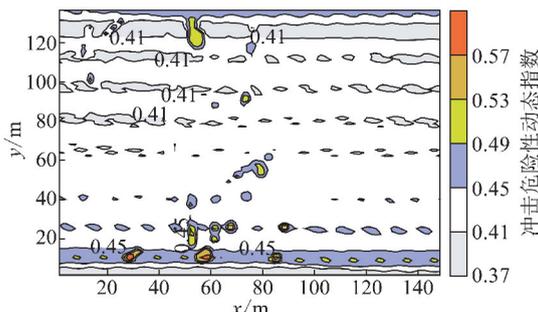


图 4 地震波速变异指数分布

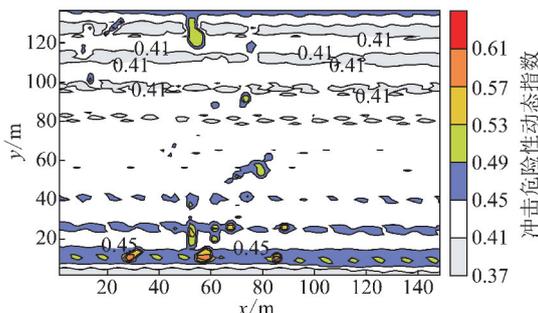
Fig. 4 Abnormality coefficient distribution of seismic wave



(a) 距工作面 100 m



(b) 距工作面 50 m



(c) 距工作面 10 m

图 5 冲击危险性动态指数分布

Fig. 5 Bursting hazard dynamic index distribution

由图 5 可知,工作面前方 100 m 的冲击危险性影响因素以地质因素、冲击倾向性、巷道开挖时采动应力为主,工作面回风巷和运输巷附近冲击危险性动态指数接近 0.4,冲击危险性为无。当工作面推进距研究区域 50、10 m 时,受二次采动影响,工作面回风巷

和运输巷附近,尤其工作面运输巷冲击危险性动态指数上升至0.4~0.6,达到弱冲击危险,需要采取一定的解危措施。

## 4 结 论

(1)对目前现有的冲击地压危险性预评价方法进行了分析,讨论了煤层冲击危险性的影响因素。在此基础上提出了基于煤岩冲击倾向性、煤层地质条件、开采采动应力等因素评价冲击性评价方法的思想。

(2)对冲击地压矿井工作面前方煤岩体进行了PASAT微震探测,获得了连续的煤岩体地质信息,采用波速异常系数对煤岩体进行定量评价,并将其作为冲击危险性预评价体系指标之一。

(3)建立了煤岩冲击倾向性、煤层地质条件、开采采动应力的冲击危险性动态评价指标,构建了冲击危险性动态预评价体系,实现冲击危险性的连续评价。对某冲击地压矿井的冲击危险性进行了预评价,表明了本方法具有合理性。

需要指出,由于地质条件的复杂性,地质探测结果受多种因素影响,各因素与冲击危险性的指标及其权重在不同的条件下会发生变化,还需在实践中进一步研究。

## 参考文献:

[1] 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.  
Qi Qingxin, Dou Linming. Theory and technology of rock burst [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008.

[2] 毛德兵. 冲击矿压发生危险性评价方法[J]. 煤矿开采, 2000(4): 51-52.  
Mao Debing. Evaluation methods of rock bursting hazard [J]. Coal Mining Technology, 2000(4): 51-52.

[3] 张开智,夏均民. 冲击危险性综合评价的变权识别模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 480-3 483.  
Zhang Kaizhi, Xia Junmin. Weight-variable identification model of comprehensive evaluation on burst liability of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3 480-3 483.

[4] 雷毅. 冲击地压危险性评价模型及应用研究[D]. 北京:煤炭科学研究总院,2005.  
Lei Yi. Study on establishment and application of hazard evaluation model for rock-burst [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2005.

[5] 姜福兴,王存文,叶根喜,等. 采煤工作面冲击地压发生的可能性评价方法研究[A]. 2008 全国冲击地压研讨会论文集[C]. 徐州:中国矿业大学出版社,2008:91-96.  
Jiang Fuxing, Wang Cunwen, Ye Genxi, et al. Study on possibility evaluation method of coal outburst in longwall face [A]. National

Symposium of the 2008 Rock Burst Seminar [C]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008:91-96.

[6] 姜谟男. 冲击地压危险性预测的最小二乘支持向量机模式识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S1): 4 881-4 886.  
Jiang Annan. Forecast of rock burst based on pattern recognition by least square support vector machine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S1): 4 881-4 886.

[7] 秦子哈,齐庆新. 基于模糊物元模型的冲击危险性评价[A]. 2008 全国冲击地压研讨会论文集[C]. 徐州:中国矿业大学出版社,2008:209-213.  
Qin Zihan, Qi Qingxin. Study on evaluating the danger of rock burst base on fuzzy matter element model [A]. National Symposium of the 2008 Rock Burst Seminar [C]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2008:209-213.

[8] 彭永伟,齐庆新,毛德兵,等. 回采过程中煤层冲击危险性评价方法研究[J]. 煤矿开采, 2010, 15(1): 1-3.  
Peng Yongwei, Qi Qingxin, Mao Debing, et al. Research on evaluation method for coal bursting danger in coal mining [J]. Coal Mining Technology, 2010, 15(1): 1-3.

[9] 郭建卿,苏承东. 不同煤样冲击倾向性试验结果分析[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 897-902.  
Guo Jianqing, Su Chengdong. Analysis on experimental results of rock burst tendency of different coal samples [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 897-902.

[10] 邹德蕴,姜福兴. 煤岩体中储蓄能量与冲击地压孕育机理及预测方法的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(4): 159-163.  
Zou Deyun, Jiang Fuxing. Research of energy storing and gestation mechanism and forecasting of rockburst in the coal and rock mass [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(4): 159-163.

[11] 冯增朝,赵阳升. 岩石非均质性与冲击倾向的相关规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 863-1 865.  
Feng Zengchao, Zhao Yangsheng. Correlativity of rock in homogeneity and rock trend [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 22(11): 1 863-1 865.

[12] 赵毅鑫,姜耀东,张雨. 冲击倾向性与煤体微观结构特征的相关规律[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 64-68.  
Zhao Yixin, Jiang Yaodong, Zhang Yu. The relationship between bump-prone property and microstructure characteristics of coal [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 64-68.

[13] 茅献彪,陈占清,徐思朋,等. 煤层冲击倾向性与含水率关系的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 49-52.  
Mao Xianbiao, Chen Zhanqing, Xu Sipeng, et al. Experimental study on the relation between the burst tendency and water content in coal seam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 49-52.

[14] 潘结南,孟召平,刘保民. 煤系岩石的成分、结构与其冲击倾向性关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4 422-4 427.  
Pan Jianan, Meng Zhaoping, Liu Baomin. Relationship between rock composition and texture of coal-bearing formation and its burst potential [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4 422-4 427.

[15] MT/T 174-2000, 煤的冲击倾向性分类及指数的测定方法[S].

[16] MT/T 866-2000, 岩石冲击倾向性分类及指数的测定方法[S].