

文章编号:1000-582X(2011)11-105-06

钻孔抽放瓦斯流固耦合分析及数值模拟

司 鹤^{a,b}, 郭 涛^b, 李晓红^a

(重庆大学 a. 煤矿灾害学及控制国家重点实验, b. 资源及环境科学学院; 重庆 400030)

摘 要: 钻孔抽放瓦斯是中国利用和治理煤层瓦斯最主要的方法。随着开采深度的加深, 地应力场等因素对瓦斯渗流的影响越来越明显。基于对煤层瓦斯一系列的假设的基础上, 考虑了地应力、煤层瓦斯压力变化对煤体骨架产生的变形的影响, 推导出了孔隙率、渗透率的表达式。运用多孔介质渗流的基本定理和流固耦合的基本理论得出了瓦斯流固耦合控制方程。运用多物理场耦合分析软件对钻孔抽放下的瓦斯渗流场进行了模拟分析。得到了钻孔抽放条件下瓦斯压力的分布、不同的埋藏深度下以及不同的钻孔参数(抽放负压、钻孔半径)对瓦斯渗流场的影响。分析模拟结果可以对现场瓦斯抽放提供理论指导。

关键词: 孔隙率; 渗透率; 流固耦合; 数值模拟

中图分类号: TD712; X936

文献标志码: A

Analysis and numerical simulation of fluid-structure coupling of gas drainage from boreholes

SI Hu^{a,b}, GUO Tao^b, LI Xiao-hong^a

(a. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control;

b. College of Resources and Environmental Science, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Gas drainage from boreholes is main method of utilization and management of Chinese coal seam gas. As the exploitation depth increases, stress field and other factors on the impact of gas seepage are increasingly apparent. Based on the basis of a series of assumptions of coal seam gas, porosity and permeability equations are described by considering stress, coal seam gas pressure change on the coal produced by deformation of the skeleton. The fluid-structure coupling equations are derived by using the basic theorem of porous media flow and the fluid structure coupling theory. The gas seepage field is simulated and analyzed by using multi-physics coupling analysis software. The effect of gas pressure distribution, different burial depths and different drilling parameters (drainage negative pressure, drilling radius) on gas seepage field is obtained. Analysis of simulation results can provide theoretical guidance for on-site gas drainage.

Key words: porosity; permeability; fluid-structure coupling; numerical simulation

瓦斯事故在煤矿重大事故中一直占有很大的比重,但同时瓦斯可利用的一面表现在瓦斯的燃值非

常高,达到 33 352~37 072 kJ/m³。中国煤层瓦斯储量较大,其储量大致与天然气的储量相当,目前对

收稿日期:2011-06-05

基金项目:国家自然科学基金创新团队资助(5062140)

作者简介:司鹤(1964-),女,博士,重庆大学教授,主要从事工程力学、流体力学以及安全科学的研究和教学,
(E-mail)sihu@cqu.edu.cn。

瓦斯的治理利用最主要的方法是瓦斯的钻孔抽放^[1]。

瓦斯在煤层中的流动规律是煤矿瓦斯研究中的基础问题之一。国内外很多学者对其进行了大量的研究分析。丁厚成和肖远见等人从瓦斯在煤岩体流动满足 Darcy 渗流定理出发,通过一系列的假设和煤层吸附瓦斯含量方程(朗格缪尔方程),建立了煤层瓦斯渗流压力的线性理论方程模型,研究了煤体钻孔抽放瓦斯渗流变化的规律以及不同钻孔抽放条件下对抽放效果的影响,其得出的模拟分析结果与实际结果相接近,具有现实指导意义,但模型没有考虑含瓦斯煤层孔隙率与渗透率的变化^[2,3]。随着矿井开采深度不断向深部延伸,上覆岩层产生的地应力随之加大,瓦斯在煤层中的运移属于气-固耦合问题,在瓦斯运移的过程中,煤体的变形对瓦斯的渗流场影响越来越明显,含瓦斯煤岩的渗透率,孔隙率等受应力影响发生很大的变化。赵阳升等通过将渗流力学和弹塑性力学结合,通过分析瓦斯压力煤层骨架应力之间的关系,利用质量守恒定理和 Terzaghi 有效应力理论建立了比较完善的瓦斯渗流流固耦合控制方程,但是没有详细的指出含瓦斯孔隙率与渗透率变化的规律^[4-7]。朱万成等通过对含瓦斯煤岩瓦斯流固耦合分析,建立了孔隙率、渗透率随瓦斯压力和有效应力变化而变化的方程,这种分析方法没有考虑到游离瓦斯压力变化对煤岩体骨架体积变形以及对孔隙率的影响^[8,9]。

随着计算机应用的飞速发展,应用数值方法模拟瓦斯的渗流特性也吸引了越来越多的学者^[10,11]。在钻孔抽放过程中,煤层瓦斯压力变化较为剧烈,瓦斯压力的改变将引起煤体骨架的变形。笔者基于多物理场耦合理论,考虑了钻孔抽放过程中游离瓦斯压力的改变引起的煤体骨架的变形对瓦斯流动以及煤层的综合影响,结合渗流力学和弹塑性力学以及 Terzaghi 有效应力理论,建立了含瓦斯煤岩流固耦合控制方程。利用有限元方法模拟钻孔瓦斯的渗流特性以及不同钻孔参数抽放条件下对瓦斯渗流场的影响。

1 理论模型的建立

1.1 渗流控制方程

在煤层中选取单位体积的煤,根据质量守恒定律,煤层瓦斯流动的方程为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot v) = 0, \quad (1)$$

式中: ρ 为煤层瓦斯密度, kg/m^3 ; v 为瓦斯渗流速

度, m/s ; Q 为单位体积含瓦斯煤岩中瓦斯含量, kg/m^3 。

煤层内瓦斯的赋存形式是以吸附和游离 2 种状态存在的。含瓦斯煤岩孔隙表面积极大,瓦斯吸附在煤岩体内属于物理吸附。在含瓦斯煤岩水分和灰分等物理性质一定的情况下,吸附瓦斯因温度、压力、煤岩应力扰动等因素的改变而产生解析。含瓦斯煤岩在瓦斯渗流过程中可视为等温过程,在此不考虑温度以及煤岩应力扰动等因素对吸附瓦斯解析的影响,只考虑瓦斯压力变化对解析的影响。含瓦斯煤层渗透系数较小,在钻孔抽放过程中瓦斯压力变化剧烈,可以假设不考虑瓦斯解析过程,因此单位体积的煤中瓦斯含量 Q 有两部分组成:一部分是游离瓦斯 Q_g ,另一部分为吸附瓦斯 Q_a 。所以:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial Q_g}{\partial t} + \frac{\partial Q_a}{\partial t}. \quad (2)$$

游离瓦斯含量可以表示为^[11]

$$Q_g = \rho \varphi, \quad (3)$$

式中, φ 为含瓦斯煤岩孔隙率。

瓦斯可视为理想气体,瓦斯密度和压力满足

$$\rho = \beta p, \quad (4)$$

式中: p 是瓦斯压力, Pa ; β 为瓦斯的压缩系数, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{Pa})$; $\beta = M_g / (RT)$, M_g 为瓦斯气体的分子量, kg/kmol ; R 为理想气体常数, $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度, K 。

由式(3)、(4)得:

$$\frac{\partial Q_g}{\partial t} = \beta \left(p \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \varphi \frac{\partial p}{\partial t} \right). \quad (5)$$

考虑瓦斯压力以及应力应变对孔隙率的影响,含瓦斯煤岩体的孔隙率是动态变化的。孔隙率的变化可表示为^[12]

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \alpha \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} + \frac{1-\varphi}{k_s} \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (6)$$

式中: α 为等效孔隙压力系数; ϵ_v 为体积应变; k_s 为煤体骨架模量。

由式(5)、(6)得:

$$\frac{\partial Q_g}{\partial t} = \beta \left[p \left(\alpha \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} + \frac{1-\varphi}{k_s} \frac{\partial p}{\partial t} \right) + \varphi \frac{\partial p}{\partial t} \right]. \quad (7)$$

根据上文瓦斯含量的基本假设,吸附瓦斯含量满足朗格缪尔等温吸附方程,并考虑水分和灰分对吸附量的影响,单位体积的煤中吸附瓦斯的含量^[3]

$$Q_a = \frac{abc p \rho_n}{1 + bp}, \quad (8)$$

其中, $c = \rho_s \cdot \frac{1}{1+0.31M} \cdot \frac{1-A-M}{1}$ 。式中: a 为单位质量的煤的最大吸附瓦斯量, m^3/kg ; b 为煤的吸

附常数, MPa^{-1} ; c 为煤的校正参数, kg/m^3 ; ρ_s 为煤的密度, kg/m^3 ; A 为煤的灰分; M 为煤的水分; p_n 为标准大气压, Pa ; ρ_n 为标准大气压下的瓦斯密度, kg/m^3 。

$$\frac{\partial Q_n}{\partial t} = \frac{abc\rho_n}{(1+bp)^2} \frac{\partial p}{\partial t} = \beta \frac{abc\rho_n}{(1+bp)^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (9)$$

假设煤层瓦斯在其压力梯度的作用下在渗透空间作层流运动,符合达西定律;同时考虑到 Klikenberg 效应^[13],煤层瓦斯的渗流速度为

$$v = -\frac{k}{\mu} \left(1 + \frac{m}{p}\right) \cdot \nabla p, \quad (10)$$

式中: k 为煤层渗透率, m^2 ; μ 是瓦斯动力粘度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; m 为 Klikenberg 系数, Pa 。

将式(10)代入式(1)得瓦斯在煤层中的渗流方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \cdot -\frac{k}{\mu} \left(1 + \frac{m}{p}\right) \nabla p \right] = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \beta \left[p \left(\alpha \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} + \frac{1-\varphi}{k_s} \frac{\partial p}{\partial t} \right) + \varphi \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{abc\rho_n}{(1+bp)^2} \right]. \quad (12)$$

由式(11)、(12)得出煤层瓦斯渗流方程

$$2\alpha p \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} + 2 \left[\frac{abc\rho_n}{(1+bp)^2} + \frac{p(1-\varphi)}{k_s} + \varphi \right] \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\frac{k}{\mu} \left(1 + \frac{m}{p}\right) \nabla p^2 \right] = 0. \quad (13)$$

1.2 孔隙率和渗透率耦合方程

假设煤层中只有单相饱和的瓦斯气体,煤岩属于线弹性变形,根据孔隙率的 φ 定义^[14],有

$$\varphi = 1 - \frac{(1-\varphi_0)}{1+\epsilon_v} \left(1 + \frac{\Delta V_s}{V_{s_0}}\right), \quad (14)$$

式中: V_s 为多孔介质固体骨架的体积,其变化用 ΔV_s 表示; φ_0 为煤岩初始孔隙率。

不考虑温度以及吸附瓦斯解析过程对煤岩变形的影响。游离瓦斯压力变化引起煤岩骨架变形为^[14]

$$\frac{\Delta V_s}{\Delta V_{s_0}} = -\frac{\Delta p}{k_s}, \quad (15)$$

式中, Δp 为瓦斯压力变化, $\Delta p = p(x, y, t) - p(x, y, 0)$ ($p(x, y, 0)$ 为煤层初始瓦斯压力)。

将式(15)代入式(14)中得

$$\varphi = 1 - \frac{1-\varphi_0}{1+\epsilon_v} \left(1 - \frac{\Delta p}{k_s}\right). \quad (16)$$

同理,含瓦斯煤岩的渗透率也是动态变化的。根据 Carman-Kozeny 经验公式,得渗透率的方程为^[15]

$$k = \frac{k_0}{1+\epsilon_v} \left\{ 1 + \frac{\epsilon_v + \Delta p(1-\varphi_0)/k_s}{\varphi_0} \right\}^3, \quad (17)$$

式中, k_0 为初始渗透率。

1.3 含瓦斯煤岩体变形控制方程

含瓦斯煤层是由分子尺度的颗粒组成的骨架及颗粒间裂隙共同组成的空隙介质。实际上,地下煤体的变形大多数为煤体的压缩变形。煤体的骨架变形遵循 Terzaghi 有效应力规律,以有效应力表示的应力平衡微分方程为

$$\sigma'_{ij,j} + (\alpha p \delta_{ij})_{,j} + F_i = 0, (i, j = 1, 2, 3). \quad (18)$$

煤岩体变形几何方程满足(柯西方程)

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (i, j = 1, 2, 3). \quad (19)$$

煤岩体变形处于线弹性变形阶段,含瓦斯煤岩体变形本构方程为^[16]

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} e + 2G \epsilon_{ij}, (i, j = 1, 2, 3), \quad (20)$$

式中: λ 、 G 为拉梅常数; e 为体积变形; δ_{ij} 为 Kronecher 符号。

根据煤层为各向同性的假设,考虑游离瓦斯压力的改变引起的应变^[15] ϵ_p :

$$\epsilon_p = -\frac{\Delta p}{3k_s}. \quad (21)$$

结合式(18)-(21)得含瓦斯煤岩体变形控制方程为

$$G \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{G}{1-2\nu} \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_i} - \frac{(3\lambda-2G)}{3k_s} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \alpha \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i = 0. \quad (22)$$

结合式(13)和式(22)可以得到含瓦斯煤层瓦斯流动的耦合控制方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2\alpha p \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} + 2 \left(\frac{abc\rho_n}{(1+bp)^2} + \frac{p(1-\varphi)}{k_s} + \varphi \right) \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{k}{\mu} \left(1 + \frac{m}{p}\right) \nabla p^2 \right) = 0 \\ G \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \frac{G}{1-2\nu} \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j \partial x_i} - \frac{(3\lambda-2G)}{3k_s} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \alpha \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i = 0 \end{array} \right. \quad (23)$$

2 数值模型及结果分析

2.1 几何模型

根据基本假设和现场实验数据条件,钻孔抽放数值分析可以采取二维平面模型。数值计算域如图 1 所示。含瓦斯煤层的基本物性参数如表 1 所示。上覆岩层为 h m, 全域高(煤层厚度)为 3 m, 长为 100 m, 钻孔半径为 r 。钻孔位置位于全域的中心位置。

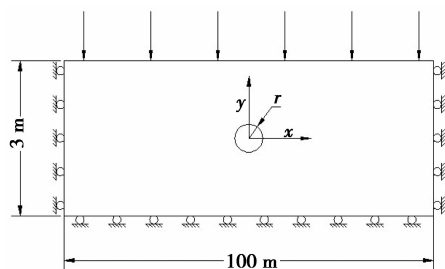


图 1 几何模型

表 1 含瓦斯煤层物性参数

参数	值
煤的弹性模量 E/Pa	3×10^9
煤的泊松比 ν	0.33
煤的密度 $\rho_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 350
初始孔隙率 φ_0	0.090
煤层瓦斯初始渗透率 k_0/m^2	2×10^{-16}
瓦斯的动力粘度 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.08×10^{-8}
岩石的泊松比 ν	0.25
单位质量的煤的 最大吸附瓦斯量 $a/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	30.98×10^{-4}
煤的吸附常数 b/MPa^{-1}	1.2114×10^{-6}
煤的水分 M	0.01
煤的灰分 A	0.124 3

2.2 初始条件和边界条件

初始条件:煤层内部瓦斯初始压力 $p(x, y, 0) = 3.1 \text{ MPa}$, 应力场初始位移 $u_i = 0 (i = 1, 2)$ 。

边界条件:瓦斯仅在煤层中流动,煤层顶底板透气性较煤层透气性小,因此顶底板可以看作为不透气岩层。渗流场边界条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} = 0, x = \pm 50 \\ \frac{\partial p}{\partial y} = 0, y = \pm 1.5 \\ p(x, y, t) = p_0, x^2 + y^2 = r^2 \end{cases} \quad t \in [0, \infty), \quad (24)$$

式中, p_0 为抽放负压。

应力边界条件:煤层顶部边界上 ($y = 1.5$) 承受着上覆岩层的重量,应力为 7 MPa。同时煤体本身的重量也一并考虑。位移边界条件:在分析域的垂直下端边界 ($y = -1.5$) 以及水平方向上的左端和右端边界上 ($x = \pm 50$) 为位移约束边界。

2.3 计算结果及分析

根据前文的基本假设,选取 x 轴方向端点为

(0,0)和(50,0)的一条直线上瓦斯压力分布变化作为研究对象。图 2 为钻孔抽放负压 p_0 为 0.01 MPa 时不同抽放时间内该直线上的瓦斯压力分布图。根据对含瓦斯煤岩各向同性假设,从图 2 中可知在钻孔抽采的初始阶段,瓦斯压力变化较大,瓦斯压力梯度较大;随着抽放时间的增长,含瓦斯煤岩中瓦斯压力降低。同时瓦斯压力变化逐渐减小。这说明在钻孔抽放的初始阶段,瓦斯抽放量很大,持续一段时间后,瓦斯抽放量将趋于稳定,该分布图与为文献 [17,18] 所模拟结果一致。

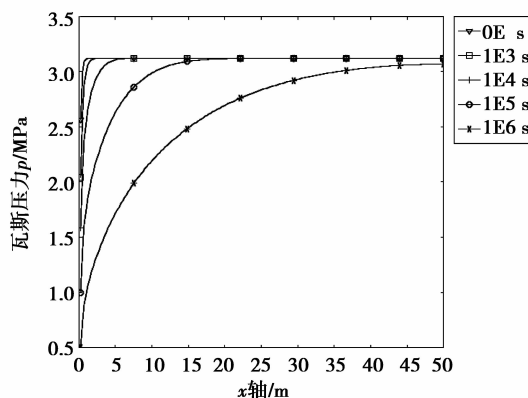


图 2 不同时间瓦斯压力分布

图 3 为相同时间内 ($t = 1E6 \text{ s}$) 不同的埋藏深度条件下,瓦斯压力分布图。从图 3 中可以看出,随着煤层埋藏深度的加深,上覆岩层的应力对抽放过程中煤层中瓦斯的流动的影响越来越明显。埋藏越深,煤层瓦斯越不容易抽放。这是因为:埋藏深度越深,上覆岩层产生的压应力增大,煤层孔隙被压缩,渗透率随之减小,抽放难度加大,瓦斯压力越不容易降低。

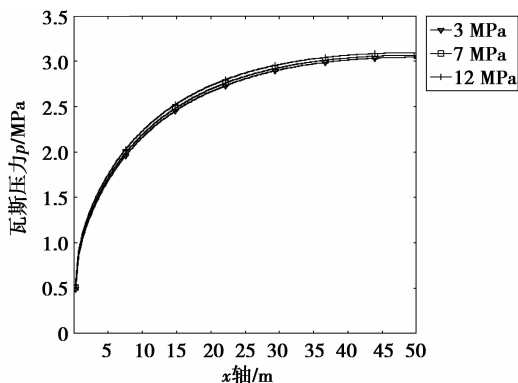


图 3 $t = 1E6 \text{ s}$ 时不同的压力条件下瓦斯压力分布

在现场实际瓦斯抽放的过程中,为了确定钻孔间距,需要确定有效抽放半径。钻孔的有效排放半径对正确设计抽放钻孔方法、数目以及抽放效果都具有重要的意义。其中钻孔抽放负压和钻孔半径是确定钻孔抽放有效半径的两个重要因素。图 4 为不同的抽放负压条件下(0.1、0.05、0.01 MPa)瓦斯压力分布图。从图 4 中可以看出经过相同的抽放时间后,不同的抽放负压条件下瓦斯压力的分布曲线几乎重合。这说明,不同的抽放负压对煤层中瓦斯压力的下降影响区别不大,因此抽放负压对有效抽放半径影响不明显。

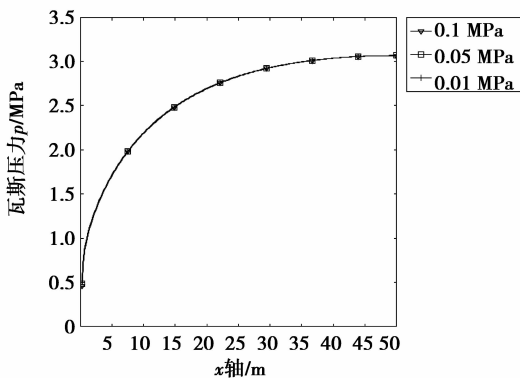


图 4 不同抽放负压条件下,瓦斯压力分布

图 5 为不同的抽放钻孔半径下(0.075、0.1、0.15 m),抽放半径与时间的关系图。根据《煤矿安全规程》2001 版第一百九十条规定抽放率应大于 30%。其中第 2 个有效性指标定为瓦斯压力小于 1 MPa。图 5 中可以得出:随着抽放时间的增加,抽放范围逐渐扩大,抽放半径随之增大。抽放半径与时间近似成幂指数关系。而对于不同的钻孔半径而言,钻孔半径越大,达到相同有效抽放半径的时间越短。钻孔抽放半径增大,抽放负压影响范围扩大,钻孔周围煤层卸压范围变大,煤层瓦斯渗透率变大。但是,在实践应用的过程中,由于含瓦斯煤层应力场的变化,引起钻孔变形进而堵塞钻孔。在实际工程应用中,可以根据图 5 有效抽放半径与时间关系来选择合理的钻孔间距和钻孔半径。

从图 3-5 中不难得出:在钻孔抽放瓦斯的过程中,埋藏深度钻孔抽放过程中的瓦斯压力的变化起着关键的主导作用。因此在工程实践,对于埋层深度较深的煤层,在瓦斯抽放的过程中,应采取一些增透措施来提高瓦斯的抽放效果。

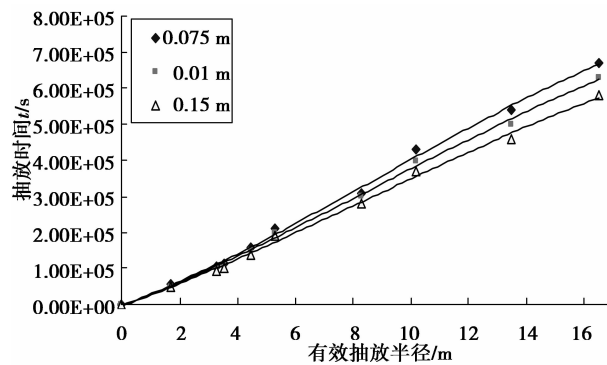


图 5 不同钻孔半径下有效抽放半径与时间的关系

3 结 语

从煤层瓦斯流动的基本假设出发,考虑到煤层瓦斯孔隙率,渗透率与体积应变、在钻孔抽放过程中,煤层瓦斯压力变化较为剧烈引起煤体骨架的变形的关系。利用流固耦合理论,推导出了含瓦斯煤层渗流-煤岩体变形控制方程。通过多物理场耦合软件,对与钻孔条件下煤层瓦斯压力变化进行了模拟分析。通过瓦斯压力分布图,得出了不同时间瓦斯压力变化图。从图中得出了在钻孔抽放瓦斯的初期,瓦斯抽放量较大,与实践相吻合。随着煤层开采深度的加深,上覆岩层产生的应力对煤层瓦斯的渗流影响越来越明显。通过对不同的压应力条件下钻孔抽放瓦斯进行分析,得出了其他条件相同下,煤层埋藏深度越深,瓦斯越不容易抽放。同时对不同抽放负压条件下,钻孔抽放瓦斯对瓦斯的压力影响变化做了分析研究。从模拟结果得出,抽放负压对钻孔抽放瓦斯的影响不明显。分析了不同的钻孔半径下,瓦斯的有效抽放半径与时间的关系。通过对比分析:埋藏深度是影响瓦斯抽放过程中瓦斯压力变化的主导因素。同时,在实际的工程应用中,可根据模拟得出的瓦斯压力分布图和有效抽放半径关系图,结合采掘时间和进度,合理的安排钻孔方式。

参考文献:

- [1] 鲜学福. 我国煤层气开采利用现状及其产业化展望[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2000, 23(3):1-5.
XIAN XUE-FU. The present situation of coal-bed methane mining and utilization in our country and looking forward to its industrialization[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23(3):1-5.
- [2] 丁厚成, 蒋仲安, 韩云龙. 顺煤层钻孔抽放瓦斯数值模拟与应用[J]. 北京科技大学学报, 2000, 30(11): 1205-1210.

- DING HOU-CHENG, JIANG ZHONG -AN, HAN YUN-LONG. Numerical simulation and application of boreholes along coal seam for methane drainage [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2000, 30(11):1205-1210.
- [3] 肖远见. 沿层钻孔周围瓦斯(真实气体)渗流压力方程及三维数值分析[J]. 矿业安全与环, 2004, 31(3): 41-43.
- XIAO YUAN-JIAN. Seepage pressure equation and three-dimensional numerical analysis of drilling along the layer of gas around the (real gas) [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2004, 31(3): 41-43.
- [4] 王锦山, 刘建军, 刘明远, 等. 煤层瓦斯流固耦合渗流的二维数值模拟[J]. 河北科技师范学院学报, 2004, 18(3):20-23.
- WANG JIN-SHAN, LIU JIAN-JUN, LIU MING -YUAN, et al. Numerical simulation of fluid-solid coupling seepage in coal seams gas [J]. Journal of Hebei Normal University of Science and Technology, 2004, 18(3):20-23.
- [5] 赵阳升, 秦惠增, 白其峥. 煤层瓦斯流动的固-气耦合数学模型及数值解法的研究[J]. 固体力学学报, 1994, 15(1):49-57.
- ZHAO YANG-SHENG, QIN HUI-ZENG, BAI QI-ZHENG. A mathematical model for solid-gas coupled problems on the methane flowing in coal seam [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1994, 15(1):49-57.
- [6] 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):135-196.
- LIANG BING, ZHANG MENG-TAO, WANG YONG-JIA. 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):135-196.
- [7] 徐剑良, 刘全稳, 赵庆波, 等. 煤层气流固耦合模型求解过程中的参数处理[J]. 天然气工业, 2006, 26(4): 86-88.
- 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]. Natural Gas Industry, 2006, 26(4):86-88.
- [8] 朱万成, 杨天鸿, 霍中刚, 等. 基于数字图像处理技术的煤层瓦斯渗流过程数值模拟[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1):18-23.
- ZHU WAN-CHENG, YANG TIAN-HONG, HUO ZHONG-GANG, et al. Numerical simulation on gas flow through coal seam based on digital image-based technique [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1):18-23.
- [9] CONNELL L D. Coupled flow and geomechanical processes during gas production from coal seams [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 79:18-28.
- [10] 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 GUANG -ZHI, WANG DENG-KE, ZHANG DONG-MING, 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.
- [11] 李志强, 鲜学福, 姜永东, 等. 地球物理场中煤层气渗流控制方程及其数值解[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5):3226-3233.
- LI ZHI-QIANG, XIAN XUE-FU, JIANG YONG -DONG, et al. Seepage control equation of coalbed methane in geophysical field and its numerical solutions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 3226-3233.
- [12] ZHOU Y, RAJAPAKSE R, GRAHAM J. A coupled thermo poroelastic model with thermo-osmosis and thermal-filtration [J]. International Journal of Solids and Structure, 1998, 35:18-23.
- [13] HU GUO-ZHONG, WANG HONG-TU, TAN HAI-XIANG, et al. Gas seepage equation of deep mined coal seams and its application [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 18(4):483-486.
- [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, 30(10): 419-426.
- LI PEI-CHAO, KONG XING-YAN, LU DE-TANG. Mathematical modeling of flow in saturated porous media on account of fluid-structure coupling effect [J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 30(10):419-426.
- [15] 卢平, 沈兆武, 朱贵旺, 等. 岩样应力应变全过程中的渗透性表征与试验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2002, 32(6):6782-6784.
- LU PING, SHENG ZHAO-WU, ZHU GUI-WANG, et al. Characterization of and experimental study on the permeability of rock-samples during complete stress-strain course [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2002, 32(6):6782-6784.
- [16] 孙培德. Sun 模型及应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.
- [17] 狄军侦. 应力作用下煤层气非稳定耦合渗流模型及数值模拟[J]. 中国煤田地质, 2007, 19(4):36-38.
- DI JUN-ZHEN. The seepage model and numerical simulation of coalbed gas unsteady coupled under stress [J]. Coal Geology of China, 2007, 19(4):36-38.
- [18] 孙培德. 多物理场耦合模型及数值模拟导论 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.