

判断煤与瓦斯突出危险性的三维模型

陈 力¹⁾ 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, 煤体发生弹性脆性破坏, 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. 根据一维煤激波管瓦斯突出实验, 结合一维混相流动模型, 进行了数值验证, 证实了模型的可靠性.

关键词 有效应力, 弹性脆性, 层裂-粉化, 混相模型

中图分类号: X45 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-13-392

THREE-DIMENSIONAL MODEL FOR ESTIMATING COAL AND GAS OUTBURST

CHEN Li¹⁾ QIAO Jiyan DING Yansheng

(Key Laboratory for Mechanics in Fluid and Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract A coupling relationship between the gas pressure and the coal deformation is obtained based on the principle of effective stress. Under joint actions of the crustal stress and the gas pressure, in the coal there will be elastic-brittle damages and layer fractured-powdering damages, accordingly, and the danger of coal and gas outburst is estimated. A three-dimensional model is validated by the numerical simulation result, which is approximately in agreement with the outburst experiment in the coal shockwave tube.

Key words effective stress, elastic-brittle, layered fracture-powdering, mixed phase model

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 [1-2] 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. 胡千庭等^[3] 在专著中介绍, 不少研究人员在瓦斯突出物理模拟实验中也曾观测到层裂现象. 文献 [4-5] 采用两相流间断模型, 文献 [6] 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.

目前, 考虑地应力、瓦斯压力和煤体性质 3 个方面作用的综合说已经成为关于突出机理的共识^[7-11].

本文参照文献 [5-6] 的一维模型, 建立判断煤与

瓦斯突出危险性的三维模型.

本文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. 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.

1 模型描述

1.1 煤体内部的瓦斯渗流基本方程

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

2013-09-29 收到第 1 稿, 2014-02-20 收到修改稿.

1) E-mail: chenli@imech.ac.cn

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

$$\text{状态方程 } \rho = \frac{\rho_a}{p_a} p$$

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

式中, v_i 为煤体内瓦斯的表观渗流速度, η 为瓦斯的动力黏性系数, k_{ij} 为煤体的渗透率, p 为煤体内的瓦斯压力, ϕ 为煤体的孔隙率, ρ 为煤体内的瓦斯密度, ρ_a 为参考状态下的瓦斯密度, p_a 为参考大气压, S 为煤体的比表面积, a 和 b 为瓦斯吸附常数.

1.2 含气煤体介质的弹性运动方程

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

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

应变和位移关系

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i})$$

$$\gamma_{ij} = u_{i,j} - u_{j,i}, \quad \varepsilon_V = \varepsilon_{ii} = u_{i,i}$$

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

式中, σ_{ij} 为总应力, 以拉应力为正, σ'_{ij} 为有效应力, α 为有效应力系数, δ_{ij} 为 Kronecker 符号, λ , μ 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, 即有效拉应力 $\sigma'_1 \geq \sigma_t$ 或者最大剪应力 $\tau_{\max} \geq \tau_s$, σ_t 和 τ_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.

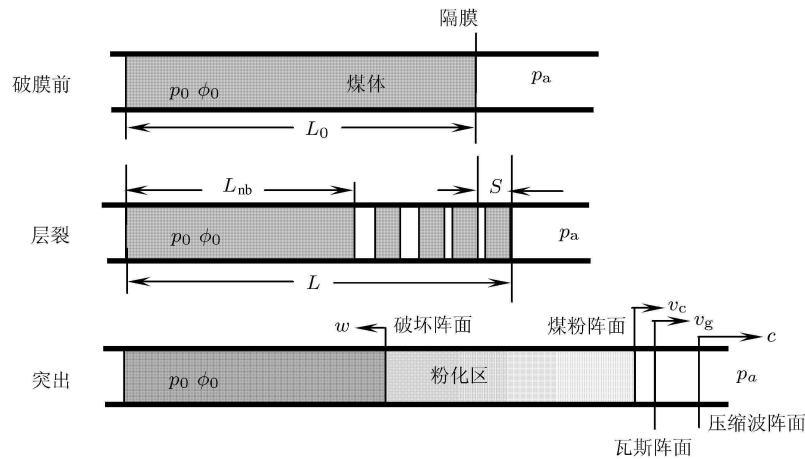


图 1 煤激波管模拟实验示意图

图 1 中, ϕ_0 为煤样初始孔隙率, L_0 为煤样初始长度, 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, L 为煤样破坏后的长度, L_{nb} 为未破坏的长度; 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 c 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.

1.4 地应力和瓦斯压力的耦合

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 σ'_{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 (渗流强化), 弹性模量减小 (模量弱化), 瓦斯压力重新分布, 由于有效应力 σ'_{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。

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 的经验常数。

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 [12], 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。具体的处理方法是,泊松比 ν 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。

另外,模型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;细观物质单元的杨氏模量 E 、抗剪强度 τ_s 、抗拉强度 σ_t 和渗透率 k_0 均为随机变量,服从威布尔分布 [13]。

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 [2] 提供的实验,以期验证模型的有效性。

2.1 实验简述和计算参数

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。

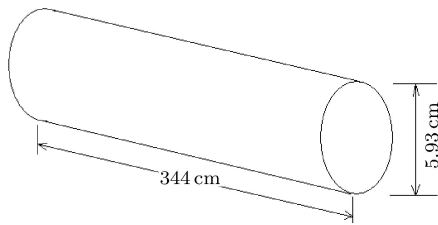


图 2 一维恒稳推进实验的几何模型

实验数据见表 1。其中, $(p_0 - p_a)$ 为初始瓦斯压力, ρ_{c0} 为煤样初始密度, ϕ_0 为初始孔隙率, w 为恒稳突出时破坏阵面推进速度,明显低于煤层声速。

计算参数如下:弹性模量均值 $E = 100 \text{ MPa}$,

表 1 一维恒稳推进实验数据

实验编号	初始瓦斯压力 $(p_0 - p_a) / \text{Pa}$	初始密度 $\rho_{c0} / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙率	阵面推进速度 $w / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
940310a	5.90×10^5	0.93×10^3	0.39	20 ~ 30

弹性模量最小值 $E = 10 \text{ MPa}$;抗拉强度均值 $\sigma_t = 8.0 \text{ kPa}$, 抗拉强度最小值 $\sigma_t = 800 \text{ Pa}$;弹性模量和抗拉强度的威布尔分布不均匀系数为 20.0,煤体泊松比 $\nu = 0.25$;渗透系数 $k_0 = 7.62 \times 10^{-13} \text{ m}^2$,管壁摩擦力 $\tau_0 = 21 \text{ kPa}$ 。

2.2 一维恒稳推进的混相模型

根据郑哲敏等 [5] 1993 年发表的考虑渗流破坏、两相流动和空气压缩波的一维恒稳推进模型,俞善炳等 [6] 1997 年发表的考虑气固混相流动的强间断模型,本文综合考虑渗流破坏、混相流动强间断和空气压缩波,提出了一个关于一维煤与瓦斯突出恒稳推进的模型。

对于煤粉-瓦斯混合物,描述其速度 \bar{u} 和压力 \bar{p} 的基本方程如下。

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}}{\partial x} = 0$$

$$\text{运动方程: } \bar{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = 0$$

式中 $\bar{\rho} = (1 - \phi) \rho_s + \phi \rho$, 为混相流体密度; ρ_s 为煤体颗粒密度; 气体密度 ρ 的变化由等温假设确定。

由声学近似描述巷道内空气压力的变化

$$\bar{p}_2 = p_a + \rho_a c_a \bar{u}_2$$

式中 c_a 为标准状态下的声速, \bar{u}_2 为煤粉-瓦斯混合物的速度。

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,清晰地模拟出一维破坏阵面的恒稳推进现象。图中纵轴为瓦斯超压,横轴为距离, dt 表示瓦斯压力陡降(破坏阵面)推进的时间间隔, dx 为空间间隔, $w = dx/dt$ 为破坏阵面推进的速度。

计算结果与表 1 中的实验数据符合较好。

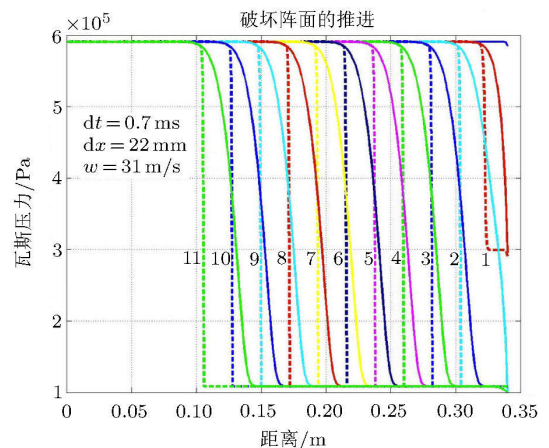


图 3 不同时刻的瓦斯压力在空间的分布

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. [博士学位论文]. 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
- 4 丁晓良, 俞善炳, 丁雁生等. 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 Shanbing, Ding Yansheng, et al. 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. *Science in China (Ser. A)*, 1993, 23(4): 377-384 (in Chinese))
- 6 俞善炳, 郑哲敏, 谈庆明等. 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, Zheng Zhemin, Tan Qingming, et al. 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 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
- 8 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 fatallness assessment of gas burst in tunnel. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(8): 1322-1328 (in Chinese))
- 9 李祥春, 聂百胜, 王龙康等. 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, et al. Analysis on coal and gas outburst mechanism under multi field coupling action. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(5): 64-69 (in Chinese))
- 10 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
- 11 卢平, 刘泽功, 廖光焯等. 高瓦斯综采面顶板覆岩卸压抽放瓦斯试验研究. 力学与实践, 2003, 25(4): 53-57 (Lu Ping, Liu Zegong, Liao Guangxuan, et al. Methane draining experimental research for the three-relief roof stratum of working face of high gas coal seam. *Mechanics in Engineering*, 2003, 25(4): 53-57 (in Chinese))
- 12 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 Chun'an. Numerical tests of progressive failure in brittle materials. *Mechanics in Engineering*, 1999, 21(2): 21-24 (in Chinese))
- 13 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))

(责任编辑: 刘希国)

(上接第 197 页)

- 2 王世文, 冯继玲, 杨兆建等. 弹性钢丝绳理论研究进展. 力学进展, 1999, 29(4): 486-500 (Wang Shiwen, Feng Jiling, Yang Zhaojian, et al. Research progress on elastic wire rope theories. *Advances in Mechanics*, 1999, 29(4): 486-500 (in Chinese))
- 3 薛伟, 张利顺, 张玉珊等. 钢丝绳弹性模量研究的现状与发展方向. 林业科技, 1996, 21(6): 55-57 (Xue Wei, Zhang Lishun, Zhang Yushan, et al. The current situation and development direction of the elastic modulus of the wire rope. *Forestry Science & Technology*, 1996, 21(6): 55-57 (in Chinese))
- 4 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. (GB/T 24191—2009/ISO 12076: 2002), 中华人民共和国国家标准 —— 钢丝绳实际弹性模量测定方法
- 5 扈英超. 线性振动. 北京: 高等教育出版社, 1983
- 6 刘鸿文. 材料力学. 北京: 高等教育出版社, 2004
- 7 刘习军, 贾启芬. 工程振动与测试技术. 天津: 天津大学出版社, 2005

(责任编辑: 刘希国)