

# 判断煤与瓦斯突出危险性的三维模型

陈力, 乔继延, 丁雁生

(中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室 北京 100190)

**摘要:** 根据有效应力原理, 建立瓦斯压力和煤体变形之间的耦合关系。在地应力和瓦斯压力的共同作用下, 煤体发生弹脆性破坏, 之后发展为层裂-粉化破坏, 据此判断发生煤与瓦斯突出的危险性。数值模拟一维煤激波管瓦斯突出实验, 与实验基本吻合, 证实了三维模型的可靠性。

**关键词:** 煤与瓦斯突出, 有效应力, 弹脆性, 层裂-粉化

## 引言

煤与瓦斯突出, 是煤矿井下最严重的灾害之一, 严重威胁井下生产安全。在发生突出时, 工作面的大量破碎的煤和瓦斯突然向巷道喷出, 掩埋人员和机械, 毁坏通风系统, 具有极大的破坏性。

文献<sup>[1][2]</sup>在煤激波管突出模拟实验中观察到, 在一定的有效应力作用下, 煤体产生拉伸破坏, 发现瓦斯突出特有的破坏形式, 即层裂和粉化。胡千庭、文光才在专著<sup>[3]</sup>中介绍, Yartsev<sup>1958</sup>、Ujihira<sup>1975,1985</sup>、Gawor<sup>1991</sup>等在瓦斯突出物理模拟实验中也曾观测到层裂现象。文献<sup>[4][5]</sup>采用两相流间断模型, 文献<sup>[6]</sup>采用混相间断模型, 说明含瓦斯煤在有效应力控制下的卸压破坏, 是煤与瓦斯突出最核心的问题。文献<sup>[7]</sup>提出煤与瓦斯突出属于渗透性失稳的观点, 文献<sup>[8]</sup>根据工作面瓦斯涌出的变化规律, 用股市K线图理论预报突出。此外, 文献<sup>[9]</sup>最早提出流变假说, 提出了含瓦斯煤样蠕变行为的数学模型。文献<sup>[10]</sup>考虑瓦斯解吸的两种模式, 建立了非均匀煤-瓦斯混合物在巷道内的非定常流动方程组, 并得到其数值解。文献<sup>[11]</sup>通过室内瓦斯突出模拟实验, 研究了瓦斯的吸附特征对于突出启动的影响。

目前, 考虑地应力、瓦斯压力和煤体性质三个方面作用的综合说已经成为关于突出机理的共识<sup>[12][13][14][15]</sup>。

本文参照文献<sup>[5][6]</sup>的一维模型, 建立判断煤与瓦斯突出危险性的三维模型。实际突出是三维的, 比一维模型复杂。它的“复杂”不是基本机理比一维突出更复杂, 而是影响因素多, 很多参数的取值都不清楚。瓦斯突出机理的核心问题是煤岩体的持续破坏, 其机制是瓦斯渗流与煤岩体破坏的耦合, 就此而言, 一维和三维相同。一维模型虽然能够反映瓦斯渗流与煤岩体破坏的耦合, 易于说明煤岩体持续破坏的基本机制, 利于认识瓦斯突出的基本机理, 但不易反映地应力的贡献和突出孕育演化阶段的损伤破坏。

突出可以分为两个阶段, 即煤体破坏的孕育演化阶段和煤体连同大量瓦斯抛出的阶段。在孕育演化阶段, 煤体由于拉伸或者剪切作用, 开始局部损伤破坏并且不断扩展; 在抛出阶段, 已损伤的煤体层裂、粉化并和瓦斯形成固-气两相流动。

当瓦斯压力梯度足够陡时, 强渗流导致多孔介质拉伸破坏, 即层裂。由即将层裂面到已层裂阵面间的瓦斯压力差, 恰好等于煤层抗拉强度和阻力的和。

拉裂后高压瓦斯膨胀释能导致煤岩体迅速粉化抛出, 发生瓦斯突出。这里有两个反向推进的间断, 一个是向煤体深部推进的拉伸强间断-层裂粉化阵面, 另一个是向巷道空间推进的空气压缩波。拉伸间断持续向煤体深部推进, 使得煤岩瓦斯源源不断地抛出。

瓦斯主导的层裂和粉化, 是瓦斯突出区别于冲击地压(即岩爆), 区别于一般岩石破坏(拉伸破坏、压剪破坏、断裂、流变等)的特征现象。

本文未做两相流动方面的探讨, 只关注煤体破坏的孕育演化和层裂, 对煤体粉化及两相流做近似分析, 从而判断突出的危险性。本文经过简化和近似, 认为煤体服从弹性平衡方程, 瓦斯渗流服从Darcy定律。引入有效应力描述煤体的变形, 引入表观渗流速度描述瓦斯压力, 通过有效应力建立固体和流体之间的耦合关系, 实现两相间的相互作用。同时, 考虑了煤体性质在空间的细观非均匀性。数值计算采用有限元语言<sup>[16]</sup>编程。

## 1 模型描述

### 1.1 煤体内部的瓦斯渗流基本方程

$$\text{运动方程: } v_i = -\frac{1}{\eta} k_{ij} p_{,j} \quad i, j = 1, 2, 3$$

连续方程:  $\frac{\partial \phi \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v_i) = G \quad i = 1, 2, 3$

状态方程:  $\rho = \frac{\rho_a}{p_a} p$

煤体内的瓦斯吸附源项:  $G = -\frac{Sab}{(1+bp)^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}$

式中,  $v_i$  为煤体内瓦斯的表观渗流速度,  $\eta$  为瓦斯的动力粘性系数,  $k_{ij}$  为煤体的渗透率,  $p$  为煤体内的瓦斯压力,  $\phi$  为煤体的孔隙率,  $\rho$  为煤体内的瓦斯密度,  $\rho_a$  为标准状态下的瓦斯密度,  $p_a$  为标准大气压,  $Sa$ ,  $b$  均为煤体的瓦斯吸附常数。

### 1.2 含气煤体介质的弹性运动方程

有效应力表达式  $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + \alpha \delta_{ij} p$

有效应力—应变关系  $\sigma'_{ij} = \lambda \varepsilon_v \delta_{ij} + \mu \gamma_{ij}$

应变和位移关系  $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad \gamma_{ij} = u_{i,j} - u_{j,i} \quad \varepsilon_v = \varepsilon_{ii} = u_{i,i}$

运动方程  $\sigma'_{ij,j} - \alpha \delta_{ij} p_{,j} = 0$

式中,  $\sigma_{ij}$  为总应力, 以拉应力为正,  $\sigma'_{ij}$  为有效应力,  $\alpha$  为有效应力系数,  $\lambda$ ,  $\mu$  为拉梅常数,  $u_i$  为固相位移。

### 1.3 煤体的破坏条件

对判断瓦斯突出危险性而言, 煤体的破坏有两个方面的含义:

(1) 煤体细观单元发生拉伸或者剪切破坏, 即  $\sigma'_1 \geq \sigma_t$  或者  $\tau_{\max} \geq \tau_s$ ,  $\sigma_t$  和  $\tau_s$  为煤体拉伸和剪切强度。这里的破坏指的是细观单元的弹脆性破坏, 也称一次破坏;

(2) 煤激波管实验发现, 一次破坏后, 在瓦斯压力梯度  $|\nabla p|$  比较大的地方, 煤体发生层裂随即粉化, 层裂粉化阵面 (简称破坏阵面) 持续向煤体深部推进。由于渗流的作用, 瓦斯压力梯度  $|\nabla p|$  逐渐变小, 当  $|\nabla p|$  小于一定值时, 破坏阵面才停止推进。

实验示意图如图 1 所示:

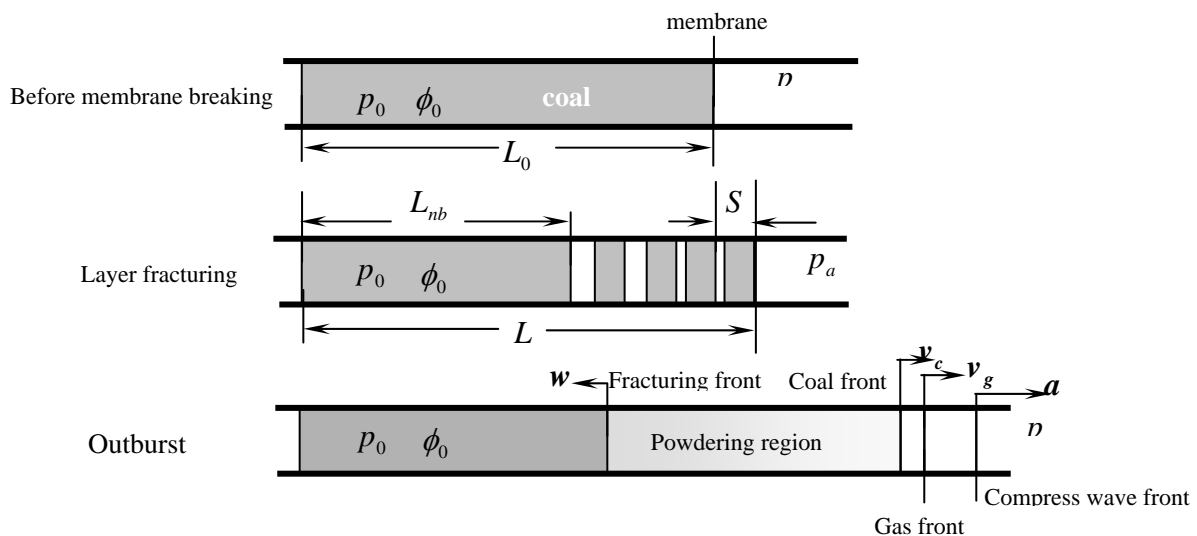


图 1 煤激波管模拟实验示意图

Fig.1 The sketch of coal shockwave-pipe experiment

图 1 中,  $\phi_0$  为煤样初始孔隙率, 煤中初始孔隙压力  $p_0$  大于大气压力  $p_a$ 。改变煤的强度和初始孔隙压

力, 做多组实验。破膜后会观察到煤体产生破坏。在压差  $p_0 - p_a$  不太高时, 煤样呈层状开裂 (称为层裂), 裂片向外滑移一段距离, 随后停止; 在压差  $p_0 - p_a$  比较高时, 破坏阵面以一定速度  $w$  向煤样深部推进, 破碎煤粉则反向抛出 (称为粉化), 破坏阵面的推进可视为恒稳推进现象。图中  $a$  是空气声速,  $v_g$  和  $v_c$  分别是瓦斯和煤粉前沿的速度。

层裂或者粉化, 是瓦斯突出特有的破坏现象, 称为二次破坏。随着煤体产生新的层裂或者层裂粉化区域,  $|\nabla p|$  极值带向煤体深部推进, 进而重复两类破坏过程。

严格处理层裂和粉化, 必须考虑煤体的惯性运动和气固两相流动, 是一个比较复杂的问题。本文以简化的方法, 近似确定  $|\nabla p|$  极值带的位置和瓦斯压力陡降的幅值, 具体的做法是: 在  $|\nabla p|$  极值带 (满足条件  $|\nabla p| \cdot \Delta x / \sigma_i^* \geq 1$ , 因一次破坏后煤体的强度降低, 所以令  $\sigma_i^* = \sigma_i / n$  为层裂粉化阈值) 的邻域内, 粉化后的瓦斯压力陡降的幅值为  $(\Delta p)^* = \gamma \cdot \Delta x \cdot |\nabla p|$ , 陡降后的破坏阵面后瓦斯压力为  $p_1 - (\Delta p)^*$ , 如果  $p_1 \leq (\Delta p)^*$ , 那么瓦斯压力则降为一个大气压力  $p_a$ 。在表达式中,  $\Delta x$  是单元的尺度,  $p_1$  是陡降前的瓦斯压力, 参数  $n$  和  $\gamma$  是经验系数。

#### 1.4 地应力和瓦斯压力耦合的实现

在基本方程中, 瓦斯压力  $p$  取决于瓦斯渗流并且随时间变化, 有效应力  $\sigma'_{ij}$  依赖于煤体的变形和平衡。当某处的单元破坏后, 渗透率增大 (称为渗流强化), 弹性模量减小 (称为模量弱化), 瓦斯压力重新分布, 由于有效应力  $\sigma'_{ij}$  表达式中包含瓦斯压力, 因此煤体的变形和平衡也重新分布。这样, 固体场和流体场通过有效应力建立耦合关系。

##### 1.4.1 煤体破坏后的模量弱化

参照唐春安等的研究成果<sup>[17][18]</sup>, 煤体发生拉伸或者剪切破坏时, 细观单元发生弹脆性破坏。采用等效的方法, 发生弹脆性破坏时, 煤体仍为各向同性线弹性材料, 但是刚度特性退化。本文的处理方法是, 泊松比  $\nu$  不变, 弹性模量折减为  $E^* = E / r_e$ , 式中  $r_e$  为大于 1 的经验常数。这种等效方法的力学意义是, 由于破坏, 在一定的应力下, 煤体的变形增大了。

##### 1.4.2 煤体破坏后的渗流强化

在瓦斯渗流的基本方程中, 渗透率  $k_{ij}$  是各向异性渗流的普遍表达式<sup>[19]</sup>。在本文的模型中, 采用各向同性渗透模型, 即煤体破坏前的渗透率为  $k_{ij} = k_0 \mathbf{I}$ , 式中  $\mathbf{I}$  是单位张量; 煤体发生破坏后, 渗透率张量变为  $k_{ij} = k^* \mathbf{I}$ 。其中  $k^* = k_0 \cdot r_k$ ,  $r_k$  为大于 1 的系数。

##### 1.4.3 孔隙率的变化

忽略煤体颗粒本身的变形, 孔隙率的变化等于有效应力产生的体积应变的变化。

#### 1.5 材料的细观非均匀性

细观物质单元的杨氏模量  $E$ 、抗剪强度  $\tau_s$ 、抗拉强度  $\sigma_t$  和渗透率  $k_0$  是随机变量, 均服从威布尔分布<sup>[20]</sup>。其分布密度函数表示为

$$p_w(x) = \begin{cases} \frac{m}{\eta_w} \left( \frac{x - \gamma}{\eta_w} \right)^{m-1} e^{-\left( \frac{x - \gamma}{\eta_w} \right)^m} & x \geq \gamma \\ 0 & x < \gamma \end{cases}$$

式中,  $x$  为煤体某力学性质的参数,  $\gamma$  为  $x$  的最小值,  $\eta_w$  为  $x$  的无量纲化特征值,  $m > 0$ , 是代表散布程度的参数。

## 2 一维煤与瓦斯突出破坏阵面的稳恒推进现象的数值计算

以有限元程序数值模拟由文献<sup>[2]</sup>提供的实验。实验前, 将煤试样以一定的压制力压入圆管中, 用铝箔将圆管分隔成高压瓦斯区和普通大气压力区。当铝箔破裂后, 观察煤试样的突出现象, 几何模型如图

2所示。

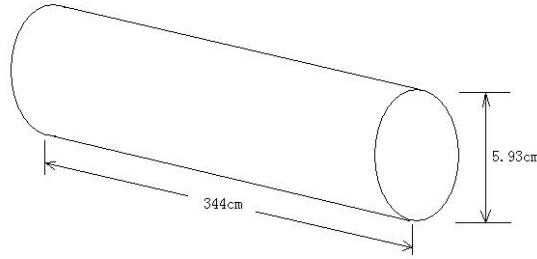


图2 一维恒稳推进实验的几何模型

Fig.2 Model of one-dimensional constant advance experiment

实验数据见表1。其中， $p_0 - p_a$ 为初始瓦斯压力， $\rho_{c0}$ 为煤样初始密度， $\phi_0$ 为初始孔隙率， $x_0$ 为第一测压孔到煤样端面距离， $w$ 为恒稳突出时破坏阵面推进速度。

表 1 一维恒稳推进实验数据

Table 1 Parameters of one-dimension constant advance experiments

No.	$p_0 - p_a$ (kPa)	$\rho_{c0}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\phi_0$	$x_0$ (cm)	Results
940310a	59.1	0.931	0.392	2.6	w = 5 ~ 6m/s

计算参数如下：弹性模量均值  $E = 1.0 \times 10^8 Pa$ ，弹性模量最小值  $E = 1.0 \times 10^7 Pa$ ；抗拉强度均值  $\sigma_t = 8.0 \times 10^3 Pa$ ，抗拉强度最小值  $\sigma_t = 8.0 \times 10^2 Pa$ ；弹性模量和抗拉强度的不均匀系数  $m = 20$ ，煤体泊松比  $\nu = 0.25$ ；渗透系数  $k_0 = 7.62 \times 10^{-13} m^2$ ，管壁摩擦力  $\tau_0 = 0.021 MPa$ 。

由数值计算得到的不同时刻瓦斯压力的空间分布如图 3 所示，图中纵轴为瓦斯超压，单位为  $Pa$ ，横轴为无量纲距离，单位长度取为  $l_0 = 0.0526m$ ，曲线从右至左对应的时刻依次为 1、16、32.....144 倍  $\Delta t$ ， $\Delta t = 0.00016T_c$ ， $T_c$ 为渗流特征时间，取  $T_c = 2.41s$ 。图 3 清晰地模拟出破坏阵面的恒稳推进现象，破坏区的瓦斯压力降到稳定的接近大气压力的数值，这样，破坏阵面的压力梯度能够保持比较大的值，从而使恒稳推进能够维持。

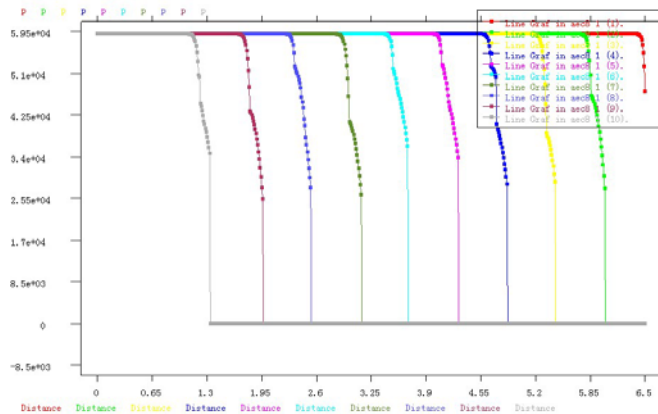


图 3 不同时刻的瓦斯压力在空间的分布

Fig.3 Space distribution of gas pressure for different time

破坏阵面的速度随时间的变化如图 4 所示。由于在铝箔刚破裂时，圆管端部的压力存在强间断，圆管内压力为  $p_0$ ，而端部压力突然转变为一个大气压  $p_a$ ，因此在数值计算的初始时间段里破坏阵面的速度出现振荡。当计算稳定后，得到稳定的推进速度为  $w=5-6\text{m/s}$ ，与实验结果吻合的很好。

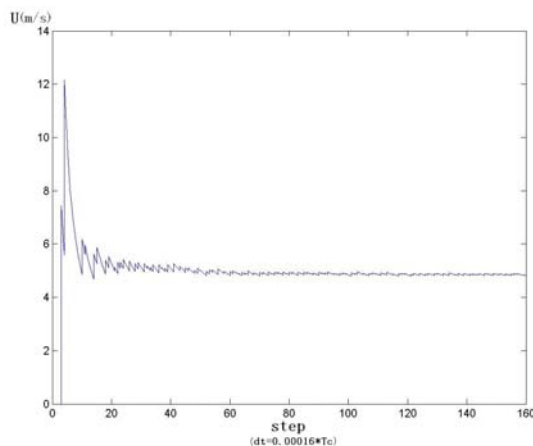


图 4 不同时刻的破坏阵面推进速度

Fig.4 Damage advance velocity for different time

### 3 结论

依据建立的判断瓦斯突出危险性的三维流固耦合模型，数值计算与一维瓦斯突出实验基本吻合，证实了考虑层裂-粉化的三维模型的合理性，为发展接近实际的三维瓦斯突出模型迈出切实的一步。

### 参考文献

- 1 丁晓良. 煤在瓦斯渗流作用下破坏及其持续扩展的机制.[博士学位]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1988( Ding Xiaoliang. Damage and sustained growth mechanism of coal under gas seepage loading.[PhD Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, 1988(in Chinese)).
- 2 陈力. 一维煤与瓦斯突出中破坏阵面恒稳推进的实验研究.[硕士学位论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1989( Chen Li. Experiment study of failure surface constant advance in one dimensional coal and gas outburst[Master Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, 1989(in Chinese)).
- 3 胡千庭, 文光才. 煤与瓦斯突出的力学作用机理. 北京: 科学出版社, 2013(Hu Qianting, Wen Guangcai. Mechanical mechanism of coal and gas outburst. Beijing: Science Publishing House, 2013(in Chinese)).
- 4 丁晓良, 俞善炳, 丁雁生, 寇绍全, 谈庆明, 郑哲敏. 煤在瓦斯渗流作用下持续破坏的机制. 中国科学(A辑), 1989, 18(6): 582-607( Ding Xiaoliang, Yu Shanbin, Ding Yansheng, Kou Shaoquan, Tan Qingming, Zheng Zhemin. Sustained damage mechanism of coal under gas seepage loading. Science in China, Ser.A, 1989, 18(6): 582-607(in Chinese)).
- 5 郑哲敏, 陈力, 丁雁生. 一维瓦斯突出破碎阵面的恒稳推进. 中国科学(A辑), 1993, 23(4): 377-384(Zheng Zhemin, Chen Li, Ding Yansheng. Constant advance of failure surface in one dimensional coal and gas outburst[J]. Science in China, Ser.A, 1993, 23(4): 377-384(in Chinese)).
- 6 俞善炳, 郑哲敏, 谈庆明, 丁雁生. 含气多孔介质的卸压破坏及突出的极强破坏准则. 力学学报, 1997, 29(6): 641-646(Yu Shanbing, Cheng Chemin, Tan Qingming, Ding Yansheng. Damage of porous media containing pressurized gas by unloading and the maximum damage principle for critical outburst. Acta Mechanica Sinica, 1997, 29(6): 641-646(in Chinese)).
- 7 谢焰, 陈萍. 煤与瓦斯突出的渗透性失稳机理分析. 煤炭科学技术, 2011, 39(3): 63-66(Xie Yan, Chen Ping. Analysis on penetration stability lost mechanism of coal and gas outburst. Coal Science and Technology. 2011, 39(3): 63-66(in Chinese)).
- 8 邓明, 张国枢, 陈清华. 基于瓦斯涌出时间序列的煤与瓦斯突出预报. 煤炭学报, 2010, 35(2): 260-263(Deng Ming, Zhang Guoshu, Chen Qinghua. Forecast of coal and gas outburst based on time series of gas concentration. Journal of China Coal Society. 2010, 35(2): 260-263(in Chinese)).
- 9 周世宁, 何学秋. 煤和瓦斯突出机理的流变假说. 中国矿业大学学报, 1990, 19(2): 1-8 (Zhou Shining, He Xueqiu. Rheological hypothesis of coal and methane outburst mechanism. Journal of China University of Mining & Technology, 1990, Vol.19, No.2: 1-8(in Chinese)).
- 10 I.A.Fedorchenko, A.V.Fedorov. Gas-dynamic stage of the coal and gas outburst with allowance for desorption. Journal of Mining Science, 2012, Vol.48, No.1: 15-26.
- 11 Jacek Sobczyk. The influence of sorption processes on gas stresses leading to the coal and gas outburst in the laboratory conditions. Fuel, 2011, Vol.90: 1018-1023.
- 12 林柏泉. 矿井瓦斯防治理论与技术. 北京: 中国矿业大学出版社, 2010(Lin Baiquan. Theory and Technology of Gas Prevention and Cure in Coal Mine. Beijing: China University of Mining and Technology Publishing House, 2010(in Chinese)).
- 13 文畅平. 隧道瓦斯突出危险性评价的属性识别模型与实例. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1322-1328(Wen Changping. Attribute recognition model and its application of fatalness assessment of gas burst in tunnel. Journal of China Coal Society. 2011, 36(8): 1322-1328(in Chinese)).
- 14 李祥春, 聂百胜, 王龙康, 戴林超, 刘桢. 多场耦合作用下煤与瓦斯突出机理分析. 煤炭科学技术, 2011, 39(5): 64-69(Li Xiangchun, Nie Baisheng, Wang Longkang, Dai Linchao, Liu Zhen. Analysis on coal and gas outburst mechanism under multi field coupling action. Coal Science and Technology. 2011, 39(5): 64-69(in Chinese)).
- 15 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术. 北京: 中国矿业大学出版社, 1998(Jiang Chenglin, Yu Qixiang. Sphere instability mechanism and prevention technology of coal and gas outburst. Beijing: China University of Mining & Technology Publishing Press, 1998 (in Chinese)).
- 16 梁国平. 有限元语言. 北京: 科学出版社, 2009(Liang Guoping. Finite Element Language. Beijing: China Science Publishing House, 2009(in Chinese)).
- 17 唐春安. 脆性材料破坏过程分析的数值试验方法. 力学与实践, 1999, 21(2): 21-24(Tang Chunan. Numerical tests of progressive failure in brittle materials. Mechanics in Engineering, 1999, 21(2): 21-24(in Chinese)).

18 于庆磊, 杨天鸿, 唐春安, 梁正召, 张永彬, 郑超. 基于真实细观结构的准脆性材料三维建模及应用初探. 计算力学学报, 2010,27(5):887-894(Yu Qinglei, Yang Tianhong, Tang Chunan, Liang Zhengzhao, Zhang Yongbin, Zheng Chao. Actual meso-structure based three-dimensional modeling method for quasi-brittle material and its primary application. Chinese Journal of Computational Mechanism. 2010,27(5):887-894(in Chinese)).

19 孔祥言. 高等渗流力学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999(Kong Xiangyan. Advanced Mechanics of Fluid in Porous Media. Hefei: University of Science and Technology Publishing House, 1999(in Chinese)).

20 白以龙. 工程结构损伤的两个重要科学问题—分布式损伤和尺度效应. 华南理工大学学报, 2002, 30 (11): 11-14(Bai Yilong. Two important scientific problems in engineering structures – distributed damages and scale effect. Journal of South China University of Technology(Natural Science), 2002, 30 (11): 11-14(in Chinese)).

## **The Three-dimensional model for estimating danger of coal and gas outburst**

CHEN Li, QIAO Jiyan, DING Yansheng

*(Key Laboratory for Mechanics in Fluid and Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)*

**Abstract:** Coupling relationship between gas pressure and coal deformation is achieved based on principle of effective stress. By joint affection of crustal stress and gas pressure, the coal turns to elastic-brittle damage and then to layer fractured-powdering damage, accordingly danger of coal and gas outburst is estimated. Then the three-dimensional model is validated by the fact that, numerical simulation result is approximately accordance with the outburst experiment via coal shockwave tube.

**Keywords:** coal and gas outburst; effective stress; elastic-brittle; layered fracture-powdering.