

含瓦斯煤岩固气耦合动态模型与数值模拟研究

尹光志^{1,2}, 王登科¹, 张东明^{1,2}, 黄 滚^{1,2}

(1. 重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘 要: 首先在多孔介质的有效应力原理中引入瓦斯吸附的膨胀应力, 推导出了适用于含瓦斯煤岩的有效应力计算公式。通过分析含瓦斯煤岩的孔隙度和渗透率在不同变形阶段的变化特点, 在前人的研究成果基础上, 建立了含瓦斯煤岩的孔隙度和渗透率的动态模型。假设含瓦斯煤岩是一种各向同性的弹塑性材料, 同时考虑瓦斯吸附的影响, 得出了含瓦斯煤岩的应力场方程和渗流场方程, 建立了能描述固气耦合情况下煤岩骨架可变形性和瓦斯气体可压缩性的含瓦斯煤岩的固气耦合模型。最后通过给定模型的定解条件和相关参数, 利用有限元方法建立了相关的数值计算模型, 并得出了含瓦斯煤岩固气耦合模型的数值解。研究成果对进一步充实和完善含瓦斯煤岩固气耦合理论有一定意义。

关键词: 含瓦斯煤岩; 固气耦合; 有效应力原理; 数值分析

中图分类号: TD712

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)10-1430-07

作者简介: 尹光志(1962-), 男, 四川西昌人, 教授、博士生导师, 主要从事矿业工程与岩石力学等方面的教学与研究工作。E-mail: gzyin@cqu.edu.cn。

Solid-gas coupling dynamic model and numerical simulation of coal containing gas

YIN Guang-zhi^{1,2}, WANG Deng-ke¹, ZHANG Dong-ming^{1,2}, HUANG-Gun^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: An effective stress calculation formula for coal containing gas is proposed coupling with the swelling stress of gas adsorption in the effective stress principle for porous media. Considering the variation of the porosity and permeability of coal containing gas at differential deformation stages, a dynamic model for porosity and permeability is developed based on the previous research results. Furthermore, taking coal containing gas as a kind of isotropic elastoplastic material and taking into account the effect of gas adsorption, the stress and seepage equations are derived and, the solid-gas coupling model for coal containing gas is constructed, which is appropriate to describe the skeleton deformability of coal containing gas and the compressibility of gas under the solid-gas interaction condition. In addition, the numerical simulation model is built by using the finite element method, and the numerical solution of the model for a special loading case is given in term of the constraint conditions and corresponding parameters. The research results maybe have a meaning for further enriching and improving solid-gas coupling theories for coal containing gas.

Key words: coal containing gas; solid-gas coupling; effective stress principle; numerical analysis

0 引 言

在多孔介质渗流过程中, 由于孔隙压力的变化, 一方面要引起多孔介质骨架有效应力变化, 由此导致多孔介质的渗透率、孔隙度等的变化; 另一方面, 这些变化反过来影响孔隙流体的流动和压力的分布。所以, 在研究多孔介质的变形特性或者裂隙流体在多孔介质中的流动规律时, 必须考虑裂隙流体的流动和多孔介质变形的相互影响, 即要考虑多孔介质内应力场与渗流场之间的耦合作用。为了研究煤矿井下的煤与瓦斯突出问题, 近年来含瓦斯煤岩的固气耦合研究日

益增多, 并取得了很多有益的研究成果^[1-8]。但是, 在这些研究中, 不是只局限于弹性分析, 就是没有充分考虑含瓦斯煤岩孔隙率和渗透率的动态变化特性。根据含瓦斯煤岩的单轴压缩条件下的应力-应变曲线, 如图 1(a) 所示, 含瓦斯煤岩在变形过程中, 不仅仅

基金项目: 国家自然科学基金项目(50874124); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB221502); 国家自然科学基金重点项目(50534080); 重庆市自然科学基金计划重点项目(2008BA6028)
收稿日期: 2007-11-12

只发生了弹性变形, 还有不可忽视的塑性变形。而且, 随着变形的增加, 煤岩试样的孔隙率和渗透系数都是动态变化的。为此, 本文在前人的研究成果上, 在多孔介质的有效应力原理中引入瓦斯吸附膨胀应力, 在考虑瓦斯气体的可压缩性和含瓦斯煤岩骨架可变形性的前提下, 建立了含瓦斯煤岩弹塑性固气耦合动态模型, 并利用有限元方法给出了模型的数值解。

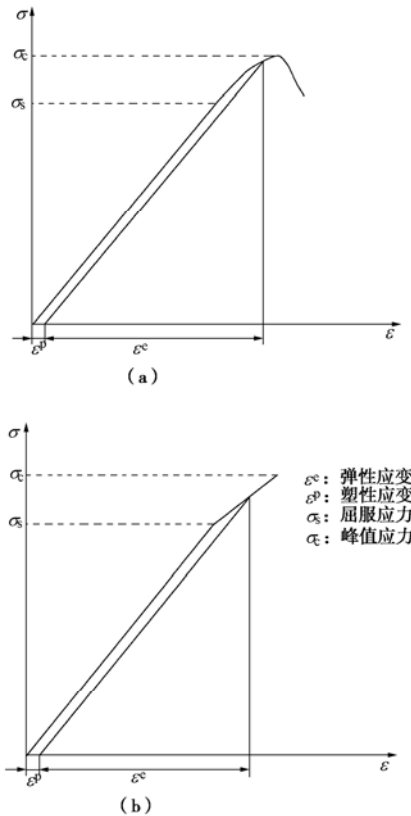


图 1 含瓦斯煤岩单轴条件下的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of coal containing gas under uniaxial stress condition

1 基本假设

含瓦斯煤岩的固气耦合研究涉及到岩石力学和渗流力学等学科领域, 在研究此问题之前, 引入如下几个基本假设: ①含瓦斯煤岩为各向同性弹塑性介质; ②瓦斯在煤岩中的吸附达到饱和状态; ③瓦斯在煤岩中的渗流为等温渗流, 且服从 Darcy 定律; ④瓦斯的吸附解吸服从 Langmuir 方程; ⑤含瓦斯煤岩的变形为小变形。

2 含瓦斯煤岩有效应力原理

煤岩是一种具有很强吸附特性的多孔介质, 大量的试验研究表明, 当煤岩孔隙中吸附瓦斯气体时, 其体积发生膨胀, 并表现出膨胀应力。煤岩的这种特性

与其破坏特性关系紧密, 所以在研究含瓦斯煤岩的固气耦合效应时应该考虑这种膨胀应力所带来的影响。

吸附瓦斯后的煤岩膨胀应力可以通过下面的公式来计算^[9]:

$$\sigma_p = \frac{2a\rho_s RT \ln(1+bp)}{3V_m} \quad (1)$$

式中 a 为给定温度下单位质量煤岩的极限吸附量 (m^3/kg); b 为吸附常数 (MPa^{-1}); $R = 8.3143$ ($\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$), 为摩尔气体常数; T 为绝对温度 (K); ρ_s 为煤岩视密度 (kg/m^3); p 为瓦斯压力 (MPa); $V_m = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$, 为摩尔体积。

根据文献[10]提出的多孔介质有效应力原理, 并考虑煤岩吸附瓦斯后的膨胀应力, 即可得到含瓦斯煤岩的有效应力原理:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \phi p \delta_{ij} - \frac{2a\rho_s RT \ln(1+bp)}{3V_m} \quad (2)$$

式中, ϕ 为含瓦斯煤岩的孔隙度。

由式(2)可知, 有效应力原理体现了含瓦斯煤岩的固气耦合效应, 同时也反映了瓦斯吸附膨胀效应对固气耦合的影响。

考虑到含瓦斯煤岩为弹塑性介质, 根据文献[11]的分析, 可以将含瓦斯煤岩的有效应力定义为

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \beta p \delta_{ij} - \frac{2a\rho_s RT \ln(1+bp)}{3V_m} \quad (3)$$

在这里定义 β 为等效孔隙度, 且有

$$\beta = \begin{cases} \phi, & \text{弹性变形阶段,} \\ \phi_c, & \text{应变强化阶段,} \\ \beta_{\max}, & \text{极限破坏阶段.} \end{cases} \quad (4)$$

3 孔隙度和渗透率的动态模型

含瓦斯煤岩在加载过程中, 随着变形的增加, 等效孔隙度 (β) 和渗透率 (k) 是动态变化的。所以在建立含瓦斯煤岩固气耦合本构模型时, 应考虑这些因素的变化和影响。

(1) 当含瓦斯煤岩处于弹性变形阶段时

含瓦斯煤岩的骨架体积用 V_s 表示, 其变化用 ΔV_s 表示; 含瓦斯煤岩的孔隙体积用 V_p 表示, 其变化用 ΔV_p 表示; 总体积用 V_t 表示, 其变化用 ΔV_t 表示。根据孔隙度的定义, 有

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_{p0} + \Delta V_p}{V_{t0} + \Delta V_t} = 1 - \frac{V_{s0}(1 + \Delta V_s/V_{s0})}{V_{t0}(1 + \Delta V_t/V_{t0})} \\ &= 1 - \frac{1 - \phi_0}{1 + \epsilon_v} (1 + \Delta V_s/V_{s0}) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 V_{s0} 为含瓦斯煤岩的初始骨架体积; V_{t0} 为含瓦

斯煤岩的初始总体积; ϕ_0 为含瓦斯煤岩的初始孔隙度; ε_v 为含瓦斯煤岩的体积应变。

一般情况下, 通常认为固体的骨架是不变形的。但是在实际工程中, 骨架颗粒或多或少是有变形的, 因此在研究含瓦斯煤岩的固气耦合问题时, 应该考虑含瓦斯煤岩的骨架变形。

由瓦斯压力变化引起的骨架体积变形为

$$\Delta V_s / V_{s0} = -\Delta p / K_s, \quad (6)$$

式中, K_s 为固体骨架的体积模量 (MPa), $\Delta p = p - p_0$ (p_0 为初始瓦斯压力), 为瓦斯压力变化 (MPa)。

联立式 (5) 和式 (6), 便得到考虑骨架变形的孔隙度计算公式

$$\phi = 1 - \frac{1 - \phi_0}{1 + \varepsilon_v} (1 - \Delta p / K_s). \quad (7)$$

(2) 当含瓦斯煤岩处于应变强化阶段时
此时可假定 ϕ_c 有如下形式:

$$\phi_c = M \phi \left(\frac{\bar{\sigma} - \sigma_s}{\sigma_c - \sigma_s} \right) + N, \quad (8)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 为应力强度 (MPa); M, N 为常数。

根据文献[12], 岩石试件在受压情况下, 当达到峰值强度时, 开始出现宏观裂纹。因此, 可以假设当载荷达到峰值应力 σ_c 时的 $\phi_c = \beta_{\max}$, $\beta_{\max}$ 可由实验得到; 而当载荷达到屈服应力 σ_s 时, 有 $\phi_c = \phi$ 。根据这两种情况, 不难推导出 $M = (1 - \phi) / \phi$, $N = \phi$, 并将之回代入式 (8), 得到

$$\phi_c = (1 - \phi) \left(\frac{\bar{\sigma} - \sigma_s}{\sigma_c - \sigma_s} \right) + \phi. \quad (9)$$

于是可以将式 (4) 写成

$$\beta = \begin{cases} 1 - \frac{1 - \phi_0}{1 + \varepsilon_v} (1 - \Delta p / K_s), & \text{弹性变形阶段,} \\ (\beta_{\max} - \phi) \left(\frac{\bar{\sigma} - \sigma_s}{\sigma_c - \sigma_s} \right) + \phi, & \text{应变强化阶段,} \\ \beta_{\max}, & \text{极限破坏阶段.} \end{cases} \quad (10)$$

同理, 含瓦斯煤岩的渗透率(k)也是动态变化的。设弹性变形阶段的含瓦斯煤岩的渗透率为 k_e , 根据渗流力学的 Kozeny-Carman 方程, 结合文献[13, 14]的研究结果, 得到

$$k_e = \frac{k_0}{1 + \varepsilon_v} \left[1 + \frac{\varepsilon_v}{\phi_0} + \frac{(\Delta p / K_s)(1 - \phi_0)}{\phi_0} \right]^3, \quad (11)$$

式中, k_0 为初始渗透率。

采用与孔隙度同样的处理方法, 便可得到含瓦斯煤岩渗透率 (k) 的动态变化方程

$$k = \begin{cases} k_e & \text{弹性变形阶段,} \\ (k_{\max} - k_e) \left(\frac{\bar{\sigma} - \sigma_s}{\sigma_c - \sigma_s} \right) + k_e & \text{应变强化阶段,} \\ k_{\max} & \text{极限破坏阶段,} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $k_{\max}$ 为极限破坏阶段渗透率, 可由试验得到。

由式 (10)、(12) 可以看出, 等效孔隙度 β 和渗透率 k 的值都不是常数, 而是动态变化的。

4 含瓦斯煤岩固气耦合动态模型

4.1 变形场方程

由图 1 (a) 已经知道含瓦斯煤岩在变形过程中, 既会产生弹性变形, 又会产生塑性变形。本文假设含瓦斯煤岩是各向同性的弹塑性介质, 并视含瓦斯煤岩为线性等向强化材料, 因此可以将图 1 (a) 转化成图 1 (b) 的形式进行分析。

含瓦斯煤岩的变形场方程有如下 3 组:

(1) 平衡方程

根据有效应力原理, 可得到含瓦斯煤岩的平衡方程为

$$\sigma'_{ij,j} + (\beta p \delta_{ij})_j + X_i = 0, \quad (13)$$

式中, X_i 为体积力 (N/m³)。

(2) 几何方程

含瓦斯煤岩的几何方程为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (14)$$

式中, u_i 为位移分量 (m)。

(3) 本构方程

含瓦斯煤岩的本构方程采用弹塑性本构方程, 其增量形式为

$$d\sigma'_{ij} = L_{ijkl} (d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^p). \quad (15)$$

对于各向同性弹性介质而言, 有

$$L_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}), \quad (16)$$

式中, λ 和 μ 为 Lamé 常数。

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (17)$$

式中, E 为弹性模量 (MPa); ν 为泊松比。

假设含瓦斯煤岩服从 Drucker-Prager 屈服准则, 对于各向同性强化材料, 加载曲面为

$$f = \alpha I'_1 + \sqrt{J'_2} - \gamma - \psi \left(\int d\varepsilon^p \right) = 0, \quad (18)$$

式中, $I'_1 = \sigma'_{ii}$ 为有效主应力张量第一不变量, $J'_2 = J_2$ 为有效偏应力张量第二不变量, $\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}$ (φ

为含瓦斯煤岩的内摩擦角), $\gamma = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}$ (c 为含

瓦斯煤岩的黏聚力), $d\bar{\varepsilon}^p$ 为等效塑性应变增量。

式 (18) 等同于

$$\begin{cases} f = \sqrt{3}\alpha I_1' + \bar{\sigma} = \psi \left(\int d\bar{\varepsilon}^p \right), \\ \psi(0) = \sigma_s, \end{cases} \quad (19)$$

式中, ψ 是 $d\bar{\varepsilon}^p$ 的单调递增函数 (其形式由试验曲线确定), $\sigma_s = \sqrt{3}\gamma$ 。

根据单轴压缩条件下的应力应变曲线 (如图 1(b) 所示), 可得到 ψ 的函数形式:

$$\psi \left(\int d\bar{\varepsilon}^p \right) = \sigma_s + \frac{EE'}{E-E'} \int d\bar{\varepsilon}^p, \quad (20)$$

式中, E' 为含瓦斯煤岩强化阶段的弹性模量。

将式 (20) 代入式 (19), 得到

$$f = \sqrt{3}\alpha I_1' + \bar{\sigma} - \sigma_s - \frac{EE'}{E-E'} \int d\bar{\varepsilon}^p = 0. \quad (21)$$

根据塑性力学的基本原理^[15], 经推导, 可得到

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{df}{d\sigma_{ij}} = \frac{3}{2} \left(\frac{E-E'}{EE'} \right) \left(\frac{\sqrt{2}\alpha dI_1' + ds'_{ij}}{\sqrt{2}\alpha\delta_{ij} + 1} \right), \quad (22)$$

式中, $s'_{ij} = s_{ij}$ 为偏斜应力。

将式 (22) 代入式 (15), 便得到含瓦斯煤岩增量形式的弹塑性本构方程:

$$d\sigma'_{ij} = L_{ijkl} \left[d\varepsilon_{kl} - \frac{3}{2} \left(\frac{E-E'}{EE'} \right) \left(\frac{\sqrt{2}\alpha dI_1' + ds'_{ij}}{\sqrt{2}\alpha\delta_{ij} + 1} \right) \right]. \quad (23)$$

4.2 渗流场方程

本文只考虑瓦斯在煤岩中的单向流动, 并假设瓦斯气体的流动服从 Darcy 定律。考虑到多孔介质的变形, 所以在多孔介质中流体质点速度为

$$v_f = v_s + v_r, \quad (24)$$

式中, v_f 为流体速度, v_s 为多孔介质的骨架速度, $v_s = \dot{u}$ (u 为位移场), v_r 为流体相对于骨架颗粒的速度, 有 $v_r = \frac{1}{\beta} v_D$ (v_D 为 Darcy 速度)。

根据 Darcy 定律, 考虑到瓦斯气体的重力可以忽略, 则有

$$v_D = -\frac{k}{\eta} \nabla p, \quad (25)$$

式中, η 为瓦斯气体的动力黏度。

所以有

$$v_r = -\frac{k}{\beta\eta} \nabla p. \quad (26)$$

含瓦斯煤岩的骨架连续性方程为

$$\frac{\partial[(1-\beta)\rho_s]}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-\beta)\rho_s v_s] = 0. \quad (27)$$

式中 ρ_s 为含瓦斯煤岩密度 (kg/m^3); $W = \frac{a'bp}{1+bp}$ 为 Langmuir 方程计算得到的瓦斯吸附量 (kg/m^3);

$a' = a\rho_f\rho_s$ 为给定温度下单位体积煤岩的极限吸附量 (kg/m^3); ρ_f 为瓦斯密度 (kg/m^3)。

瓦斯气体的连续性方程为

$$\frac{\partial(\beta\rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\beta\rho_f v_r) = 0. \quad (28)$$

对式 (27)、(28) 进行化简并处理后, 不难得出

$$\beta \nabla \cdot v_r + \nabla \cdot v_s + \frac{(1-\beta)}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\beta}{\rho_f} \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial W}{\partial t} = 0. \quad (29)$$

流体在等温条件下的状态方程可以表示为

$$\rho_f = \rho_0 \exp[(p - p_0)/K_f], \quad (30)$$

式中, K_f 为瓦斯气体的体积压缩模量, ρ_0 为瓦斯的初始密度。

根据式 (30), 可以得出

$$\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \rho_f}{\partial t} = \frac{1}{K_f} \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (31)$$

同理, 对于煤岩骨架颗粒也有

$$\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \rho_s}{\partial t} = \frac{1}{K_s} \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (32)$$

式中, K_s 为煤岩固体颗粒的体积压缩模量。

将式 (26)、(31)、(32) 代入式 (29), 并注意到

$\nabla \cdot v_s = \nabla \cdot \dot{u} = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}$, 便得到流固耦合渗流场方程

$$\begin{aligned} & \left[\frac{(1-\beta)}{K_s} + \frac{\beta}{K_f} + \frac{1}{\rho_f} \frac{ab}{(1+bp)^2} \right] \frac{\partial p}{\partial t} + \\ & \nabla \cdot \left(-\frac{k}{\eta} \nabla p \right) + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = 0. \end{aligned} \quad (33)$$

于是式 (10)、(12) 同变形场方程、渗流场方程一起构成了含瓦斯煤岩单相流体的固气耦合动态模型。从该模型中, 可看出, 含瓦斯煤岩的渗透率(k)和等效孔隙度(β)都是随着煤岩的变形而动态变化的。

4.3 定解条件

对于含瓦斯煤岩单相流体固气耦合动态模型中的控制方程组, 需要补充定解条件才能得出具体的解来。定解条件包括初始条件和边界条件。

(1) 初始条件

初始条件指的是在 $t=0$ 的时刻, 含瓦斯煤岩内部瓦斯压力的原始分布情况, 即

$$p|_{t=0} = p_{\text{int}}, \quad (34)$$

式中, p_{int} 为瓦斯的初始压力值。

(2) 边界条件

位移边界条件:

$$u|_{\text{边界}} = u_b, \quad (35)$$

式中, u_b 为边界上的位移。

应力边界条件:

$$\sigma'_{ij} n_j = Q_i, \quad (36)$$

式中, Q_i 为边界上的面力。

定压边界条件:

$$p|_{\text{边界}} = p_b \quad , \tag{37}$$

式中, p_b 为边界上的瓦斯压力。

定流边界条件:

$$-\frac{k}{\eta}(\nabla p)n_i|_{\text{边界}} = q \quad , \tag{38}$$

式中, q 为边界上的瓦斯流量。

式 (34) ~ (38) 便构成了固气耦合动态模型的定解条件, 再加上含瓦斯煤岩单相流体固气耦合动态模型中的控制方程组, 就构成了完整的含瓦斯煤岩单相流体固气耦合动态模型。对于此模型的求解, 因为模型中涉及到一组非线性的方程组, 一般情况下是很难得到精确解的, 所以只能借助数值解法。

5 数值模拟分析

根据上述分析, 要得到含瓦斯煤岩单相流体固气耦合动态模型的解, 需要借助数值解法。利用有限元方法, 采用 Matlab 编程, 对含瓦斯煤岩固气耦合动态模型进行求解, 以得到给定条件下的含瓦斯煤岩的渗流场和变形场的分布情况。

由于在试验过程中, 对含瓦斯煤岩试样所施加的载荷是轴对称的, 为提高计算速度和节省计算机内存资源, 本文就建立轴对称的有限元模型来得出以上所建模型的数值解。

(1) 有限元模型尺寸

所建模型尺寸就是含瓦斯煤岩的实际尺寸, 其高为 100 mm, 宽为 25 mm (由于所建有限元模型为轴对称模型, 所以其宽就是含瓦斯煤岩直径的一半)。

(2) 模型的材料参数

含瓦斯煤岩固气耦合动态模型相关参数见表 1。

表 1 含瓦斯煤岩的材料参数

Table1 Material Parameters of coal containing gas		
参数名称	数值	单位
含瓦斯煤岩初始孔隙度(ϕ_0)	0.15	—
含瓦斯煤岩初始 渗透率(k_0)	3.82×10^{-17}	m^2
瓦斯动力黏度(η)	1.34×10^{-5}	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
含瓦斯煤岩弹性模量(E)	185	MPa
含瓦斯煤岩强化弹性模量(E')	110	MPa
含瓦斯煤岩视密度(ρ_s)	1320	kg/m^3
含瓦斯煤岩泊松比(ν)	0.31	—
含瓦斯煤岩的内摩擦角(φ)	32	°
含瓦斯煤岩的黏聚力(c)	0.3	MPa
含瓦斯煤岩的峰值应力(σ_c)	12.2	MPa
瓦斯压缩模量(K_f)	0.14	MPa
含瓦斯煤岩体积模量(K_s)	166	MPa
瓦斯密度(ρ_f)	0.714	kg/m^3
吸附常数(a)	14.5	m^3/kg
吸附常数(a')	13.66	kg/m^3
吸附常数(b)	0.72	MPa^{-1}

(3) 模型的边界条件

模型的边界条件如表 2 所示。

表 2 模型的边界条件

Table 2 Boundary conditions of the model		
名称	数值	单位
原始瓦斯压力(p_i)	0.1	MPa
含瓦斯煤岩上端面瓦斯压力(p_u)	$1+0.00033t$	MPa
含瓦斯煤岩下端面瓦斯压力(p_d)	0.1	MPa
含瓦斯煤岩周边瓦斯流量(q)	0	m/s
围压(σ_r)	3.0	MPa
轴压(σ_z)	$3+0.002t$	MPa

注: t 为时间。

在 $t=3000\text{ s}$ 时, 含瓦斯煤岩的总位移、等效应力、塑性应变以及 Darcy 渗流速度场的分布情况如图 2~5 所示。

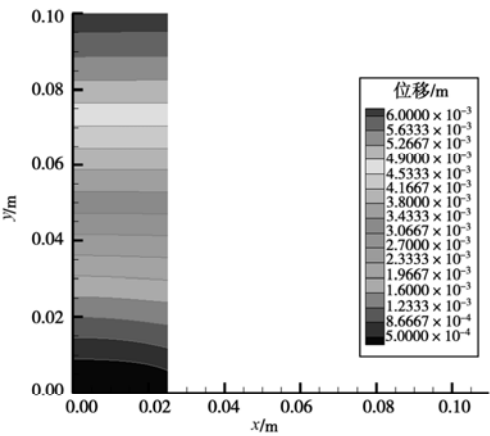


图 2 总位移分布情况

Fig. 2 Distribution of total displacement

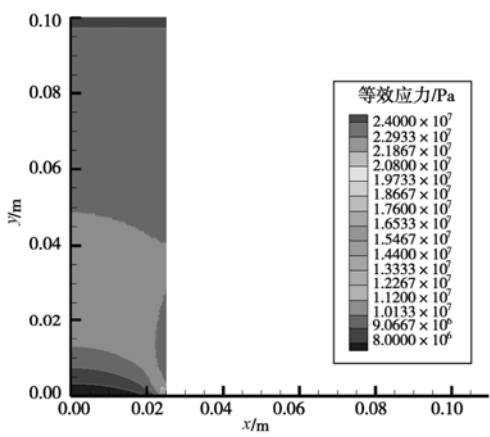


图 3 等效应力分布情况

Fig. 3 Distribution of effective stress

含瓦斯煤岩等效孔隙度和渗透率随时间的演化分布如图 6 和图 7 所示。

由图 6 和图 7, 可以看出含瓦斯煤岩的等效孔隙度和渗透率具有相同的演化规律。

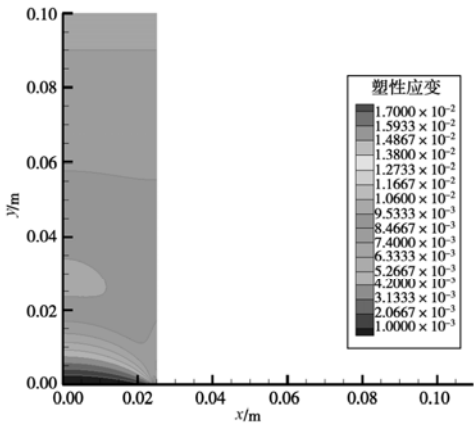


图 4 塑性应变分布情况
Fig. 4 Distribution of plastic strain

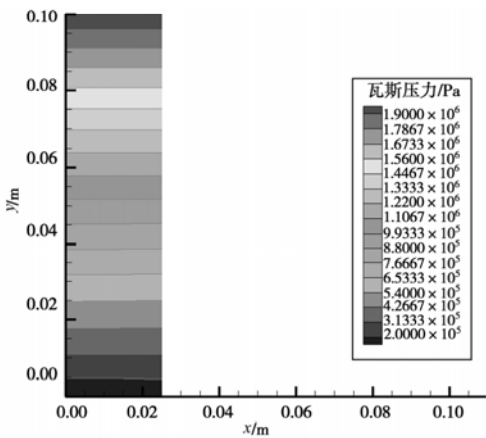


图 5 瓦斯压力分布情况
Fig. 5 Distribution of gas pressure

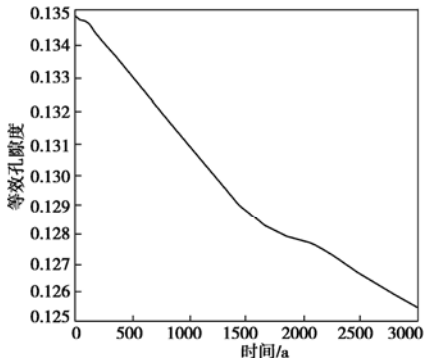


图 6 等效孔隙度演化分布图
Fig. 6 Evolution of porosity

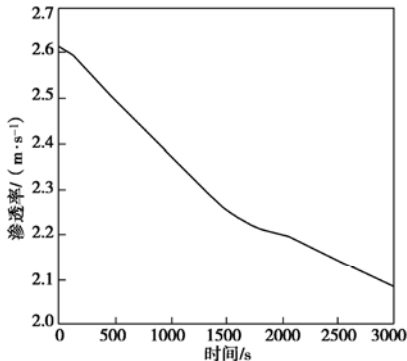


图 7 渗透率演化分布图
Fig. 7 Evolution of permeability

6 结 语

本文在多孔介质有效应力原理中引入了煤岩吸附瓦斯的膨胀应力, 并将之应用到含瓦斯煤岩的固气耦合分析中, 在考虑孔隙度和渗透率动态变化的情况下, 建立了含瓦斯煤岩的固气耦合动态模型。该模型充分考虑了含瓦斯煤岩在变形过程中孔隙度和渗透率的动态变化特征, 从而更真实全面地反映了含瓦斯煤岩的固气耦合现象; 同时, 利用有限元方法, 给出了模型的数值解。本文所建立的含瓦斯煤岩固气耦合动态模型对于进一步完善含瓦斯煤岩固气耦合理论有一定意义。

参考文献:

- [1] 杨天鸿, 徐 涛, 刘建新, 等. 应力 - 损伤 - 渗流耦合模型及在深部煤层瓦斯卸压时间中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(16): 2900 - 2905. (YANG Tian-hong, XU Tao, LIU Jian-xin, et al. Coupling model of stress-damage-flow and its application to the investigation of instantaneous seepage mechanism for gas during unloading in coal seam with depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(16): 2900 - 2905. (in Chinese))
- [2] 卢 平, 沈兆武, 朱贵旺, 等. 含瓦斯煤的有效应力与力学变形破坏特性[J]. 中国科学技术大学学报, 2001, **31**(6): 686 - 693. (LU Ping, SHEN Zhao-wu, ZHU Gui-wang, et al. The effective stress and mechanical deformation and damage characteristics of gas-filled coal[J]. Journal of China University of Science and Technology, 2001, **31**(6): 686 - 693. (in Chinese))
- [3] 曹树刚, 鲜学福. 煤岩固 - 气耦合的流变力学分析[J]. 中国矿业大学学报, 2001, **30**(4): 362 - 365. (CAO Shu-gang, XIAN Xue-fu. Research on solid-gas coupling model of coal and rock[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, **30**(4): 362 - 365. (in Chinese))
- [4] 汪有刚, 刘建军, 杨景贺, 等. 煤层瓦斯流固耦合渗流的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2001, **26**(3): 285 - 289. (WANG You-gang, LIU Jian-jun, YANG Jing-he, et al. Simulation of fluid-solid coupling flow of coal-bed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2001, **26**(3): 285 - 289. (in Chinese))
- [5] 梁 冰, 刘建军, 王锦山. 非等温情况下煤和瓦斯固流耦合作用的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 1999, **18**(5): 483 - 486. (LIANG Bing, LIU Jian-jun, WANG Jin-shan. The study of coupling effect of coal and gas under unequal temperature[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 1999, **18**(5): 483 - 486. (in

- Chinese))
- [6] 徐剑良, 刘全稳, 赵庆波, 等. 煤层气流固耦合渗流模型求解过程中的参数处理[J]. 天然气工程, 2006, **26**(4): 86 - 89. (XU Jian-liang, LIU Quan-wen, ZHAO Qing-bo, et al. Handling of parameters in process of solving fluid-solid coupling percolation model of coal-bed gas[J]. Journal of Natural Gas Industry, 2006, **26**(4): 86 - 89. (in Chinese))
- [7] 丁继辉, 麻玉鹏, 赵国景, 等. 煤与瓦斯突出的固 - 流耦合失稳理论及数值分析[J]. 工程力学, 1999, **16**(4): 47 - 53. (DING Ji-hui, MA Yu-peng, ZHAO Guo-jing, et al. Instability theory and numerical analysis of solid-fluid coupling on coal - methane outburst[J]. Engineering Mechanics, 1999, **16**(4): 47 - 53. (in Chinese))
- [8] 刘建军, 刘先贵. 煤储存流固耦合渗流的数学模型[J]. 焦作工学院报, 1999, **18**(6): 397 - 401. (LIU Jian-jun, LIU Xian-gui. The coupled mathematical model of fluid-solid flow in coal reservoir[J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology, 1999, **18**(6): 397 - 401. (in Chinese))
- [9] 吴世跃, 赵文, 郭勇义. 煤岩体吸附膨胀变形与吸附热力学的参数关系[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005, **26**(7): 683 - 686. (WU Shi-yue, ZHAO Wen, GUO Yong-yi. Parametric correlation between expansion deformation of coal mass and adsorption thermodynamics[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005, **26**(7): 683 - 686. (in Chinese))
- [10] 徐献芝, 李培超, 李传亮. 多孔介质有效应力原理研究[J]. 力学与实践, 2001, **23**(4): 42 - 45. (XU Xian-zhi, LI Pei-chao, LI Chuan-liang. Principle of effective stress based on porous medium[J]. Mechanics and Engineering, 2001, **23**(4): 42 - 45. (in Chinese))
- [11] 卢平, 沈兆武, 朱贵旺, 等. 含瓦斯煤的有效应力与力学变形破坏特性[J]. 中国科学技术大学学报, 2001, **31**(6): 686 - 693. (LU Ping, SHEN Zhao-wu, ZHU Gui-wang, et al. The effective stress and mechanical deformation and damage characteristics of gas-filled coal[J]. Journal of China University of Science and Technology, 2001, **31**(6): 686 - 693. (in Chinese))
- [12] 匡震邦, 顾海澄, 李中华. 材料的力学行为[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998. (KUANG Zhen-bang, GU Hai-cheng, LI Zhong-hua. Mechanical behavior of material[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. (in Chinese))
- [13] 冉启全, 李士伦. 流固耦合油藏数值模拟中物性参数动态模型研究[J]. 石油勘探与开发, 1997, **24**(3): 61 - 65. (RAN Qi-quan, LI Shi-lun. Study on dynamic model of reservoir parameters in the coupling simulation of multiphase flow and reservoir deformation[J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, **24**(3): 61 - 65. (in Chinese))
- [14] 李培超, 孔祥言, 卢德唐. 饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型[J]. 水动力学研究与进展, 2003, **18**(4): 419 - 426. (LI Pei-chao, KONG Xiang-yan, LU De-tang. Mathematical modeling of flow in saturated porous media on account of fluid-structural coupling effect[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, **18**(4): 419 - 426. (in Chinese))
- [15] 王仁, 黄文彬, 黄筑平. 塑性力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1992. (WANG Ren, HUANG Wen-bin, HUANG Zhu-ping. Plastic mechanics[M]. Beijing: Beijing University Press, 1992. (in Chinese))