

文章编号: 1000-7598 (2010) 01-0265-06

随机分布裂隙煤岩体模型及其应用

张春会¹, 于永江², 岳宏亮¹, 赵全胜¹

(1. 河北科技大学 建筑工程学院, 石家庄 050018; 2. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 煤层中随机裂隙展布模拟技术是瓦斯抽放数值模拟中的关键技术。利用 Monte-Carlo 模拟技术模拟实际煤岩裂隙的随机性, 建立了随机分布裂隙煤岩体模型, 并在 Matlab 平台下开发了二维随机裂隙煤岩体生成程序 RFSS^{2D}。在煤岩实测数据和统计分析的基础上, 利用编制的程序不仅能生成与实际煤岩具有相同统计分布裂隙网络的虚拟煤岩体, 而且能实现有限元网格自动剖分。以辽宁某瓦斯抽放试井作为数值算例, 依据实测和统计数据建立了随机裂隙分布的煤岩体模型, 模拟了瓦斯压和应力的演化规律, 结果表明, 与瓦斯抽放井连通的裂隙对瓦斯运移影响很大, 与瓦斯抽放井不连通的裂隙对瓦斯运移也有影响, 但影响有限。

关 键 词: 随机分布裂隙; Monte-Carlo 模拟; 煤岩体模型; 瓦斯渗流

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Model with random cleats distribution for coal seams and its application

ZHANG Chun-hui¹, YU Yong-jiang², YUE Hong-liang¹, ZHAO Quan-sheng¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

2. School of Mechanics and Science Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: How to simulate random distribution of cleats in coal rock is key technique for simulation of methane recovery. Monte Carlo simulation technique is adopted to simulate the randomness of cleats distribution; and the model with random cleats distribution for coal seams is presented. RFSS^{2D} (Random Fracture Simulation System in two dimensions) is developed with Matlab. Based on spot data for coal and their statistical analysis, not only the virtual fractured coal seams in which there is the same fractured statistical law with real engineering rock can be generated, but also FEM grid can be performed automatically by RFSS^{2D}. As a numerical case, a gas production well in Liaoning is studied with the model. According to spot and statistical data the model of random fractured coal is set up; and gas pressure and stress evolution are simulated. The results are as follows: Cleats which are connected with gas well greatly effect on gas flow; and cleats which are not connected with gas well finitely effect on gas flow.

Key words: random distributed cleats; Monte-Carlo simulation; model; gas flow

1 引 言

煤层瓦斯抽放利用技术已在我国逐步推广, 该技术既解决了煤层瓦斯排放污染环境和能源浪费问题, 又大幅度降低煤层瓦斯含量, 消除瓦斯突出和瓦斯爆炸的危险, 为我国煤炭资源安全生产和能源安全提供了保障^[1-2]。为了准确模拟煤岩内瓦斯渗流和煤岩应力的耦合过程, 常采用数值方法并已取得了一定的进展^[3-6]。与试验手段相比, 数值方法具有省时、省力和灵活的优势, 但若想取得理想效

果, 有效地模拟煤岩的力学特性极其关键。

煤岩是一种地质体, 是长期地质历史作用的产物, 在天然煤岩体中孕育了大量的断层、裂隙和节理, 这些结构弱面的存在对煤岩力学特性和渗流特性有极大的影响, 甚至控制着煤岩体的工程特性^[7]。因此, 如何模拟随机裂隙展布是瓦斯抽放数值模拟研究的关键技术。一些研究^[8-10]提出利用概率方法模拟岩体内的随机裂隙展布, 但将这种技术应用于瓦斯抽放数值模拟的实例研究尚未见有报道。赵阳升等为了模拟裂缝对瓦斯流动的影响, 将煤岩体视

收稿日期: 2009-02-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 50434020); 河北省科技支撑项目 (No. 07276947); 河北省教育厅项目 (No. Z2009315); 河北科技大学杰出引进人才项目; 河北科技大学校立基金和博士科研项目 (No. XL200835, No. QD200939)。

第一作者简介: 张春会, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 主要从事采矿岩体力学和环境岩土工程方面的研究。E-mail: zhangchunhui789@163.com

作由基质岩块和裂缝组成的双重介质,将基质岩块视作连续弹性介质,利用Goodman单元模拟裂缝,建立了块裂介质岩体变形与气体渗流的耦合数学模型^[11],并模拟了单裂隙对瓦斯抽放的影响,这一研究开创了考虑裂隙的煤层瓦斯抽放模拟。本文在其研究基础上考虑天然煤岩裂隙几何特征如走向、倾角、迹长、间距和裂隙宽度的随机性,利用Monte-Carlo模拟技术,建立了随机裂隙煤岩体地质模型,在Matlab平台上开发了二维裂隙网络自动生成系统RFSS^{2D}(two dimension random fracture simulation system)。在有限天然煤岩裂隙结构信息统计数据基础上,利用该系统不仅能生成与工程岩体具有相同统计分布的裂隙网络,而且能自动实现离散化过程,生成相应的有限元网格,从而可以直接利用有限元法解决实际的工程问题。本文数值算例中,首先依据天然煤岩裂隙结构信息统计数据生成了天然煤岩随机裂隙网络模型,然后将生成的模型导入到自行开发的瓦斯抽放模拟计算程序Coupling Analysis^[12]中,模拟了裂隙煤岩瓦斯的渗流过程。

2 随机裂隙分布煤岩体模型

天然煤岩体内的裂隙分布复杂,但可以利用概率和数理统计方法进行研究、模拟。利用概率方法模拟裂隙随机分布的一般过程为:首先,基于大量现场调查获得有限但具有充分代表性的地质测量数据;其次,利用统计方法进行分析,获得裂隙几何特性如走向、倾角、迹长、间距和裂隙宽度的分布规律;然后,利用 Monte-Carlo 模拟技术生成与现场随机裂隙网络具有相同统计规律的随机裂隙网络计算模型模拟真实的工程岩体;最后进行数值计算和工程分析。这种研究方法存在如下2个问题:①某些尺度的裂隙可能不存在统计分布规律或者模拟的随机裂隙网络与实际测量裂隙只是统计意义上的一致,这种模拟方法并不严密;②由于随机数生成的随机性使得这种方法生成的裂隙网络不具有精确的可重复性,然而在当前研究水平上这是一条合理、可行的方法。

本文基于Matlab平台,利用Monte-Carlo模拟技术开发了二维裂隙网络自动生成系统RFSS^{2D}。利用该系统和天然煤岩裂隙统计数据能生成含有随机裂隙网络的有限元计算模型。下文介绍RFSS^{2D}的主要技术。

2.1 RFSS^{2D}原理

实际裂隙形状复杂,为便于模拟,假设裂隙的几何特征为椭圆形,对于平面问题单条裂隙(即椭

圆)的控制参数有:形心(裂隙中心的位置),迹长(椭圆裂隙长轴长度),隙宽(椭圆裂隙短轴长度),倾角。

上述控制参数的统计分布规律可通过工程岩体现场调查得到,已有大量现场调查和统计分析表明^[13],形心服从研究域内的均匀分布;倾角通常服从正态分布或均匀分布;迹长或隙宽服从负指数分布或对数正态分布。而研究区域的裂隙条数依据其密度服从Poisson随机过程。

RFSS^{2D}生成煤岩体随机裂隙网络遵循如下步骤:①选取工程煤岩体的研究区域,按规程在其内选取代表性试验点,遵循规定的程序和方法对研究域内裂隙几何特征信息进行现场测量和调查;②利用统计方法对得到的裂隙几何特征信息测量数据进行分析,确定各裂隙几何信息的概率分析模型,同时利用数据拟合法确定模型参数;③基于确定的裂隙几何信息概率分析模型,利用Monte-Carlo模拟法生成与实测裂隙几何特征数据具有相同统计分布律的随机裂隙,并进行有效性检验。

基于以上分析,在Matlab的PDE工具箱前处理模块的基础上,开发了二维裂隙网络自动生成系统RFSS^{2D},实现了煤岩裂隙网络的自动生成。

2.2 煤岩体裂隙网络模型离散化方法

利用RFSS^{2D}系统,根据地质勘察资料统计结果生成与实际煤岩体具有相同统计规律随机裂隙展布的虚拟煤岩体。将生成的随机裂隙展布虚拟煤岩体转换成有限元模型是RFSS^{2D}系统应用于工程数值分析计算的重要环节。

在含裂隙煤岩应力-渗流耦合有限元模型中,一般将裂隙和基质岩块视作2类不同的单元加以处理^[11],而RFSS^{2D}系统在生成煤岩裂隙网络过程中已自动将煤岩块体和裂隙分成不同区域,因此,将RFSS^{2D}生成的煤岩体裂隙模型向有限元离散模型转换就是对煤岩体裂隙模型中的基质岩块区域和裂隙区域分别剖分有限元网格,然后赋以相应的材料特性。这一过程可利用Matlab中的PDE工具箱网格剖分函数pdemesh自动实现。

图1为利用RFSS^{2D}生成的煤岩体尺寸为8m×8m的单组断续、非填充裂隙,图2为其对应的有限元网格,图3为利用RFSS^{2D}生成的煤岩体尺寸为8m×8m的2组断续、非填充和填充混合裂隙,图4为对应的有限元网格,图5为利用RFSS^{2D}生成的煤岩体尺寸为8m×8m的随机断续、非填充和填充混合裂隙。图6为对应的有限元网格。

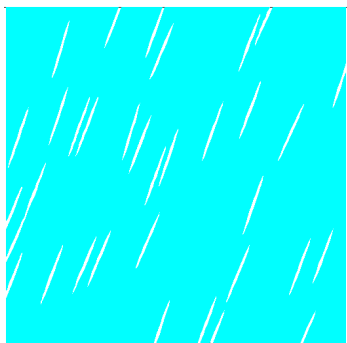


图 1 单组断续、非填充裂隙

Fig.1 Single set of discontinuous and nonfilled fracture

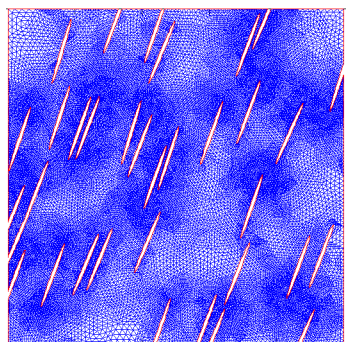


图 2 单组断续、非填充裂隙有限元网格

Fig.2 FEM grid of single set of discontinuous and nonfilled fracture

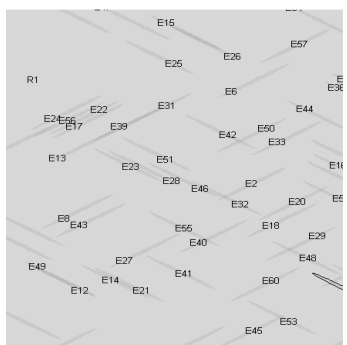


图 3 2组断续、非填充和填充混合裂隙

Fig.3 Double set of discontinuous and filled and nonfilled fractures

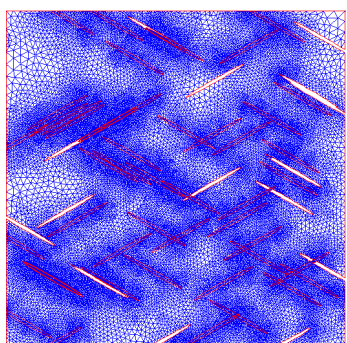


图 4 2组断续、非填充和填充混合裂隙有限元网格

Fig.4 FEM Grid of double set of filled and nonfilled and discontinuous fractures

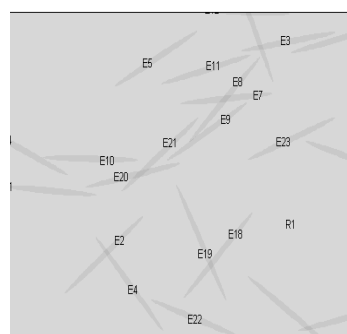


图 5 随机断续、非填充和填充混合裂隙

Fig.5 Random filled and nonfilled fractures

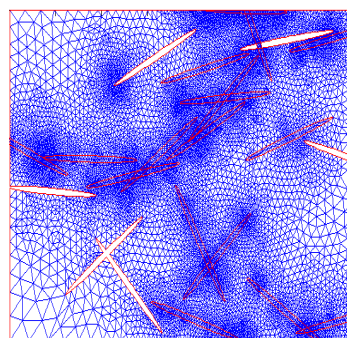


图 6 随机断续、非填充和填充混合裂隙有限元网格

Fig.6 FEM Grid random filled and nonfilled fractures

3 瓦斯渗流-应力弹塑性耦合模型

煤层瓦斯抽放是煤岩应力和瓦斯渗流的全耦合过程。在瓦斯抽放过程中，煤岩体有效应力重新分布，煤岩体发生变形，使煤岩孔隙率与裂纹张开度改变，并改变煤岩中瓦斯的透气系数，同时游离瓦斯压力波动，瓦斯的吸附/解吸平衡被打破，从而影响瓦斯的渗流。反过来，瓦斯渗流状态直接与煤岩内的瓦斯压力相关，从而影响作用于煤岩上的有效应力。天然岩体是由基质岩块和裂缝组成的，以孔隙和微裂隙为主的基质岩块变形和渗流规律与裂缝的变形和渗流规律有很大的不同，尤其对于低渗透岩层则更是如此。本文将煤岩视作由基质岩块和裂缝组成的双重介质，基质岩块视作拟连续介质和弹塑性材料，裂缝用薄层 Desai 单元模拟，建立了煤岩双重介质渗流-应力弹塑性耦合数学模型，模型包括基质煤岩块的弹塑性模型和裂隙模型。

3.1 基质岩块的连续介质模型

基质岩块的连续介质模型包括变形场控制方程、渗流场控制方程和煤岩透气性与应力之间的耦合关系^[12]，其变形场控制方程为

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_{ij,j} + f_i - (\alpha p)_{,i} &= 0; \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \\ d\sigma'_{ij} &= D_{ijkl} d\varepsilon_{kl}; \quad \sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \alpha p \delta_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_{ij} 、 σ'_{ij} 、 α 分别为煤岩的总应力、有效应力和 biot 数; δ_{ij} 为 Kronecker 常数; D_{ijkl} 为煤岩弹塑性矩阵张量; ε_{ij} 为基质岩块的应变张量。

基质岩块内瓦斯以游离和物理吸附 2 种方式赋存, 根据实测煤层瓦斯含量曲线的变化规律, 其内的瓦斯含量近似用抛物线表示^[12]:

$$W = A\sqrt{p} \quad (2)$$

式中: W 为煤体的瓦斯含量 (m^3/t); A 为煤层瓦斯含量系数 $\text{m}^2/(\text{t MPa}^{1/2})$, 取值范围一般为 1~4; p 为煤层瓦斯压力 (MPa)。

由质量守恒方程和达西定律, 渗流场控制方程^[12]为

$$\nabla^2 K_i P = S(P) \frac{\partial P}{\partial t} - 2\sqrt{P} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (3)$$

式中: $S(P) = \frac{1}{4} A P^{-3/4}$; K_i 为 i 方向的透气系数;

ε_v 为体积应变; P 为瓦斯平方压力, $P = p^2$ 。

煤岩的透气性与应力之间服从如下耦合关系^[12, 14-17]:

$$K = \begin{cases} K_0 e^{-\beta \sigma'_3}, & \text{煤岩处于弹性状态} \\ \xi K_0 e^{-\beta \sigma'_3}, & \text{煤岩发生了剪切破坏} \\ \xi' K_0 e^{-\beta \sigma'_3}, & \text{煤岩发生了拉破坏} \end{cases} \quad (4)$$

式中: K_0 为无应力时的瓦斯透气系数; ξ 、 ξ' 为剪切破坏透气系数修正系数和拉破坏透气系数修正系数, 可通过试验确定; β 为试验常数。

3.2 裂缝的薄层 Desai 单元模型

裂缝用 1984 年 Desai 提出的薄层单元^[18]模拟。

薄层单元的本构关系采用弹性模型, 裂缝介质的变形可写为

$$\begin{pmatrix} \sigma_s \\ \sigma_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} D_{ss} & 0 \\ 0 & D_{nn} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_s \\ u_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: σ_s 、 σ_n 和 u_s 、 u_n 分别为裂缝的切向和法向应力、变形; D_{ss} 、 D_{nn} 分别为切向和法向刚度。

气体沿裂缝的渗流规律, 按裂缝主渗透方向, 其渗流本构方程为

$$q_i = K_f \frac{\partial P}{\partial s_i} \quad (6)$$

式中: K_f 为裂缝沿主渗透方向的透气系数, 其值与正压力的大小有关, 并表示如下:

$$K_f = K_{f_0} e^{-\beta_1 \sigma'_n} \quad (7)$$

式中: K_{f_0} 为无应力时的裂缝透气系数; β_1 为试验常数; σ'_n 为裂缝的有效法向应力。

裂缝中的气体质量仍采用抛物线为

$$W_f = A_f \sqrt{p} \quad (8)$$

式中: W_f 为裂隙的瓦斯含量 (m^3/t); A_f 为裂隙瓦斯含量系数 $\text{m}^2/(\text{t MPa}^{1/2})$, 取值范围一般为 0.1~0.3; p 为裂隙瓦斯压力 (MPa)。于是, 裂缝中瓦斯渗流方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_f \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_f \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(K_f \frac{\partial P}{\partial z} \right) = S_f(P) \frac{\partial P}{\partial t} - 2\sqrt{P} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $S_f(P) = \frac{1}{4} A_f P^{-3/4}$ 。

式(1)~(9)构成了非均匀煤岩双重介质渗流-应力弹塑性耦合基本方程, 再结合渗流场和应力场的初边值条件就构成了相应的数学模型。

基于上述分析, 在数值计算程序 Coupling Analysis 中实现了上述模型。

4 算 例

数值算例是由辽宁某煤层瓦斯开采试井概化而成, 试井开采深度为 173 m, 上覆围岩平均重度为 23 kN/m³, 自重应力为 4 MPa, 煤层瓦斯压力为 1.1 MPa, 抽放井半径为 0.18 m, 研究区域取 20 m。

研究区域四周为狄利克雷边界条件 $p = 1.1$ MPa, 井边界也取狄利克雷边界条件, $p = 0.1$ MPa, 研究域四周力学边界为固支。煤层瓦斯初始压力为 $p = 1.1$ MPa。算例的计算参数取值参见表 1。

表 1 数值算例计算参数表
Table 1 Parameters of numerical case

参数	量值
煤岩初始透气系数 $K_0 / (\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d}))$	23.8
煤层瓦斯含量系数 $A / (\text{m}^2/(\text{t} \times \text{MPa}^{1/2}))$	2
弹性模量 E/MPa	2 100
内摩擦角/(°)	30.2
黏聚力/MPa	1.4
抗拉强度/MPa	0.1
泊松比	0.3
剪切破坏透气系数修正系数	47
拉破坏透气系数修正系数	109
裂缝初始透气系数 $K_{f_0} / (\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d}))$	1 800
薄层单元剪切模量/MPa	0.01
裂缝瓦斯含量系数 $A_f / (\text{m}^2/(\text{t} \times \text{MPa}^{1/2}))$	0.12

对附近采区煤岩的地质调查, 确定该试井周围 0.01 m 以上宽度的填充裂隙密度服从泊松分布; 裂隙形心在区域内服从均匀分布; 迹长服从正态分布, 均值为 3 m, 标准差为 0.4 m; 计算中的模型是以井为中心的轴对称模型, 裂隙的走向 (以北为 0°) 服从正态分布, 均值为 20° , 标准差为 1° ; 隙宽服从指数分布, 均值为 0.05 m。利用 RFSS^{2D} 系统生成随机裂隙及有限元网格见图 7。将建立的有限元模型导入到 Coupling Analysis, 得到瓦斯抽放井的瓦斯压、应力的变化规律。图 8 为 2 880 d 抽放井周围瓦斯压的分布规律, 图 9 和图 10 为 2 880 d 抽放井周围应力 x 方向和 y 方向应力增量分布规律。从图可见, 无论裂隙与抽放井是否连通都对瓦斯运移有影响, 这是由于裂缝的存在缩短了基质岩块内瓦斯的渗流路径, 有利于瓦斯抽放。从图 8 也能看出, 与抽放井连通的裂隙对瓦斯运移的影响更大, 而与抽放井不连通的裂隙影响相对要小得多。因此, 一些技术如水力割缝等由于能增加非连通裂隙与抽放井连通的概率, 有利于瓦斯抽放。

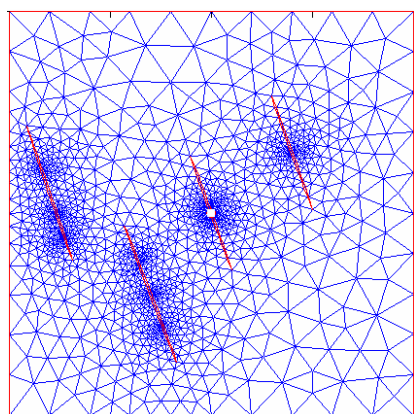


图7 算例有限元网格
Fig.7 FEM grid of case

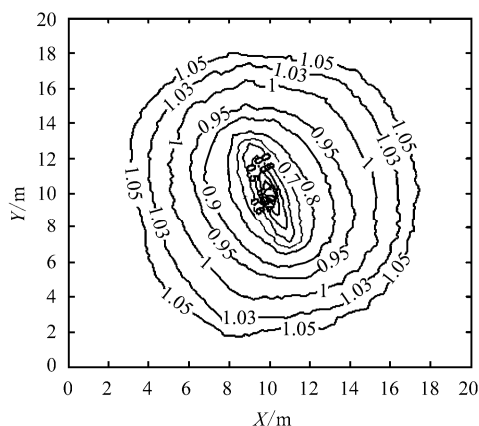


图8 2 880 d 的瓦斯压分布 (单位: MPa)
Fig.8 Gas pressure in 2 880 days (unit: MPa)

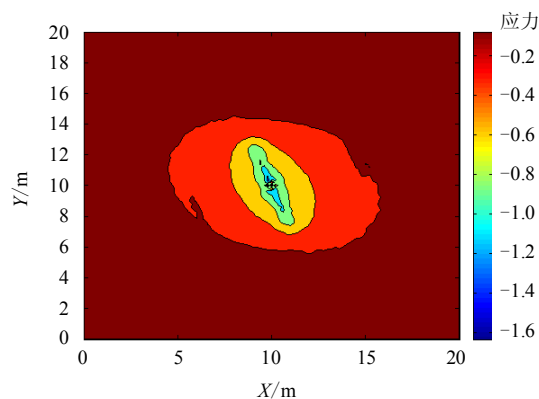


图9 2 880 d 煤岩 x 方向增加应力 (单位: MPa)
Fig.9 Adding x -stress of coal in 2 880 day (unit: MPa)

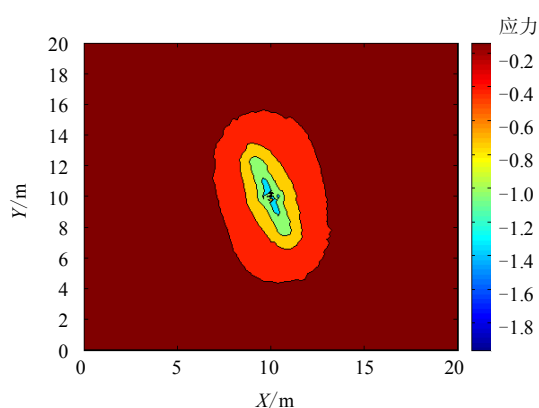


图10 2 880 d 煤岩 y 方向增加应力 (单位: MPa)
Fig.10 Adding y -stress of coal in 2 880 day (unit: MPa)

5 结 论

利用 Monte-Carlo 模拟技术模拟实际煤岩裂隙的随机性, 本文建立了随机展布裂隙煤岩体模型, 并开发了二维随机裂隙煤岩体生成程序 RFSS^{2D}。通过研究, 本文主要得到如下结论:

(1) 在煤岩实测数据和统计分析基础上, 该系统不仅能生成与实际煤岩具有相同统计分布裂隙网络的虚拟煤岩体, 而且能自动实现有限元网格剖分。

(2) 裂隙对瓦斯抽放有重要影响。与瓦斯抽放井连通的裂隙对瓦斯运移影响要大于与抽放井不连通的裂隙, 因此, 一些技术如水力割缝, 由于能使非连通裂缝与抽放井连通, 故有利于瓦斯抽放。

(3) 本文建立的双重介质渗流-应力弹塑性耦合计算模型, 不仅能较好反映裂缝对瓦斯渗流的影响, 也能反映煤岩应力变化及破坏对瓦斯渗透性的影响, 具有一定的应用价值。

(4) 由于隙宽一般较小, 在随机裂隙岩体模型向有限元模型转化中会生成大量的网格数据, 因此, 计算量大是本文模型的一个弱点, 如何进一步改进需要进一步研究。

参考文献

- [1] 于永江, 张春会, 王来贵. 超声波干扰提高煤层气抽放率的机理研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008, 27(6): 805—808.
YU Yong-jiang, ZHANG Chun-hui, WANG Lai-gui. Mechanism of improving mine gas drainage by ultrasonic disturbance[J]. **Journal of Liaoning Technical University**, 2008, 27(6): 805—808.
- [2] 袁亮. 低透高瓦斯煤层群安全开采关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1370—1379.
YUAN Liang. Key technique of safe mining in low permeability and methane-rich seam group[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(7): 1370—1379.
- [3] 张春会, 于永江, 赵全胜. 煤岩瓦斯抽放固结数学模型及应用[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008, 27(6): 844—846.
ZHANG Chun-hui, YU Yong-jiang, ZHAO Quan-sheng. Consolidation model of gas drainage for coal and its application[J]. **Journal of Liaoning Technical University**, 2008, 27(6): 844—846.
- [4] ZHAO Y S, QING H Z, BAI Q Z. Mathematical model for solid-gas coupled problems on the methane flowing in coal seam[J]. **Acta Mechanica Sinica**, 1993, 6(4): 459—466.
- [5] SUN PD. Numerical simulations for coupled rock deformation and gas leak flow in parallel coal seams[J]. **Geotech. Geol. Eng.**, 2004, 22: 1—17.
- [6] VALLIAPPAN S, ZHANG WH. Numerical modelling of methane gas migration in dry coal seams[J]. **Int. J. Numer. Anal Methods Geomech**, 1996, 20: 571—93.
- [7] 张春会, 赵全胜. 基于ARCGIS的矿山开采沉陷灾害预警系统[J]. 岩土力学, 30(7): 2197—2202.
ZHANG Chun-hui, ZHAO Quan-sheng. Early-warning system of mine subsidence damage based on ARCGIS[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 30(7): 2197—2202.
- [8] 陈剑平. 岩体随机不连续面三维网络数值模拟技术[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 397—402.
CHEN Jian-ping. 3-D net work numerical modeling technique for random discontinuities of rock mas[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 397—402.
- [9] 宋晓晨, 徐卫亚. 裂隙岩体渗流模拟的三维离散裂隙网络数值模型(I): 裂隙网络的随机生成[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2015—2020.
SONG Xiao-chen, XU Wei-ya. Numerical model of three-dimensional discrete fracture network for seepage in fractured rocks (I): Generation of fracture network[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(12): 2015—2020.
- [10] 朱焕春, Brummer Richard, Andrieux Patrick. 节理岩体数值计算方法及其应用(一): 方法与讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3444—3449.
ZHU Huan-chun, Brummer Richard, Andrieux patrick. numerical methods and application for jointed rock mass, part 1: Approaches and discussions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(20): 3444—3449.
- [11] 赵阳升, 胡耀青, 赵宝虎, 等. 块裂介质岩体变形与气体渗流的耦合数学模型及其应用[J]. 煤炭学报, 2003, 28(1): 41—45.
ZHAO Yang-sheng, HU Yao-qing, ZHAO Bao-hu, et al. Coupled mathematical model for solid deformation and gas seepage of rock matrix2 fractured media and its applications[J]. **Journal of China Coal Society**, 2003, 28(1): 41—45.
- [12] 张春会, 于永江, 赵全胜. 非均匀煤岩渗流-应力弹塑性耦合数学模型及数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2837—2842.
ZHANG Chun-hui, YU Yong-jiang, ZHAO Quan-sheng. Seepage-stress elastoplastic coupling model of heterogeneous coal and numerical simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2837—2842.
- [13] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水力水电出版社, 2005.
- [14] 郑少河, 朱维申. 裂隙岩体渗流损伤耦合模型的理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 156—159.
ZHENG Shao-he, ZHU Wei-shen. Theoretical analysis on a coupled seepage and damage model of fractured rockmass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(2): 156—159.
- [15] WANG J A, PARK H D. Fluid permeability of sedimentary rocks in a complete stress-strain process[J]. **Engineering Geology**, 2002, 63: 291—300.
- [16] RUTQVIST J, TSANG C F. Analysis of thermal-hydrologic-mechanical behavior near an emplacement drift at Yucca mountain[J]. **Journal of Contaminant Hydrology**, 2003, 62/63: 637—652.
- [17] 王环玲, 徐卫亚, 杨圣奇. 岩石变形破坏过程中渗透率演化规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1703—1708.
WANG Huan-ling, XU Wei-ya, YANG Sheng-qi. Experimental investigation on permeability evolution law during course of deformation and failure of rock specimen[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(10): 1703—1708.
- [18] DESAI C S, ZAMAN M M. Thin-layer element for interfaces and joints[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1984, 8(1): 19—43.