

文章编号:0253-9993(2013)04-0535-07

基于含瓦斯煤岩固气耦合模型的钻孔抽采 瓦斯三维数值模拟

尹光志^{1,2},李铭辉^{1,2},李生舟^{1,2},李文璞^{1,2},姚俊伟^{1,2},张千贵^{1,3}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400030; 2. 重庆大学 资源及环境科学学院,重庆 400030; 3. 西南石油大学 石油工程学院,四川 成都 610500)

摘要:通过在多孔介质的有效应力原理中引入瓦斯吸附产生的膨胀应力,得出适用于含瓦斯煤岩的有效应力计算公式。同时利用含瓦斯煤岩的孔隙率和渗透率的动态模型,建立了能描述含瓦斯煤岩固气耦合情况下的骨架可变形性和气体可压缩性的固气耦合模型。以平顶山十矿的相关物性参数为基础进行了数值模拟,首先对建立的三维模型进行了开挖处理,得到了开挖后煤层的应力分布状态,而非简单的均布载荷,然后利用所建立的数学模型进行钻孔抽采瓦斯三维数值模拟。从数值模拟结果得到:① 抽采负压对钻孔抽采瓦斯的影响不明显;② 随着抽采时间的增长,煤层的孔隙率逐渐减小;③ 随着时间的推移,钻孔抽采瓦斯的有效抽采半径均逐渐增大,最后会逼近一个定值。

关键词:渗透率;固气耦合模型;数值模拟;含瓦斯煤

中图分类号:TD712.6

文献标志码:A

3D numerical simulation of gas drainage from boreholes based on solid-gas coupling model of coal containing gas

YIN Guang-zhi^{1,2}, LI Ming-hui^{1,2}, LI Sheng-zhou^{1,2}, LI Wen-pu^{1,2}, YAO Jun-wei^{1,2}, ZHANG Qian-gui^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 3. School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: An effective stress calculation formula was proposed for coal containing gas with considering the swelling stress of gas adsorption based on the effective stress principles for porous media. Referring to dynamic model of porosity and permeability in coal containing gas, solid-gas coupling model which could describe the skeleton deformability of coal containing gas and the compressibility of gas under the solid-gas interaction condition was built. First we made excavation on the three-dimensional model based on the physical parameters of Pingdingshan tenth coal mine to obtain the stress distribution of coal seam after excavated instead of easy uniform loading. Then we simulated the gas drainage from boreholes based on constructed mathematical model. From the results we got: ① Negative pressure didn't have a great influence on gas drainage. ② The porosity of coal seam decreased gradually over time. ③ The effective radius increased gradually to a fixed value over time.

Key words: permeability; solid-gas coupling model; numerical simulation; coal containing gas

我国煤层瓦斯赋存丰富,其储量大致与天然气的储量相当。随着煤矿开采深度进一步延伸,煤层中的

瓦斯含量也逐渐增大,工作面更易发生瓦斯涌出和煤与瓦斯突出等动力灾害事故。我国煤层普遍具有低

收稿日期:2012-07-16 责任编辑:许书阁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201203);国家科技重大专项课题资助项目(2011ZX05034-004);国家自然科学基金资助项目(51174241)

作者简介:尹光志(1962—),男,四川西昌人,教授,博士生导师。E-mail:gzyn@cqu.edu.cn

渗透性的特点,特别是西南地区地质条件复杂,常为无保护层可采的单一煤层。钻孔抽采瓦斯不仅可以大幅降低煤层瓦斯含量,减少发生瓦斯动力灾害的几率,还可将瓦斯作为一种清洁能源加以利用。

钻孔抽采瓦斯过程中煤层中的渗透率变化非常复杂,是一个瓦斯气体运移与煤层固体变形之间相互耦合的复杂过程。国内外学者在研究煤层瓦斯渗流规律的基础上进行了一些钻孔抽采瓦斯的理论分析工作和应用。肖晓春、潘一山^[1]建立了考虑滑脱效应影响的煤层气渗流模型,并模拟分析了煤层气运移的规律;赵阳升等^[2-3]建立了固气耦合作用下的均质煤层瓦斯流动数学模型;梁冰等^[4]考虑温度场作用下瓦斯渗流对煤体本构关系的影响,提出了煤与瓦斯耦合作用的数学模型;尹光志等^[5-6]在考虑煤岩体为各向同性弹塑性介质的基础上引入瓦斯吸附的膨胀应力,建立了含瓦斯煤岩固气耦合动态模型;杨天鸿等^[7-8]通过考虑煤层吸附、解吸作用的含瓦斯煤岩固气耦合作用模型模拟研究了煤层瓦斯卸压抽放过程;司鹤等^[9]运用多孔介质渗流的基本定理和流固耦合的基本理论建立了瓦斯流固耦合计算方程,模拟分析了顺层钻孔抽采条件下的瓦斯运移规律。前人的研究加深了人们对钻孔抽采瓦斯的机理认识^[10-20]。但对建立的三维模型先进行开挖处理,得到开挖后煤层应力分布状态,而非简单均布载荷,此时再利用煤岩固气耦合模型进行模拟的研究还鲜见报道。

本文基于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弹塑性固气耦合模型,充分考虑受瓦斯压力压缩和煤基质吸附瓦斯膨胀对其本体变形的影响,以 Kozeny-Carman 方程为桥梁,建立含瓦斯煤渗透率理论模型,以平顶山十矿的相关物性参数为基础模拟分析了钻孔抽采瓦斯条件下的煤层瓦斯运移规律。

1 理论模型

1.1 含瓦斯煤岩有效应力

根据多孔介质有效应力原理,考虑煤岩吸附瓦斯产生的膨胀应力^[5,10],可得到含瓦斯煤岩有效应力原理:

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

式中, φ 为煤岩的等效孔隙率; δ_{ij} 为 Kronecher 符号,摩尔气体常数 $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度, K ; a 为给定温度下的单位质量煤岩极限吸附量, m^3/kg ; b 为吸附常数, MPa^{-1} ; ρ_s 为煤岩视密度, $\text{kg}/$

m^3 ; p 为瓦斯压力, MPa ; 摩尔体积 $V_m = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$ 。

1.2 孔隙率和渗透率动态变化模型

根据孔隙率定义并且考虑由瓦斯压力变化引起的骨架体积变形,可得到考虑了骨架变形的含瓦斯煤岩弹性阶段孔隙率计算公式:

$$\varphi_e = 1 - \frac{1 - \varphi_0}{1 + \varepsilon_v} (1 - \Delta p/K_s) \quad (2)$$

式中, φ_0 为含瓦斯煤岩的初始孔隙率; ε_v 为含瓦斯煤岩的体积应变;瓦斯压力变化 $\Delta p = p - p_0$ (p_0 为初始瓦斯压力); K_s 为固体骨架的体积模量, MPa 。

当含瓦斯煤岩处于应变强化阶段时,孔隙率根据文献^[5]可定义为

$$\varphi_p = (\varphi_{\max} - \varphi_e) \frac{\sigma_i - \sigma_s}{\sigma_c - \sigma_s} + \varphi_e \quad (3)$$

式中, φ_{\max} 为载荷达到峰值应力 σ_c (MPa) 时的孔隙率; σ_i 为应力强度; σ_s 为屈服应力。

根据以上分析,我们可以将煤岩孔隙率写成:

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_e = 1 - \frac{1 - \varphi_0}{1 + \varepsilon_v} \left(1 - \frac{\Delta p}{K_s} \right) \\ \varphi_p = (\varphi_{\max} - \varphi_e) \frac{\sigma_i - \sigma_s}{\sigma_c - \sigma_s} + \varphi_e \end{cases} \quad (4)$$

根据渗流力学中 Kozeny-Carman 方程,结合文献^[11-12]的研究结果,得到煤岩弹性阶段的渗透率为

$$k_e = \frac{k_0}{1 + \varepsilon_v} \left[1 + \frac{\varepsilon_v + (\Delta p/K_s)(1 - \varphi_0)}{\varphi_0} \right]^3 \quad (5)$$

式中, k_0 为煤岩初始渗透率, m^2 。

采用与孔隙率相同的处理方法,含瓦斯煤岩应变强化阶段的渗透率定义为

$$k_p = (k_{\max} - k_e) \frac{\sigma_i - \sigma_s}{\sigma_c - \sigma_s} + k_e \quad (6)$$

式中, k_{\max} 为煤岩达到峰值应力时的渗透率。

由分析可以得到含瓦斯煤岩的渗透率:

$$k = \begin{cases} k_e = \frac{k_0}{1 + \varepsilon_v} \left[1 + \frac{\varepsilon_v + (\Delta p/K_s)(1 - \varphi_0)}{\varphi_0} \right]^3 \\ k_p = (k_{\max} - k_e) \frac{\sigma_i - \sigma_s}{\sigma_c - \sigma_s} + k_e \end{cases} \quad (7)$$

1.3 煤岩体变形场控制方程

将煤岩看作线性等向强化材料。根据 Terzaghi 有效应力原理,其应力平衡方程为

$$\sigma'_{ij,j} + (\beta p \delta_{ij}) + F_i = 0 \quad (8)$$

式中, F_i 为体积力张量, N/m^3 。

含瓦斯煤岩体的几何方程为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{u_{i,j} + u_{j,i}}{2} \quad (9)$$

式中, u_i 为位移分量 (m)。

对于各向同性弹性介质, 弹塑性本构方程的增量形式表达如下:

$$d\sigma'_{ij} = [\lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})] (d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^p) \quad (10)$$

式中, E 为弹性模量 (MPa); ν 为泊松比; λ 和 μ 为拉梅常数。

采用 Drucker-Prager 屈服准则, 该准则表达为

$$Q = k_1 I'_1 + \sqrt{J'_2} - k_2 - \alpha_p \quad (11)$$

式中, k_1, k_2 为材料常数, $k_1 = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)}, k_2 =$

$\frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)}$; I'_1 为有效主应力张量第一不变量; J'_2

为有效偏应力张量第二不变量; φ 为材料膨胀角; c 为材料黏聚力。

根据文献[13], 塑性强化准则可以定义为

$$\alpha_p = \alpha_p^0 + \frac{(\alpha_p^m - \alpha_p^0) \varepsilon^{ep}}{A + \varepsilon^{ep}} \quad (12)$$

式中, α_p^0 为塑性屈服启动阈值; α_p^m 为强化函数的最大值; ε^{ep} 为等效塑性应变; A 为控制塑性强化率的常数。

本文采用 Von mises 流动法则, 表达如下:

$$Q = \sigma'_i \quad (13)$$

式中, σ'_i 为有效应力强度, MPa。

1.4 煤层瓦斯渗流场控制方程

假设瓦斯为理想气体, 不考虑瓦斯吸附解吸过程, 瓦斯在煤岩体中的渗流视为等温过程, 则其中游离态瓦斯密度和压力满足理想气体方程:

$$\rho_g = \beta p \quad (14)$$

其中, ρ_g 为瓦斯密度, kg/m^3 ; $\beta = M_g/RT$, 为瓦斯压缩因子, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{Pa})$; M_g 为瓦斯气体摩尔质量, kg/kmol 。则游离瓦斯含量 Q_f 可表示为

$$Q_f = \rho_g \varphi \quad (15)$$

吸附瓦斯含量由朗格缪尔等温吸附方程求得

$$Q_a = \frac{abp\rho_0}{1 + bp} \quad (16)$$

式中, ρ_0 为标准大气压下的瓦斯密度, kg/m^3 。

由式(15), (16) 可得煤岩体中瓦斯含量 Q 为

$$Q = Q_f + Q_a = \beta p \varphi + \frac{abp\rho_0}{1 + bp} \quad (17)$$

考虑 Klinkenberg 效应, 渗流速度 v 表示为

$$v = -\frac{k}{\mu} \left(1 + \frac{m}{p}\right) (\nabla p + \rho_g g \nabla z) \quad (18)$$

式中, k 为含瓦斯煤岩渗透率, m^2 ; μ 为瓦斯动力黏度系数, Pa; m 为 Klinkenberg 因子; 考虑到瓦斯的重力很小, 本文计算中忽略重力项。

瓦斯在煤岩体中的流动满足质量守恒:

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \nabla(\rho_g v) = 0 \quad (19)$$

等温过程多孔介质孔隙率变化^[12]为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = (1 - \varphi) \left(\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{1}{K_s} \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (20)$$

由以上分析得到渗流场控制方程:

$$2 \left[\varphi + \frac{p(1 - \varphi)}{K_s} + \frac{abp\rho_0}{(1 + bp)^2} \right] \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \left[\frac{k}{\mu} \left(1 + \frac{m}{p}\right) \nabla p^2 \right] + 2(1 - \varphi)p \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = 0 \quad (21)$$

2 数值模型及结果分析

2.1 几何模型

本文使用基于偏微分方程组 (PDEs) 的 Comsol Multiphysics 系统进行二次开发来实现模拟研究, 该系统构建了一个从建模到求解的完整平台, 每个环节都是开放的, 几乎所有细节都可以控制。本次数值计算在固体力学方程和达西方程的基础上进行修改来实现自定义控制方程。本文首先通过对三维空间中的原岩体进行开挖模拟出接近真实的地层应力分布情况, 而不是简单的对其施加均布载荷, 此时再加入瓦斯抽采钻孔可更真实地模拟出钻孔瓦斯抽采情况。数值计算区域如图 1(a) 所示, 为 $300 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的三维模型。上覆岩层为 50 m , 煤层厚度为

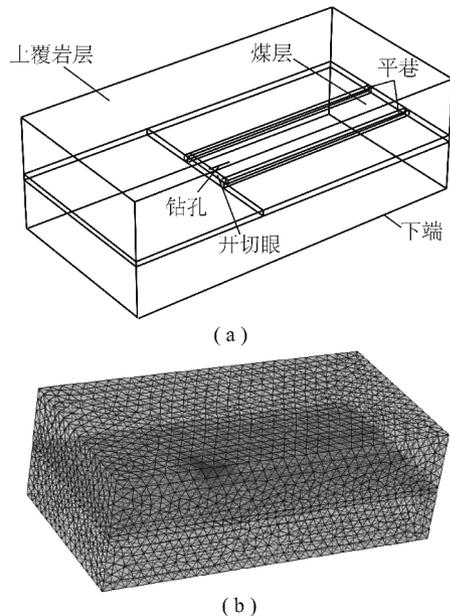


图 1 三维几何模型

Fig. 1 Map of three-dimensional geometrical modeling

5 m, 钻孔位于开切煤层面的中心位置。图 1(b) 为所建立模型的网格划分图, 整个模型划分为 111 622 个单元。

本文的数值模拟以河南平顶山十矿的相关物性参数为基础进行, 见表 1。

表 1 模型煤层物理性质参数

Table 1 Physical parameters of model

参数名称	数值
含瓦斯煤岩初始孔隙率(ϕ_0)	0.09
含瓦斯煤岩初始渗透率(k_0)	$3.82 \times 10^{-15} \text{ m}^2$
瓦斯动力黏度(η)	$1.34 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
含瓦斯煤岩弹性模量(E)	1 623 MPa
岩层弹性模量(E_r)	5 192 MPa
含瓦斯煤岩视密度(ρ_s)	1 350 kg/m^3
岩石视密度(ρ_r)	2 500 kg/m^3
含瓦斯煤岩泊松比(ν)	0.36
含瓦斯煤岩的内摩擦角(φ)	20°
含瓦斯煤岩的黏聚力(c)	0.72 MPa
含瓦斯煤岩的峰值应力(σ_c)	21 MPa
岩石的峰值应力(σ_{cr})	68.5 MPa
吸附常数(a)	$14.5 \text{ m}^3/\text{kg}$
吸附常数(b)	0.72 MPa^{-1}

2.2 初始条件和边界条件

初始条件: 煤层内部有 3.0 MPa 的初始瓦斯压力, 抽采孔的压力为 0.1 MPa, 初始应力状态为开挖平巷及开切眼后的应力分布。

边界条件: 瓦斯仅在煤层中流动, 开切面给定为大气压力 0.1 MPa, 其余三面和顶底板均为 0 通量不透气边界, 模型四周约束方式为辊支承(约束法线方向的位移), 下部固定约束, 上部自由, 上部承受岩层质量, 应力为 5 MPa, 同时模型具有自重载荷。

计算方案: 模拟研究不同钻孔抽采负压、不同抽采时间和不同钻孔孔径大小情况下的瓦斯抽采效果。

2.3 计算结果分析

图 2 给出了钻孔抽采压力分别为 0.01 MPa(负压)和 0.1 MPa(大气压力)时($t=1 \times 10^6 \text{ s}$) 钻孔头切面瓦斯压力的分布规律。从图 2 可以得到, 距钻孔中心的距离越近, 瓦斯压力下降的幅度越大。这是由于, 越接近钻孔中心, 局部煤层得到的卸压越明显, 煤层渗透率也相应变大, 瓦斯压力下降也就越明显。我们注意到对于自然排抽和负压抽采, 煤层中瓦斯压力的下降趋势是相似的。负压抽采只是使钻孔周围局部煤层的瓦斯压力下降幅度稍大于自然排抽时的情况。

图 3 给出了不同抽采负压钻孔抽采瓦斯煤层的

瓦斯压力下降百分率。由图 3 可以得到, 从钻孔四周往钻孔中心方向, 煤层瓦斯压力的下降率开始缓慢上升, 而后急剧上升。距离钻孔中心 3 m 左右范围内煤层瓦斯压力下降幅度达到了 60% 以上。钻孔负压抽采瓦斯的影响范围与自然排抽几乎相同, 只是在中心处的瓦斯下降百分率稍大。

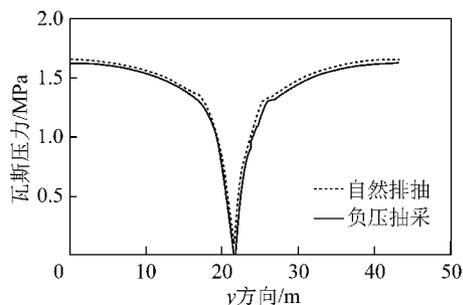


图 2 不同抽采压力时瓦斯压力分布曲线

Fig. 2 Gas pressure distribution curves with different pressure of drainage

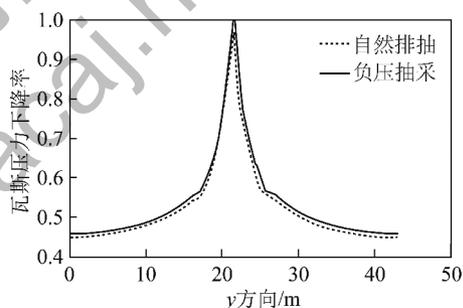


图 3 不同抽采压力时瓦斯压力下降率曲线

Fig. 3 Curves of gas pressure decrease rate with different pressure of drainage

图 4 给出了抽采时间分别为 2×10^5 , 1×10^6 , $1.8 \times 10^6 \text{ s}$ 时钻孔抽采瓦斯含瓦斯煤层的瓦斯压力云图。图 5 给出了抽采时间分别为 $0, 5 \times 10^5, 1 \times 10^6, 1.5 \times 10^6, 2 \times 10^6 \text{ s}$ 时以开切面钻孔中心为起点沿垂直于开切面方向的一条直线上的瓦斯压力分布曲线。图 6 给出了煤层孔隙率随时间的变化。

结合图 4, 5 可以看出, 随着抽采时间的增长, 煤层中的瓦斯压力逐渐下降。从图 5 可知, 在钻孔抽采瓦斯的初始阶段, 煤层中瓦斯压力下降较快。随着抽放时间的推移, 煤层中的瓦斯压力下降速率逐渐减小。这表明, 在钻孔抽采瓦斯的初始阶段, 瓦斯抽放量较大, 一段时间后瓦斯抽放量将趋于稳定。

图 6 给出了煤层中钻孔前方 5 m 处一点孔隙率随时间的变化曲线。由该图我们可知, 随着抽采时间的推移, 该点处孔隙率逐渐减小, 其孔隙率减小速率不断减小。这是由于随着时间的推移, 煤层中的瓦斯压力逐渐减小, 瓦斯压力的逐渐减小对煤层有两种作用: 一是有效应力增大导致煤层孔隙被压缩; 二是煤

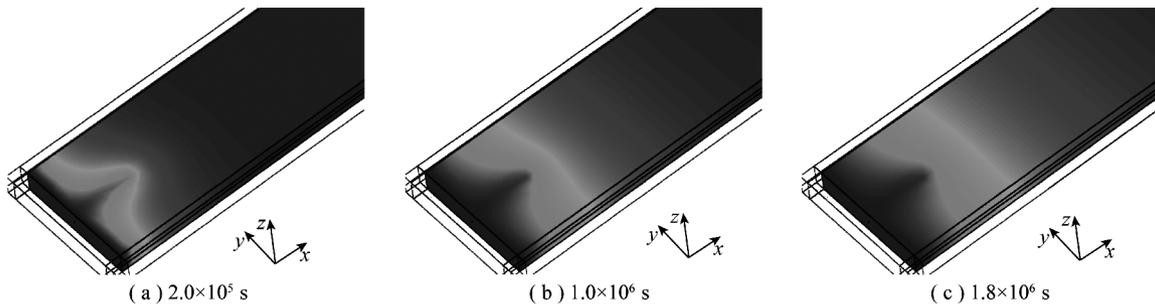


图4 不同时刻瓦斯压力云图

Fig. 4 Cloud picture of gas pressure with different time

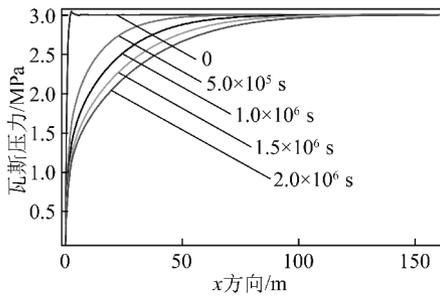


图5 不同时刻瓦斯压力分布曲线

Fig. 5 Gas pressure distribution curves with different time

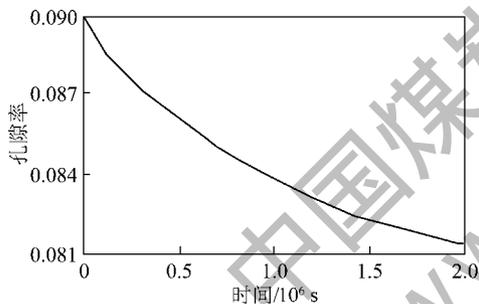


图6 孔隙率随时间变化曲线

Fig. 6 Curve of porosity changes with time

层瓦斯解吸导致煤骨架收缩,此时有效应力增大导致的孔隙收缩要大于瓦斯解吸导致的孔隙扩张,煤层孔隙率整体表现为下降。因此,随着时间的增长,煤层孔隙率逐渐下降,钻孔抽采瓦斯的效果也会逐渐减弱。

为达到降低煤层瓦斯含量,降低或消除煤与瓦斯突出危险性的目的,钻孔抽采瓦斯应使煤层中的残余瓦斯应力小于0.74 MPa。图7给出了不同抽采时间下残余瓦斯压力小于0.74 MPa范围内的压力等值面图。把残余瓦斯压力小于0.74 MPa范围内最远处距钻孔的距离称为有效抽采半径,图8给出了不同钻孔直径(0.1,0.2,0.3 m)情况下钻孔抽采瓦斯的有效抽采半径随着时间的变化情况。

由图7可以得到,随着抽采时间的增长,钻孔的有效抽采范围也相应增大。从图8可以看出,随着时间的推移,钻孔直径分别为0.1,0.2,0.3 m的钻孔抽

采瓦斯的有效抽采半径均逐渐增大同时有效抽采半径增大的速率逐渐减缓,最后会迫近一个定值。同一时刻的有效抽采半径随着钻孔直径的增大而增大,并且钻孔直径较小时,其有效抽采半径会较早地进入平缓上升阶段。这是由于随着钻孔孔径的增大,钻孔的体积也越大,钻孔暴露面积相应增大,其对煤层的卸压作用也越明显,从而使钻孔附近煤层渗透率和孔隙率增大,因此煤层中的瓦斯更易流动,瓦斯压力下降更明显。

为探讨钻孔周围煤体受钻孔钻进的影响范围,根据数值模拟结果得到了钻孔周围的明显卸压范围,以此作为钻孔钻进的影响范围。钻孔直径为0.1,0.2,0.3 m时,其影响范围分别大约为0.9,1.7,2.3 m,详细结果见表2。

表2 钻孔影响范围

Table 2 Influence scope of borehole

钻孔直径/m	影响范围/m	范围直径比
0.1	0.9	9.0
0.2	1.7	8.5
0.3	2.3	7.7

3 讨论

本文的计算模型考虑了瓦斯吸附的膨胀应力对有效应力的影响,通过含瓦斯煤岩的孔隙率和渗透率的动态模型建立了应力与煤层透气性情况的关系。结合煤岩的孔隙率和渗透率动态模型和本文的计算模型中给出的控制方程,我们可以知道瓦斯抽采过程是一个十分复杂的耦合作用过程。煤层的瓦斯运移情况与其所受的应力状况是密切相关的,而瓦斯气体的流动又会反过来影响煤层所受的应力情况。因此,利用事先开挖模型得到地下采矿时的应力分布情况,并在此应力分布情况的基础上利用含瓦斯煤岩固气耦合数学模型对实际情况进行模拟对于研究瓦斯抽采设计和效果分析有着十分重要的现场指导作用。

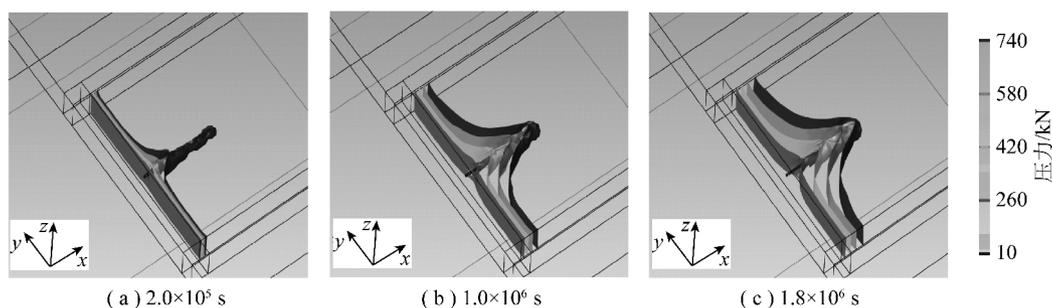


图7 不同时刻瓦斯压力等值面

Fig. 7 Pressure isosurface distribution with different time

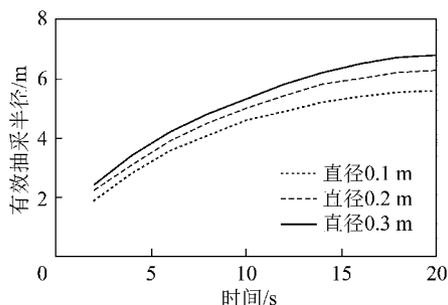


图8 有效抽采半径随时间变化曲线

Fig. 8 Curves of effective drainage radius changes with time

4 结 论

(1) 抽采负压对钻孔抽采瓦斯的影响不明显。钻孔抽采瓦斯无论是负压抽采还是自然排采,其瓦斯压力下降的趋势是一致的。负压抽采只是使得钻孔周围一定范围内的煤层卸压加速,瓦斯压力下降的幅度稍微增大。

(2) 通过对不同抽采时间钻孔抽采瓦斯进行分析,得出了随着抽采时间的增长,煤层中的瓦斯压力逐渐下降,且煤层的孔隙率随时间的推移而减小。

(3) 随着时间的推移,钻孔抽采瓦斯的有效抽采半径均逐渐增大同时有效抽采半径增大的速率逐渐减缓,最后会迫近一个定值,同一时刻的有效抽采半径随着钻孔直径的增大而增大。钻孔周围煤体受钻孔钻进影响范围为钻孔直径的7.7~9.0倍。

(4) 通过研究煤层瓦斯抽采动态过程的含瓦斯煤弹塑性固气耦合模型,利用对三维空间中的原岩体进行开挖模拟出接近真实的地层应力分布情况,得到了煤体在固气耦合作用下瓦斯的运移规律和煤层透气性的演化规律。从结果来看,符合现场瓦斯抽采的一般规律。

参考文献:

[1] 肖晓春,潘一山. 考虑滑脱效应的煤层气渗流数学模型及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2966-2970.
Xiao Xiaochun, Pan Yishan. Mathematical model and numerical sim-

ulation of coal-bed methane percolation flow equation considering slippage effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2966-2970.

[2] 赵阳升. 煤体-瓦斯耦合数学模型与数值解法[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(3): 229-239.
Zhao Yangsheng. Coupled mathematical model on coal mass-gas and its numerical method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13(3): 229-239.

[3] Zhao Y S, Yang D, Hu Y Q, et al. Nonlinear coupled mathematical model for solid deformation and gas seepage in fractured media[J]. Transport in Porous Media, 2004, 55(2): 119-136.

[4] 梁冰, 章梦涛, 王泳嘉. 煤层瓦斯渗流与煤体变形的耦合数学模型及数值解法[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(2): 135-142.
Liang Bing, Zhang Mengtao, Wang Yongjia. Mathematical model and numerical method for coupled gas flow in coal seams and coal deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(2): 135-142.

[5] 尹光志, 王登科, 张东明, 等. 含瓦斯煤岩固气耦合动态模型与数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 10(4): 1430-1435.
Yin Guangzhi, Wang Dengke, Zhang Dongming, et al. Solid-gas coupling dynamic model and numerical simulation of coal containing gas [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 10(4): 1430-1435.

[6] 尹光志, 王登科. 含瓦斯煤岩耦合弹塑性损伤本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 994-999.
Yin Guangzhi, Wang Dengke. A coupled elastoplastic damage model for gas-saturated coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 994-999.

[7] 杨天鸿, 陈仕阔, 朱万成, 等. 煤层瓦斯卸压抽放动态过程的气-固耦合模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2247-2252.
Yang Tianhong, Chen Shikuo, Zhu Wancheng, et al. Coupled model of gas-solid in coal seams based on dynamic process of pressure relief and gas drainage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2247-2252.

[8] 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实践中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2900-2905.
Yang Tianhong, Xu Tao, Liu Jianxin, 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.
- [9] 司 鹄,郭 涛,李晓红. 钻孔抽放瓦斯流固耦合分析及数值模拟[J]. 重庆大学学报,2011,34(11):105-110.
Si Hu,Guo Tao,Li Xiaohong. Analysis and numerical simulation of fluid-structure coupling of gas drainage from boreholes[J]. Journal of Chongqing University,2011,34(11):105-110.
- [10] 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 Shiyue,Zhao Wen,Guo Yongyi. Parametric correlation between expansion deformation of coal mass and adsorption thermodynamics [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science),2005,26(7):683-686.
- [11] 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 Qiquan,Li Shilun. 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.
- [12] 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,2003,30(10):419-426.
Li Peichao,Kong Xiangyan,Lu Detang. Mathematical modeling of flow in saturated porous media on account of fluid-structural coupling effect[J]. Journal of Hydrodynamics,2003,30(10):419-426.
- [13] Chaboche J L. Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity[J]. International Journal of Plasticity,1989,5(3):247-302.
- [14] Hu G Z,Wang H T,Fan X G,et al. mathematical model of coalbed gas flow with Klinkenberg effects in multi-physical fields and its analytic solution[J]. Transport in Porous Media,2009,76(3):407-420.
- [15] 张春会. 非均匀、随机裂隙展布岩体渗流应力耦合模型[J]. 煤炭学报,2009,34(11):1460-1464.
Zhang Chunhui. Seepage-stress coupled model of heterogeneous and random fractured rock mass [J]. Journal of China Coal Society,2009,34(11):1460-1464.
- [16] 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 Wenbin,Huang Zhuping. Plastic mechanics [M]. Beijing:Peking University Press,1992.
- [17] 周世宁,林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京:煤炭工业出版社,1990.
- [18] Zhang Chunhui,Zhao Quansheng,Yu Yongjiang. Model of coupled gas flow and deformation process in heterogeneous coal seams and its application [J]. Journal of Coal Science & Engineering(China),2011,17(1):76-80.
- [19] Yao Duoxi,Xu Jiying,Lu Haifeng. Nonlinear coupling analysis of coal seam floor during mining based on FLAC^{3D} [J]. Journal of Coal Science & Engineering (China),2011,17(1):22-27.
- [20] 汪有刚,李宏艳,齐庆新,等. 采动煤层渗透率演化与卸压瓦斯抽放技术[J]. 煤炭学报,2010,35(3):406-410.
Wang Yougang,Li Hongyan,Qi Qingxin,et al. The evolution of permeability and gas extraction technology in mining coal seam [J]. Journal of China Coal Society,2010,35(3):406-410.