

# 有效应力对石门揭煤突出影响分析和试验研究

唐巨鹏, 丁佳会, 于 宁, 路江伟

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 石门揭煤突出是我国煤矿突出强度最大、破坏最为严重的动力灾害。考虑深部开采条件, 引入有效应力, 应用折叠突变模型推导得到临界有效应力与揭煤面面积间关系表达式, 给出不同埋深最大揭煤面面积, 分析临界有效应力与揭煤面面积关系规律。以阜新孙家湾煤矿埋深 1 100 m 突出煤层为研究对象, 选用型煤试件, 利用自主研发的三轴突出模拟仪进行石门揭煤突出模拟试验。期间对型煤试件施加轴压、围压和孔隙压, 模拟突出煤层所处应力环境。改变突出弱面面积(30.19, 34.21, 38.48 cm<sup>2</sup>)模拟石门揭煤面面积对突出影响。结果表明: 临界有效应力与揭煤面面积间呈递增关系, 理论值与试验值增加趋势一致, 验证临界有效应力公式有效性; 临界有效应力、揭煤面面积是影响石门揭煤突出强度主要因素; 突出区域煤粉分布具有波动特性, 随临界有效应力和揭煤面面积增加, 揭煤处附近突出能量增大, 突出强度增加。所得结论对预防石门揭煤突出有重要参考意义。

**关键词:** 采矿工程; 揭煤面面积; 煤与瓦斯突出; 临界有效应力; 突出强度

**中图分类号:** TD 713

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2018)02 - 0282 - 09

## Analysis and experimental study on the effect of effective stress on coal and gas outburst in crosscutting

TANG Jupeng, DING Jiahui, YU Ning, LU Jiangwei

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

**Abstract:** The coal and gas outburst in crosscutting is the most serious dynamic disaster in coal mine in China. The relationship between the critical effective stress and the exposed area was deduced according to the fold catastrophe model. The maximum exposed areas of Fuxin Sunjiawan coal mine were presented under the different mining depth. The relationship between the exposed area and the critical effective stress was analyzed. The outburst coal seam at -1 100 m in Sunjiawan mine of Fuxin was studied. The experiment of the exposed area influencing the coal and gas outburst was performed using the triaxial outburst instrument designed and developed in-house and the coal briquette was put in the outburst instrument. The triaxial pressures were applied to the coal samples to simulate the stress environment of coal seam. The different exposed areas were simulated by changing the area of weak surface(30.19, 34.21 and 38.48 cm<sup>2</sup>). The results show that the critical effective stress increases with the increasing of the exposed area. The calculated results agree with the experimental data, which verified the formula of the critical effective stress. The critical effective stress and exposed area are main factors of the intensity of coal and gas outburst in crosscutting. The distribution of coal powder after outburst has the

**收稿日期:** 2017 - 03 - 23; **修回日期:** 2017 - 07 - 10

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFC0600901); 国家自然科学基金面上项目(51374119); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LR2015028)

Supported by the National Key Research and Development Program of China(Grant No. 2016YFC0600901), National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51374119) and Program for Liaoning Excellent Talents in University(Grant No. LR2015028)

**作者简介:** 唐巨鹏(1976 -), 男, 2006 年于辽宁工程技术大学工程力学专业获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事煤与瓦斯突出机制和实验方面的研究工作。E-mail: jupengt@126.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0280

characteristics of fluctuation. The outburst energy and intensity near the exposed face both increase with the increasing of exposed area and critical effective stress.

**Key words:** mining engineering; exposed area; coal and gas outburst; critical effective stress; intensity of outburst

## 1 引言

煤与瓦斯突出是井工煤矿生产中遇到的一种极其复杂矿井瓦斯动力现象,严重威胁井下人员生命安全<sup>[1]</sup>。在各类煤与瓦斯突出事故中,石门揭煤突出发生概率最高,突出强度最大,80%以上特大型突出均发生在石门揭煤工作面。我们认为,有效应力是反映采动应力环境对石门揭煤突出影响的主要外部加载因素,揭煤面面积是反映揭煤开采工艺对石门揭煤突出影响的主要人为扰动因素,两者间关系规律进一步明晰,是有效预测防治煤与瓦斯突出关键,相关研究亟待突破。

国内外学者关于煤与瓦斯突出模拟试验主要从地应力、瓦斯压力和煤力学性质3个方面考虑突出影响因素。其中,考虑地应力诱导煤与瓦斯突出代表性学者有:A. D. Alekseev等<sup>[2]</sup>首次将三轴应力加载设备用于突出试验,从应力角度分析了煤与瓦斯突出条件;孟祥跃等<sup>[3]</sup>应用二维试验装置进行突出试验得到煤体破坏区前沿的应力变化规律;许江等<sup>[4]</sup>认为应力集中区应力水平变化对煤与瓦斯突出起着重要影响作用。考虑瓦斯诱导突出代表性学者有:T. H. Patching和J. C. Botham<sup>[5]</sup>利用圆柱型突出装置对不同煤样进行试验,采用混合气体来模拟瓦斯,突出情形与现场近似;邓全封等<sup>[6]</sup>通过对实际煤层煤样进行试验得到了瓦斯压力与突出强度关系;王维忠等<sup>[7]</sup>利用自主研发的煤与瓦斯突出模拟试验台对同一种煤样进行了5种不同瓦斯压力水平下煤与瓦斯突出模拟试验,认为瓦斯压力是突出发生的动力,起着粉碎和抛出煤粉的作用。考虑煤力学性质对煤与瓦斯突出影响的代表性学者有:J. Bodziony等<sup>[8]</sup>通过煤与瓦斯突出模拟试验研究了孔隙率对突出速度影响;吴鑫和隆泗<sup>[9]</sup>选用不同粒级配比下的煤粒进行煤与瓦斯突出试验,分析验证了煤体破碎程度与煤与瓦斯突出危险性潜在关系;韦纯福等<sup>[10]</sup>通过模拟不同含水率煤与瓦斯突出试验,得出含水率与突出强度呈负相关关系。从地应力、瓦斯压力及煤体力学性质综合作用来考虑煤与瓦斯突出代表性学者有:蔡成功<sup>[11]</sup>按照相似理论设计了三维煤与瓦斯突出模拟设备,通过试验得到了突出强度同瓦斯压力、煤型强度、三向应力关系系数

学模型;许江等<sup>[12-13]</sup>为更深层次探索煤与瓦斯突出机制,研发并改进了大型煤与瓦斯突出模拟试验台,且通过开展不同突出口径条件下煤与瓦斯突出试验<sup>[14]</sup>,分析了瓦斯压力和温度的演化,所得结论对预防煤与瓦斯突出有一定参考意义;颜爱华和徐涛<sup>[15]</sup>通过进行煤与瓦斯突出物理试验及数值模拟,验证了煤与瓦斯突出突出是瓦斯压力、地应力及煤体力学性质综合作用结果;袁瑞甫和李怀珍<sup>[16]</sup>研制了含瓦斯煤动态模拟试验设备,旨在分析地应力、瓦斯压力及煤体强度三因素不同组合情况下含瓦斯煤动态破坏规律;王刚等<sup>[17]</sup>基于石门揭煤过程中采掘应力场与瓦斯突出关系,研制出石门揭煤突出模拟试验系统,为研究煤与瓦斯突出机制提供新的技术手段。

综合以上可以看出,国内外学者对煤与瓦斯突出是地应力、瓦斯压力、煤力学性质综合作用的结果已逐渐形成共识,但并未考虑有效应力对煤与瓦斯突出影响。而实际上,有效应力是反映地应力和瓦斯压力相互作用物理量,研究有效应力与煤与瓦斯突出参数关系具有重要参考意义。本文以前人煤与瓦斯突出理论及模拟试验为基础,引入有效应力这一参数,以石门揭煤突出为研究对象,推导有效应力与揭煤面面积关系表达式,给出适用于深部开采的临界有效应力公式。利用自主研发的突出模拟试验装置,对埋深1100m的石门揭煤突出进行了试验模拟,分析了揭煤面面积与临界有效应力、突出强度、煤粉分布的关系,试验结果与理论推导结果吻合性较好,所得结论对煤与瓦斯突出防治有一定参考意义。

## 2 考虑有效应力揭煤面面积理论分析

从理论分析角度,考虑深部开采条件下有效应力对煤与瓦斯突出影响,同时引入石门揭煤过程中临界瓦斯压力分析,给出了有效应力与石门揭煤面面积关系表达式。

### 2.1 模型建立

巷道在开挖过程中会造成围岩应力重新分布,在掘进迎头一定距离内,因应力集中导致裂隙产生与扩展,同时裂隙内瓦斯聚集,当瓦斯压力产生的拉应力大于煤岩抗拉强度时,裂隙将进一步扩展,

形成与揭煤暴露面平行的薄层，称为破碎带。破碎带两侧分别有压力较大的瓦斯压力和压力较小的巷道大气压，如果两侧气体流通较少，使得压力差过大，则破碎带会在瓦斯压力作用下失稳，即发生煤与瓦斯突出。

为简化分析，可以将岩石掘进巷道简化成圆形<sup>[18]</sup>，建立如图1所示力学模型，模型的边界载荷为采场均布应力、瓦斯压力。同时做如下假设：(1) 上覆岩层、底板与破碎带夹角为90°；(2) 煤层为各向同性的连续、均匀弹塑性介质；(3) 忽略煤体自重；(4) 考虑石门刚揭露时，掘进工作面内瓦斯压力分布均匀。

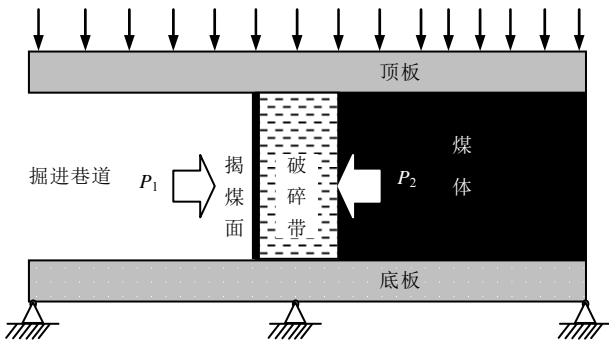


图1 石门揭煤模型

Fig.1 The model of crosscutting

将破碎带视为厚度为  $t$  的直立圆柱薄板(见图2)，含瓦斯煤岩夹在强度、刚度较大的顶底板之间，当突出发生时，忽略顶底板变形。破碎带半径为  $a$ ，与揭煤面半径相同；破碎带左侧受巷道大气压力为  $p_1$ ，右侧受煤层瓦斯压力为  $p_2$ ，均视为均匀压力，其合力  $p_0 = p_2 - p_1$ ，方向与瓦斯压力方向相同。

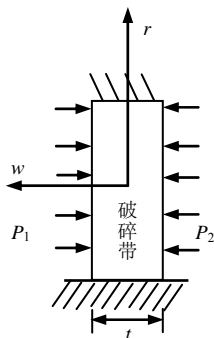


图2 破碎带力学模型

Fig.2 The mechanical model of fractured zone

### 2.2 有效应力公式推导

突变理论是根据系统势函数将临界点分类，通过研究各类临界点附近的不连续特征，归纳出各种初等突变模型，并以此为基础分析自然中突变现象。

煤与瓦斯突出及巷道失稳是一种典型突变现象，本文参考赵志刚等<sup>[18]</sup>折叠突变理论对煤与瓦斯突出进行分析。按照突变理论，首先求得破碎带系统势函数为

$$\Pi = U - W \tag{1}$$

式中： $\Pi$  为系统总势能(J)， $U$  为破碎带变形势能(J)， $W$  为外力所做的功(J)。

破碎带具有夹支边界，其轴向位移可表示为

$$w = w_m \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^2 \tag{2}$$

边界条件为

$$\left. \begin{aligned} (w)_{r=a} &= 0 \\ (dw/dr)_{r=a} &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式中： $w$  为破碎带轴向位移(m)， $w_m$  为破碎带中心位移(m)， $r$  为距破碎带中心的距离(m)， $a$  为破碎带半径(m)。

由弹性力学可知：

$$U = \pi D \int_0^a \left[ r \left( \frac{d^2 w}{dr^2} \right)^2 + \frac{1}{r} \left( \frac{dw}{dr} \right)^2 \right] dr \tag{4}$$

式中： $D$  为破碎带弯曲刚度， $D = Et^3 / [12(1 - \mu^2)]$ ， $t$  为破碎带厚度(m)， $E$  为煤体弹性模量(MPa)， $\mu$  为煤体泊松比。将边界条件代入积分得

$$U = \frac{32\pi D}{3a^2} w_m^2 \tag{5}$$

外力功  $W$  分别为轴向位移所做的功  $W_1$  和径向位移所做的功  $W_2$  之和，可表示为

$$W = W_1 + W_2 = \frac{1}{3} \pi p_0 a^2 w_m + (-0.04\pi p_0 w_m^3) \tag{6}$$

由式(5)，(6)可推得系统势函数，同时令  $w_m = x - 800D / (3a^2 p_0)$ ，并舍去与  $x$  无关的项，可得

$$\Pi = 0.04\pi p_0 x^3 + \left( \frac{1\ 024\pi D^2}{a^6 p_0} - \frac{1}{25\pi p_0} \right) x \tag{7}$$

令  $x = \sqrt[3]{25/(3\pi p_0)} y$ ，则

$$\left. \begin{aligned} \Pi &= \frac{1}{3} y^3 + by \\ b &= \frac{(25\ 600\pi^2 D^2 - a^6) \sqrt[3]{25/(3\pi p_0)}}{25\pi a^6 p_0} \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

式中： $b$  为势函数系数， $p_0$  为巷道大气压力与瓦斯压力的合力(MPa)。

式(8)为突变模型标准式,煤与瓦斯突出过程符合折叠突变模型。故本系统的平衡方程为

$$\frac{dI}{dy} = y^2 + b = 0 \quad (9)$$

由突变理论可知,  $b=0$  时是系统稳定和失稳的临界状态。令  $b=0$ , 整理后得

$$p_0 = \frac{40Et^3}{3a^3(1-\mu)} \quad (10)$$

式(10)即为发生突出时临界瓦斯压力, 超过该值时失稳, 发生煤与瓦斯突出; 不超过该值, 系统稳定。由该式可以看出, 临界瓦斯压力受到弹性模量、泊松比(可代表煤体物理力学性质)和破碎带半径、厚度(可代表开采工艺)的影响, 煤体弹性模量越大, 临界瓦斯压力越大, 即煤体较硬时, 越不容易发生突出; 揭煤面半径越小, 临界瓦斯压力越大, 煤与瓦斯突出越不容易发生, 这与实际现场情况是一致的, 同时也说明了该公式的合理性。

随着我国煤矿开采深度加大, 开采条件越来越复杂, 因此易俊等<sup>[19]</sup>经试验推导出适用于深部开采的有效应力公式, 综合考虑了深部煤层垂直地应力、水平地应力以及瓦斯压力的相互作用, 对深入研究煤与瓦斯突出的机制具有重要研究意义。计算式为

$$\sigma_e = \frac{1}{3}(\sigma_v + 2\sigma_h) - \frac{1}{2}(p_2 - p_1) \quad (11)$$

式中:  $\sigma_v$  为垂直地应力(MPa);  $\sigma_h$  为水平地应力(MPa);  $p_2$  为煤层内瓦斯压力(MPa);  $p_1$  为巷道内大气压力(MPa), 取 0.1 MPa;  $\sigma_e$  为有效应力(MPa)。

联立式(10)和(11), 可以推导出发生煤与瓦斯突出临界有效应力公式:

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{3}(\sigma_v + 2\sigma_h) - \frac{1}{2} \left[ \frac{40Et^3}{3a^3(1-\mu)} \right] \quad (12)$$

由圆形揭煤面面积  $S = \pi a^2$ , 可以推导出临界有效应力与揭煤面面积表达式为

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{3}(\sigma_v + 2\sigma_h) - \frac{20}{3} \left[ \frac{\pi^{\frac{3}{2}} Et^3}{S^{\frac{3}{2}}(1-\mu)} \right] \quad (13)$$

式中:  $\sigma_{cr}$  为临界有效应力(MPa)。

### 2.3 理论分析

结合临界突出瓦斯压力公式及有效应力公式, 推导出适用于深部开采的临界有效应力公式, 从式(13)中可以看出,  $\sigma_{cr}$  不仅与煤岩所受垂直地应力

$\sigma_v$ 、水平地应力  $\sigma_h$  有关, 还与揭煤面面积  $S$  及破碎带厚度  $t$  有关。对于深部开采高地应力、高瓦斯压力矿井, 通过已知煤体力学参数, 引入临界有效应力计算揭煤面面积, 对实际煤矿防突工作具有一定参考意义。

以阜新孙家湾矿不同埋深下地应力、瓦斯压力为原始数据<sup>[20]</sup>, 阜新孙家湾矿揭煤面面积计算参数如表 1 所示。根据式(11)计算得到不同埋深下的临界有效应力, 由式(12)求得  $t/a$  的大小约为 1/10, 结合实际巷道大小, 取破碎带厚度  $t = 0.2$  m, 求得最大揭煤面半径  $a$  及揭煤面面积  $S$ 。计算结果如表 2 所示, 其关系如图 3 所示。理论计算结果表明, 埋深越深, 揭开石门的最大揭煤面面积应越小, 这是因为随着煤层深度增加, 煤层所受地应力、瓦斯压力逐步加大, 应力越集中于掘进巷道前方破碎带处, 使得煤与瓦斯突出危险程度增加, 而减小石门揭煤面面积会影响瓦斯压力的释放, 降低突出发生的危险性, 为石门揭煤突出的防治提供理论参考依据。

表 1 阜新孙家湾矿揭煤面面积计算参数

Table 1 The calculation parameters of exposed area in Sunjiawan mine of Fuxin

| 计算参数   | 代表符号      | 数值大小    |
|--------|-----------|---------|
| 泊松比    | $\mu$     | 0.28    |
| 弹性模量   | $E$       | 1.0 GPa |
| 塑性软化系数 | $m$       | -0.45   |
| 内摩擦角   | $\varphi$ | 20°     |
| 平均扩容系数 | $n$       | 1.1     |
| 巷道大气压力 | $p_1$     | 0.1 MPa |

表 2 不同埋深下煤层参数及计算结果

Table 2 The parameters and calculation results of coal seam under different depths

| 煤层深度/m | 垂直地应力 $\sigma_v$ / MPa | 水平地应力 $\sigma_h$ / MPa | 瓦斯压力 / MPa | 有效应力 / MPa | $\frac{t}{a}$ | 最大揭煤面半径/m | 最大揭煤面面积/m <sup>2</sup> |
|--------|------------------------|------------------------|------------|------------|---------------|-----------|------------------------|
| 600    | 14.10                  | 6.04                   | 13.6       | 1.98       | 0.090 0       | 2.22      | 15.51                  |
| 700    | 16.45                  | 7.05                   | 14.6       | 2.93       | 0.092 2       | 2.17      | 14.78                  |
| 800    | 18.80                  | 8.06                   | 15.6       | 3.89       | 0.094 2       | 2.12      | 14.16                  |
| 900    | 21.16                  | 9.07                   | 16.6       | 4.85       | 0.096 2       | 2.08      | 13.58                  |
| 1 000  | 23.51                  | 10.07                  | 17.6       | 5.80       | 0.098 1       | 2.04      | 13.05                  |

实际煤层中瓦斯含量在不同地区差异较大, 这也导致瓦斯压力不同。故本文考虑在同一埋深下, 石门揭煤面面积与临界瓦斯压力及临界有效应力的关系, 由杨森林<sup>[20]</sup>计算得到埋深 1 100 m 条件下煤层所受垂直地应力  $\sigma_v = 25.8$  MPa, 水平地应力为  $\sigma_h = 11.08$  MPa, 取破碎带厚度  $t = 0.2$  m, 揭煤面

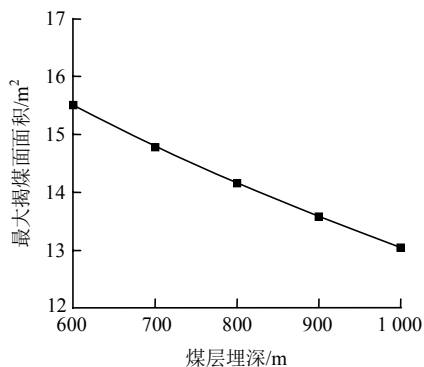


图3 煤层埋深与最大揭煤面面积关系曲线

Fig.3 The relations among the depth of coal seam and the maximum exposed face area

半径在 1.7~2.0 m, 得出如图 4 所示关系曲线。从图 4 中可以看出, 随揭煤面面积增加, 发生突出时所需临界瓦斯压力越小, 临界有效应力越大, 说明在同一煤层埋深下, 揭煤面面积越大, 越容易发生煤与瓦斯突出。这是因为揭煤面面积影响煤层瓦斯放散速度, 当揭煤面面积较小时, 突出煤层内瓦斯放散较慢, 导致瓦斯压力降低相对较慢, 揭煤面内外瓦斯压力差越小, 越不满足煤与瓦斯突出发生条件。

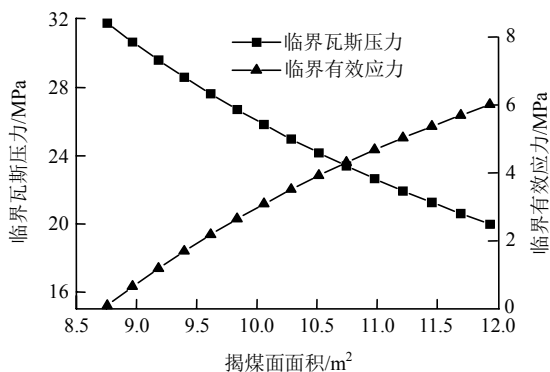


图4 揭煤面面积与临界瓦斯压力及临界有效应力关系曲线

Fig.4 The relationship curves of exposed face area, critical gas pressure and critical effective stress

### 3 试验装置及方案设计

#### 3.1 试验装置及原理

基于实际煤与瓦斯突出情况, 自主设计研制可同时改变轴压、围压和孔隙压的三轴突出模拟压力仪<sup>[21]</sup>(见图 5)。轴压、围压通过装置顶端和两侧设置的活塞式油压缸体加载以模拟地应力作用, 孔隙压通过外接氮气瓶由数字压力表调节控制加载以模拟瓦斯压力作用。试验装置中突出口设计为可自行打开, 即在突出口位置设计安装突出弱面挡板, 用以模拟揭煤面, 当含瓦斯受载煤体达到突出条件时,

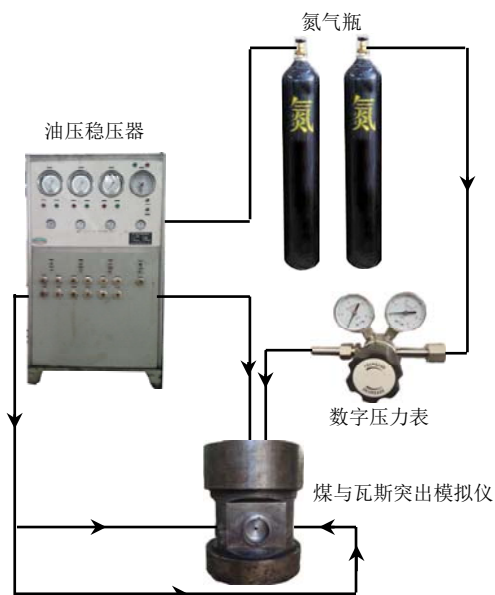


图5 煤与瓦斯突出设备

Fig.5 The equipment of coal and gas outburst

挡板将被破坏喷射而出, 从而模拟揭煤过程中发生的煤与瓦斯突出。

#### 3.2 试验方案设计

试验煤样取自辽宁阜新孙家湾煤矿突出煤层, 该煤层为中富灰长焰煤, 煤层相关参数如表 3 所示。具体试验步骤如下: (1) 将原煤试样人工粉碎, 分别筛选得到 20~40, 40~60, 60~80, >80 目 4 种不同粒径的煤粉; (2) 根据试验设定孔隙率计算所需煤粉质量, 再根据粒径配比计算出不同目数煤粉质量; (3) 将煤粉置于设备压力腔内, 用 2 000 kN 压力机将其压制成型, 型煤试样不再取出; (4) 将试验装置与加载系统连接后, 对其密封性进行测试, 确认无误后外接真空压缩机, 预抽真空 24 h, 然后将氮气充入突出模拟装置, 使型煤饱和和吸附 24 h; (5) 连接伺服压力机, 对型煤煤样按照设定围压、轴压进行加载、稳压 30 min 以上, 若不发生突出, 逐级加载孔隙压, 直到发生突出为止, 记录数据, 如此, 完成一次试验; (6) 更换突出弱面, 分别进行试验, 模拟不同揭煤面面积煤与瓦斯突出情况, 将所得结果进行分析对比。

表3 煤层基本参数

Table 3 The basic parameters of coal seam

| 层厚/<br>m | 瓦斯含量/<br>(m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ) | 含水<br>率/% | 孔隙率/<br>% | 抗压强度/<br>MPa | 视密度/<br>(g · cm <sup>-3</sup> ) | 真密度/<br>(g · cm <sup>-3</sup> ) |
|----------|---|-----------|-----------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0.8~34   | 15.1 × 10 <sup>-3</sup>                       | 3         | 6.2~11.3  | 14.42~31.28  | 1.52                            | 1.593                           |

### 3.3 试验参数取值

为了模拟不同揭煤面面积下的煤与瓦斯突出，将突出弱面设计为圆形，进行突出试验时，采用抗压强度 20 MPa(与煤样抗压强度均值 22.85 MPa 接近)，突出弱面直径分别为 6.2, 6.6, 7.0 cm(对应面积为 30.19, 34.21, 38.48 cm<sup>2</sup>)，厚度均为 0.33 cm 的圆形有机玻璃板遮挡密封，如图 6 所示。

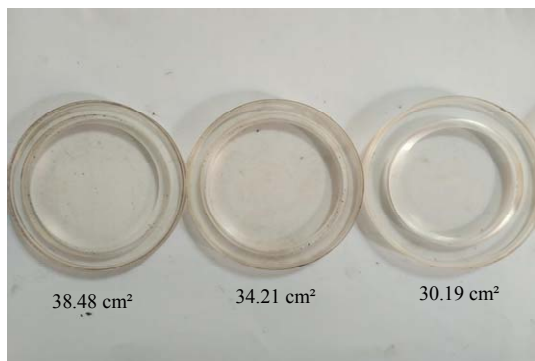


图 6 模拟不同揭煤面面积的突出弱面挡板图

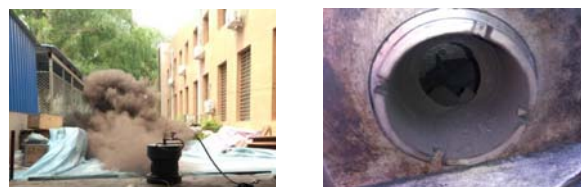
Fig.6 The simulation of different exposed face areas by the weak surface baffle of outburst

由相似理论<sup>[21]</sup>得到原煤与型煤的弹性模量、泊松比、密度比值均近似为 1，长度比值为 7.5，应力比值为 8.3。设定试验开采深度为 1 100 m，垂直地应力  $\sigma_v$  为 25.8 MPa，水平地应力  $\sigma_h$  为 11.08 MPa，根据应力比值 8.3，确定埋深 1 100 m 处试验应力加载条件为轴压 3.2 MPa、围压 1.4 MPa。

试验采用型煤试件，为使型煤与原煤密度相同，设定型煤孔隙率为 11%，经计算<sup>[22]</sup>煤粉质量取为 4 620 g，成型压力为 21.9 MPa，压力稳定时间为 30 min。3 组试验煤粉配比均为 20~40 目占 50%，40~60 目和 60~80 目各占 20%、>80 目占 10%。

## 4 试验现象分析

3 组试验均在轴压、围压固定不变的加载条件下，增加孔隙压至临界突出瓦斯压力约 2 min 后发生了煤与瓦斯突出。突出时伴随有一声巨响，高压孔隙气体夹杂煤粉呈外扇形喷射而出。在突出口附近呈现细流，有大块煤体，突出中部煤粉集中，突出远端产生雾状煤尘，经 30 min 后逐渐消散(见图 7(a))。突出弱面孔洞具有典型的口小腔大特征(见图 7(b))，说明煤与瓦斯突出启动是含瓦斯煤体积蓄能量达临界状态时在突出弱面突然释放的结果，与现场观测结果近似<sup>[23]</sup>。



(a) 煤与瓦斯突出过程 (b) 突出孔洞形态

图 7 煤与瓦斯突出试验现场

Fig.7 The site of coal and gas outburst test

将 3 组试验突出煤粉粒径与初始粒径进行对比(见图 8)，观察可知，大粒径(20~40 目)煤粉所占比例有所下降，由初始配比 50%分别降至 34.46%，21.39%，27.06%；小粒径(>80 目)煤粉所占比例有所增加，由初始配比 10%分别增至 34.22%，36.44%，24.39%。表明在突出过程中，煤粉在轴压、围压、孔隙压三维应力状态下进一步破碎。试验现象与现场观测结果<sup>[24]</sup>较为接近，说明试验方案的可行性。

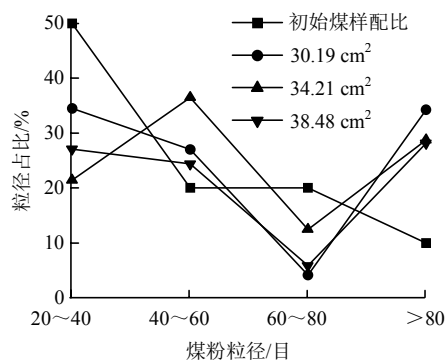


图 8 试验前后煤粉粒径分布

Fig.8 Size distributions of pulverized coal particle before and after the test

## 5 试验结果分析

试验分别模拟了突出弱面面积为 30.19, 34.21, 38.48 cm<sup>2</sup> 的煤与瓦斯突出情况(见表 4)，再现了深部矿井煤与瓦斯突出从孕育到启动发生全过程。为了方便分析煤与瓦斯突出强度，特别定义了绝对突出强度和相对突出强度(绝对突出强度指突出煤

表 4 煤与瓦斯突出情况表

Table 4 The cases of coal and gas outburst

| 突出弱面半径/cm | 突出弱面面积/cm <sup>2</sup> | 突出情况 | 临界瓦斯压力/MPa | 绝对突出强度/g | 相对突出强度/% |
|-----------|------------------------|------|------------|----------|----------|
| 3.1       | 30.19                  | 突出   | 2.8        | 2 510    | 54.32    |
| 3.3       | 34.21                  | 突出   | 2.7        | 2 645    | 57.25    |
| 3.5       | 38.48                  | 突出   | 2.5        | 2 730    | 59.09    |

体质量, 相对突出强度指突出煤体质量占总煤体质量百分比)。

### 5.1 临界有效应力分析

地应力及瓦斯压力是影响煤与瓦斯突出重要因素, 而有效应力体现了垂直地应力、水平地应力及瓦斯压力综合作用。根据式(13)可以推得发生煤与瓦斯突出临界有效应力, 揭煤面面积分别为 30.19, 34.21, 38.48 cm<sup>2</sup>, 破碎带厚度  $t$  均为 0.33 cm, 煤的弹性模量  $E=1.0$  GPa, 泊松比  $\mu=0.28$ 。代入式(13)求得临界有效应力  $\sigma_{cr}$  分别为 4.831, 6.740, 8.239 MPa, 根据应力比值 8.3 确定有效压力分别为 0.582, 0.812, 0.993 MPa。试验得到临界瓦斯压力  $p_2$  分别为 2.8, 2.7, 2.5 MPa, 巷道大气压力  $p_1$  均取 0.1 MPa, 由式(11)可得试验临界有效应力分别为 0.65, 0.7, 0.8 MPa, 其关系如图 9 所示。

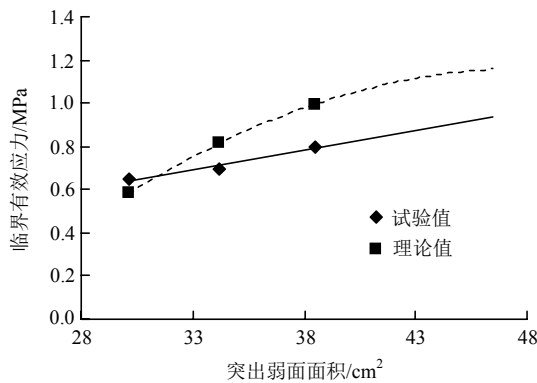


图 9 突出弱面面积与临界有效应力关系曲线

Fig.9 The relation between the weak surface area and the critical effective stress

结果表明: 试验及理论临界有效应力值均随突出弱面面积增大而增大, 且随着揭煤面面积增大, 二者增长趋势逐渐一致。实践证明, 石门揭煤面面积越大, 临界有效应力越大, 越容易发生突出。当揭煤面面积较小时, 突出煤层内瓦斯放散较慢, 导致瓦斯压降相对较慢, 只有达到较高瓦斯压力条件时才会发生突出。在实际矿井开采中, 控制瓦斯抽采和减小揭煤面面积对预防煤与瓦斯突出有重要意义。

### 5.2 突出强度分析

煤与瓦斯突出发生时, 煤体在地应力和瓦斯压力共同作用下失稳破坏并被抛出, 新形成的煤体暴露面以里形成瓦斯压力梯度造成突出持续发展, 这一过程中瓦斯持续解吸放散。当揭煤面面积较大时, 瓦斯放散速度较快, 导致内外瓦斯压力梯度升高, 煤体在瓦斯作用下断裂失稳的危险性升高, 发生失

稳煤量增加, 突出强度增大。根据对我国典型矿区煤与瓦斯突出平均突出强度统计发现<sup>[24]</sup>, 石门揭煤诱发煤与瓦斯突出平均强度为  $3.165 \times 10^5$  kg, 打钻诱发煤与瓦斯突出平均强度  $3.56 \times 10^4$  kg。

典型煤与瓦斯突出一个重要特征是抛出大量的煤, 煤量可达到数吨至数万吨, 现场突出强度以每次抛出煤体质量和瓦斯涌出量为指标。由于瓦斯涌出量计量困难, 一般以突出煤体质量作为划分突出强度主要依据。如表 4 所示, 当突出弱面面积分别为 30.19, 34.21, 38.48 cm<sup>2</sup> 时, 对应绝对突出强度为 2 510, 2 645, 2 730 g, 相对突出强度为 54.32%, 57.25%, 59.09%。试验得到不同突出弱面面积下相对突出强度与临界有效应力(由节 5.1 得出)间关系如图 10 所示。

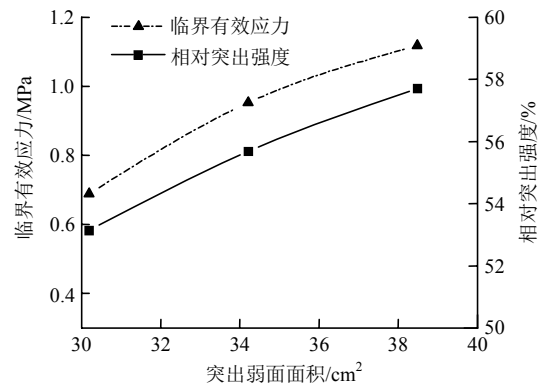


图 10 突出弱面面积、突出强度及临界有效应力关系曲线  
Fig.10 The relations among the weak surface area, intensity of outburst and critical effective stress

结果表明: 相对突出强度与临界有效应力均随揭煤面面积增加而增加, 当突出弱面面积从 30.19 cm<sup>2</sup> 增至 38.48 cm<sup>2</sup> 时, 相对突出强度分别增加了 5.3%和 3.2%, 临界有效应力分别增加了 39.5%和 22.3%, 由此可见随着突出弱面面积的增加, 相对突出强度及临界有效应力增值逐渐减小。由试验结果可以看出, 随着揭煤面面积增加, 煤与瓦斯突出强度将越来越大, 但强度增长幅度会趋于平缓。

### 5.3 突出煤粉分布特征分析

发生突出时煤体在高压瓦斯作用下将被抛出数米到数千米不等, 并可随巷道拐弯、分叉或抛向高处, 且突出煤体具有明显分选现象, 因此, 研究煤体分布特征可以为探索突出过程中能量的构成及耗散规律提供思路。将突出后煤粉划分为 5 个区域(见图 11): 突出近区(0~5 m)、突出中近区(5~10 m)、突出中区(10~15 m)、突出中远区(15~20 m)、突出远区(20~25 m)。分别对每组试验突出区域煤粉称

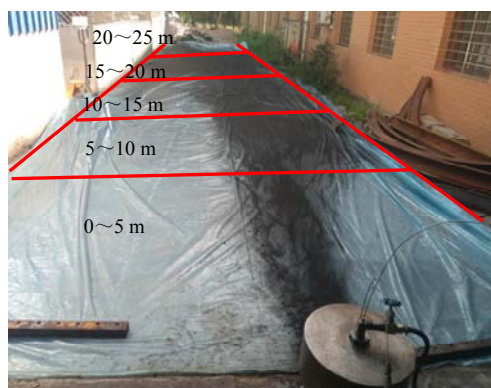


图 11 突出区域平面划分图

Fig.11 Divided plane of outburst domain

重, 所得结果如表 5 所示, 其关系如图 12 所示, 通过观察可知, 突出煤粉质量呈先增加后减小趋势, 当突出弱面面积为  $30.19 \text{ cm}^2$  时, 突出煤粉主要集中在突出中区(32.19%)和突出中远区(31.87%); 当突出弱面面积为  $34.21 \text{ cm}^2$  时, 突出煤粉主要集中在突出中区(31.49%); 当突出弱面面积为  $38.48 \text{ cm}^2$  时, 突出煤粉主要集中在突出中近区(30.07%)和突出中区(34.51%)。可以看出, 突出弱面面积越大, 突出煤粉越集中于揭煤处附近。

表 5 不同突出区域煤粉质量分布表

Table 5 The distribution of pulverized coal quality in different outburst domains

| 突出区域 | 突出弱面面积 $30.19 \text{ cm}^2$ |       | 突出弱面面积 $34.21 \text{ cm}^2$ |       | 突出弱面面积 $38.48 \text{ cm}^2$ |       |
|------|-----------------------------|-------|-----------------------------|-------|-----------------------------|-------|
|      | 质量/g                        | 百分比/% | 质量/g                        | 百分比/% | 质量/g                        | 百分比/% |
| 近区   | 227                         | 9.04  | 320                         | 12.10 | 492                         | 18.02 |
| 中近区  | 545                         | 21.71 | 712                         | 26.92 | 821                         | 30.07 |
| 中区   | 808                         | 32.19 | 833                         | 31.49 | 942                         | 34.51 |
| 中远区  | 800                         | 31.87 | 704                         | 26.62 | 475                         | 17.40 |
| 远区   | 130                         | 5.18  | 76                          | 2.87  | 0                           | 0.00  |

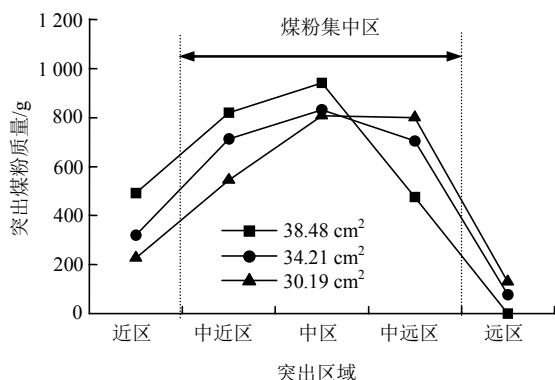


图 12 不同突出区域煤粉质量分布图

Fig.12 The distribution of pulverized coal quality in different outburst domains

试验结果表明, 高压瓦斯气体夹杂煤粉喷射而出, 突出区域煤粉分布具有波动特性, 表明了突出能量释放耗散过程的波动性, 当揭煤面面积较大时, 临界突出瓦斯压力较小, 而瓦斯放散速度较快, 使得揭煤处附近突出能量释放较多, 含瓦斯煤岩被抛出总量增多。因此, 在实际矿井生产中, 根据石门揭煤面面积大小合理布置防护措施可以有效减少煤与瓦斯突出造成的灾害。

## 6 讨论

本文以煤与瓦斯突出折叠突变理论为基础, 推导了适用于深部开采的临界有效应力公式, 同时以阜新孙家湾矿突出煤层为研究背景, 结合实际地应力、瓦斯压力等参数计算得出不同埋深下最大揭煤面面积, 且通过试验对理论公式进一步验证, 对比结果吻合性较好, 所得结论对有效预测防治煤与瓦斯突出具有一定参考价值。但由于煤与瓦斯突出机制具有复杂性, 且影响突出因素较多, 如掘进速度、深部采场温度、断层构造等, 因此, 本文所得结论尚待进一步验证, 其适用性是今后研究重点。

## 7 结论

(1) 考虑深部煤层开采条件, 通过理论分析, 结合突变理论及有效应力公式, 推导得到了临界有效应力与石门揭煤面面积间关系表达式。理论分析表明: 埋深越深, 揭开石门的最大揭煤面面积应越小; 同一埋深下, 揭煤面面积越大, 发生突出时所需临界瓦斯压力越小, 临界有效应力越大, 越容易发生煤与瓦斯突出。

(2) 分析临界有效应力与揭煤面面积关系, 并通过试验值与理论值对比发现: 二者临界有效应力值均随突出弱面面积的增大而增大, 且随着揭煤面面积增加, 二者增加趋势一致。

(3) 随石门揭煤面面积增加, 煤与瓦斯相对突出强度及临界有效应力将越来越大, 但二者增长幅度将趋于平缓。

(4) 突出区域煤粉分布具有波动特性, 且随揭煤面面积增加, 突出煤粉越集中于揭煤处附近, 该处突出能量释放增多, 突出强度增大。

### 参考文献(References):

[1] 程远平, 刘洪永, 赵伟. 我国煤与瓦斯突出事故现状及防治



- 对策[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 15 - 18.(CHENG Yuanping, LIU Hongyong, ZHAO Wei. Status and prevention countermeasures of coal and gas outburst accidents in China[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 15 - 18.(in Chinese))
- [2] ALEKSEEV A D, NEDODAYEV N V, STARIKOV G P. Destruction of coal saturated with gas under triaxial stress field on distressing: Modeling of outbursts of coal and gas[J]. Institute Problem Mekhaniki AN USSR(preprint), 1980, 139: 30.
- [3] 孟祥跃, 丁雁生, 陈力, 等. 煤与瓦斯突出的二维模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(1): 57 - 62.(MENG Xiangyue, DING Yansheng, CHEN Li, et al. 2D simulation test of coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(1): 57 - 62.(in Chinese))
- [4] 许江, 刘东, 尹光志, 等. 非均匀布荷载条件下煤与瓦斯突出模拟试验[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 836 - 842.(XU Jiang, LIU Dong, YIN Guangzhi, et al. Simulation experiment of coal and gas outburst under non-uniform load[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 836 - 842.(in Chinese))
- [5] PATCHING T H, BOTHAM J C. Occurrence, research and control of sudden outbursts of coal and gas in Canada[M]. Ottawa: Queen's Printer and Controllers of Stationery, 1967: 30.
- [6] 邓全封, 栾永祥, 王佑安. 煤与瓦斯突出模拟试验[J]. 煤矿安全, 1989, 20(11): 5 - 10.(DENG Quanfeng, LUAN Yongxiang, WANG You'an. Coal and gas outburst simulating test[J]. Safety in Coal Mines, 1989, 20(11): 5 - 10.(in Chinese))
- [7] 王维忠, 陶云奇, 许江, 等. 不同瓦斯压力条件下的煤与瓦斯突出模拟试验[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(3): 82 - 86.(WANG Weizhong, TAO Yunqi, XU Jiang, et al. Simulation of coal and gas outburst with different gas pressure[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(3): 82 - 86.(in Chinese))
- [8] BODZIONY J, NELICKI A, TOPOLNICKI J. Results of laboratory investigations of gas and coal outbursts[J]. Archives of Mining Sciences, 1989, 94(3): 581 - 591.
- [9] 吴鑫, 隆泗. 不同煤粒级配比下的煤与瓦斯突出试验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(12): 16 - 20.(WU Xin, LONG Si. Experimental study on the influence of coal particle size on coal and gas outburst[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(12): 16 - 20.(in Chinese))
- [10] 韦纯福, 李化敏, 袁瑞甫. 含水率对煤与瓦斯突出强度影响的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 118 - 121.(WEI Chunfu, LI Huamin, YUAN Ruifu. Experimental study on intensity of coal and gas outburst effected by coal water content[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 118 - 121.(in Chinese))
- [11] 蔡成功. 煤与瓦斯突出三维模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 66 - 69.(CAI Chengong. Experimental study on 3D simulation of coal and gas outbursts[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1): 66 - 69.(in Chinese))
- [12] 许江, 陶云奇, 尹光志, 等. 煤与瓦斯突出模拟试验台的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2 354 - 2 462.(XU Jiang, TAO Yunqi, YIN Guangzhi, et al. Development and application of coal and gas outburst simulation test device[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2 354 - 2 462.(in Chinese))
- [13] 许江, 陶云奇, 尹光志, 等. 煤与瓦斯突出模拟试验台的改进与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1 804 - 1 809.(XU Jiang, TAO Yunqi, YIN Guangzhi, et al. Amelioration and application of coal and gas outburst simulation experiment device[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(9): 1 804 - 1 809.(in Chinese))
- [14] 许江, 刘东, 彭守建, 等. 不同突出口径下煤与瓦斯突出模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 9 - 14.(XU Jiang, LIU Dong, PENG Shoujian, et al. Coal and gas outburst analogous test under the different diameter of exposed coal seam surface[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 9 - 14.(in Chinese))
- [15] 颜爱华, 徐涛. 煤与瓦斯突出的物理模拟和数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(9): 37 - 42.(YAN Aihua, XU Tao. Laboratory experiments and numerical simulation on coal and gas outbursts[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(9): 37 - 42.(in Chinese))
- [16] 袁瑞甫, 李怀珍. 含瓦斯煤动态破坏模拟试验设备的研制与应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增1): 117 - 123.(YUAN Ruifu, LI Huaizhen. Development and application of simulation test apparatus for gassy coal dynamic failure[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(Supp.1): 117 - 123.(in Chinese))
- [17] 王刚, 程伟民, 张清涛, 等. 石门揭煤突出模拟试验台的设计与应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1 202 - 1 210.(WANG Gang, CHENG Weimin, ZHANG Qingtao, et al. Design of simulation experiment and its application system of outburst in uncovering coal seam in cross-cut[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1 202 - 1 210.(in Chinese))
- [18] 赵志刚, 谭云亮, 程国强. 煤巷掘进迎头煤与瓦斯突出的突变机制分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1 644 - 1 648.(ZHAO Zhigang, TAN Yunliang, CHENG Guoqiang. Catastrophe mechanism analysis of coal and gas outburst in coal heading face[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1 644 - 1 648.(in Chinese))
- [19] 易俊, 姜永东, 鲜学福. 应力场、温度场瓦斯渗流特性试验研究[J]. 中国矿业, 2007, 16(5): 113 - 116.(YI Jun, JIANG Yongdong, XIAN Xuefu. An experimental research on the characters of methane seepage in stress field and temperature field[J]. China Mining Magazine, 2007, 16(5): 113 - 116.(in Chinese))
- [20] 杨森林. 深部矿井不同采深煤与瓦斯突出试验与数值模拟研究[硕士学位论文][D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012.(YANG Senlin. Experimental and numerical simulation study on coal and gas outburst in deep mine based on different depth[M. S. Thesis][D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2012.(in Chinese))
- [21] 唐巨鹏, 潘一山, 杨森林. 三维应力下煤与瓦斯突出模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 960 - 965.(TANG Jupeng, PAN Yishan, YANG Senlin. Experimental study of coal and gas outbursts under tridimensional stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 960 - 965.(in Chinese))
- [22] 唐巨鹏. 煤层气赋存运移的核磁共振成像理论和试验研究[博士学位论文][D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.(TANG Jupeng. Theoretical and experimental research of storage and transport of coalbed methane by NMR technique[Ph. D. Thesis][D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2006.(in Chinese))
- [23] 蒋承林. 煤壁突出孔洞的形成机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 225 - 228.(JIANG Chenlin. Study on forming mechanism of coal outburst hole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 225 - 228.(in Chinese))
- [24] 胡千庭. 煤与瓦斯突出的力学作用机制[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 44 - 69.(HU Qianting. Mechanical mechanism of coal and gas outburst[M]. Beijing: Science Press, 2013: 44 - 69.(in Chinese))