

DOI: 10.11779/CJGE201706008

基于结构异性比的含瓦斯煤渗透各向异性研究

亓宪寅^{1, 2}, 王 威^{1, 2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点试验室, 湖北 武汉 430071; 2. 长江大学岩土力学与工程研究中心, 湖北 荆州 434023)

摘 要: 渗透率是煤层气生产中的重要参数, 而原煤的结构异性导致其渗透率具有明显的方向性。假设煤体结构各向异性, 建立基于结构异性比的煤体各向异性渗透模型, 再进一步推导出瓦斯煤各向异性气-固耦合控制方程, 并植入 Comsol 计算平台, 系统研究了煤体各向异性对气体扩散和渗透的影响。理论和数值研究结果表明: 煤体结构异性比和平行层理方向渗透率与垂直层理方向渗透率的比值之间存在指数关系, 结构异性比越大, 则渗透率比值越大; 恒定围压条件下, 结构异性比随压力的增大而增大, 平行层理方向的渗透率与垂直层理方向的渗透率比值也在增大; 恒定围体条件下, 结构异性比随压力的增大而减小, 平行层理方向的渗透率与垂直层理方向的渗透率比值也在减小; 本文模型计算数据与渗透各向异性试验数据吻合度高, 验证了本文模型的合理性, 可适用恒定围岩应力、恒定储层体积等多种条件的渗透各向异性研究。

关键词: 含瓦斯煤; 结构异性比; 解吸附效应; 渗透模型; 各向异性; 气-固耦合

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)06 - 1030 - 08

作者简介: 亓宪寅(1986 -), 男, 博士研究生, 主要从事煤层气试验和数值仿真研究。E-mail: qixianyin001@163.com。

Anisotropic permeability model for coal containing methane based on anisotropic structure ratio

QI Xian-yin^{1, 2}, WANG Wei^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Research Center of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: The coal permeability is the key parameter for the gas seepage characteristics and the migration law, and the structural anisotropy of the coal seam makes the permeability have obvious orientation dependence. By assumeing that the coal structure is anisotropic, an anisotropic permeability model is deduced using anisotropic structure ratio for the key parameters, and the Comsol computing platform is implanted. The effects of coal anisotropy on gas diffusion and penetration are investigated. The theoretical and numerical results show that based on the comparative analysis of anisotropic permeability experiments, the proposed model is verified to be reasonable and used for different conditions. There is an exponential relationship between the anisotropic structure ratio and the permeability ratio of the parallel direction of bedding plane to the vertical direction, in other words, the larger the anisotropic structure ratio, the greater the permeability ratio of the parallel direction of bedding plane to the vertical direction. Under the constant confining pressure, with the increasing pressure, the anisotropic structure ratio and the permeability ratio of the parallel direction of bedding plane to the vertical direction increase. Under the constant confining volume, with the increasing pressure, the anisotropic structure ratio and the permeability ratio of the parallel direction of bedding plane to the vertical direction decrease.

Key words: coal containing methane; anisotropic structure ratio; adsorption; permeability model; anisotropy; gas-solid coupling

0 引 言

自然界中, 煤是一种典型的沉积岩, 其结构异性导致其渗透率具有典型的各向异性特征, 尤其在层理方向和节理方向上表现更为明显。1967 年, Pomeroy 等^[1]首次在试验中发现了在不同层理方向上煤的渗流

速度不同。Koenig 等^[2]指出, 煤层中平行层理面方向的渗透率相比垂直方向高达 17 倍之多。Gash 等^[3]认为层理和节理结构的存在导致煤体会受到方向性的压

缩或位移, 进而会导致渗透率的各向异性, 并在固定围压条件下的水渗试验中测得煤在层理、端割理、面割理 3 个方向上的渗透率均不相同。黄学满^[4]、岳高伟等^[5]分别进行了恒定围岩应力和恒定储层体积条件下的气体渗透率试验, 其试验结果表明, 煤体在层理和节理方向上渗透率表现出明显的方向性。虽然大量学者观察到了煤体渗透率的各向异性现象, 但是关于煤体渗透率的数学模型却大多是以煤体为各向同性体的假设前提进行研究的, 其侧重点在于考虑煤体的有效应力和吸附效应对于渗透率的影响。以 Seidle 等^[6]对于煤体自由膨胀状态下的吸附应变方程为基础, Shi 等^[7]将吸附应变转变成应力形式, 从应力的角度推导了煤的渗透率方程, 而 Palmer 等^[8]则结合立方定律从应变的角度推导了煤的渗透率方程, 后来学者也多以这两种模型为基础, 研究了煤在不同围压、不同气压或不同有效应力下的气体渗透特性。虽然这些模型均考虑了有效应力的压缩作用和吸附的膨胀作用, 都可以较好地吻合型煤的气体渗透率试验结果, 但是这些理论未考虑层理结构面的异性问题, 以及结构面导致的煤体宏观属性的横观各向同性, 自然也就不能反映煤体渗透率的方向性问题。

傅雪海等^[9]基于煤割理压缩试验, 建立了应力与割理宽度之间的数学模型, 但并未给出结构异性与煤体渗透率之间的定量关系。王端平等^[10]研究了岩石的方向性渗透率的矢量计算模型, 认为不能把两个不同方向上的渗透率矢量合成在一起而作为该合矢量所对应方向上的岩石渗透率, 也不能把渗透率矢量在某个方向上的投影作为该投影方向上的渗透率值。此外, 还推导建立了一种各向异性渗透率的定量计算模型, 据此, 可以计算出平面内任意方向上的岩石渗透率值。Gu 等^[11]则认为煤体是天然分割的岩体, 各方向所受到的有效应变 (effective strain) 不同, 开度的改变也不相同, 进而引起了各方向渗透率的不同。但是上述研究没有将煤体的结构异性与渗透特性很好地结合起来, 同时也没有考虑结构异性导致的煤宏观力学特性的各向异性, 而实际上煤体的结构异性将直接引起煤体渗透率的各向异性, 材料的宏观力学特性就反映了煤的材料属性及其不同方向的变形能力, 将二者综合考虑, 建立煤体结构异性比与渗透各向异性特征之间关系, 对于深入理解煤气-固耦合机理有着重要的理论和现实意义。本文将建立考虑各向异性的渗透模型, 并在此基础上, 提出煤气-固耦合模型, 利用 Comsol 计算平台, 数值分析了结构异性比、气体压力、渗透各向异性三者在气体运移中的变化规律, 为煤层瓦斯抽采钻孔的设计和布置, 提高抽采效果和实现抽采最

大化提供重要的理论指导。

1 基于煤体结构异性的渗透模型

1.1 煤体结构异性

大量的现场观测与试验数据证明: 煤体内存在相当数量的天然裂隙, 这些裂隙可分为层理、面割理和端割理 3 种形式, 模型结构示意图如图 1 所示, 其中 b_1 , b_2 , b_3 分别代表 x , y , z 方向节理开度 (m); s 为节理间距 (m)。通常来说层理开度 b_3 相对面割理开度 b_1 和端割理开度 b_2 更大, 面割理开度 b_1 和端割理开度 b_2 相差较小, 因此原始煤体中垂直层理方向的与平行层理方向的结构异同是造成煤体结构异性的主要原因, 可以定义煤体结构异性比如下所示:

$$b_1 : b_2 : b_3 = b : b : nb = 1 : 1 : n \quad (1)$$

式中, n 为煤体层理开度与割理开度之比, 即煤体结构异性比。

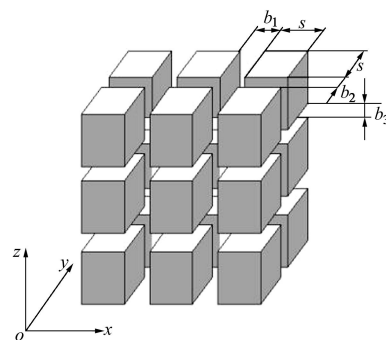


图 1 煤体结构示意图

Fig. 1 Diagram of coal structure

煤体的结构异性是导致煤体渗透各向异性的主要原因^[12], 本文将重点研究基于结构异性的各向异性渗透模型及其在气体运移过程中的变化规律。

1.2 基于煤体结构各向异性的渗透率模型推导

由于本文重点为描述煤体的结构异性对于渗透各向异性的影响, 因此本文将借鉴现有理论, 从应变角度推导煤体各向异性渗透模型。

(1) 渗透各向异性模型的发展

Palmer 等^[8]在 Seidle 等^[6]的基础上从应变的角度出发, 假设应变符合线弹性模型, 推导了恒定围岩应力条件下 (constant overburden stress) 的煤体渗透率模型, 其模型^[8]如下:

$$\frac{k}{k_0} = \left[1 + \frac{C_m}{\phi_0} (p - p_0) + \frac{\varepsilon_1}{\phi_0} \left(\frac{K}{M} - 1 \right) \left(\frac{bp}{1+bp} - \frac{bp_0}{1+bp_0} \right) \right]^3 \quad (2)$$

$$C_m = \frac{1}{M} - \gamma \left(\frac{K}{M} + f - 1 \right) \quad (3)$$

式中 k 为渗透率 (m^2), k_0 为初始渗透率 (m^2); φ_0 是初始孔隙率; ε_i 和 b 为吸附应变拟合参数; p 为孔隙内气体压力 (MPa); p_0 为初始气体压力 (MPa); K 为煤体弹性模量 (GPa); M 为压缩模量 (GPa); γ 为煤基质颗粒压缩系数; f 为取值 0~1 的修正系数。

此模型虽然考虑了有效应力和吸附效应对于煤体渗透率的影响, 但是其基本假设是基于煤体的结构和材料均是各向同性的, 因此在用于真实工程和室内试验实际情况时有较大的局限性。

刘继山等^[13]沿用了 P-M 模型的假设条件, 在此基础上更进一步, 推导了单轴应变条件下的煤体渗透模型, 方程如下:

$$\frac{k_x}{k_{x0}} = \frac{k_y}{k_{y0}} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{3(1-R_m)}{\varphi_{f0}(1-\nu)} \left[\frac{(p-p_0)(1+\nu)}{3K} - \frac{2\nu}{3} \Delta \varepsilon^s \right] \right\}^3 + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{3(1-R_m)}{\varphi_{f0}} \left[-\frac{1}{3} \Delta \varepsilon^s \right] \right)^3, \quad (4)$$

$$\frac{k_z}{k_{z0}} = \left[1 + \frac{3(1-R_m)}{\varphi_{f0}} \left[-\frac{1}{3} \Delta \varepsilon^s \right] \right]^3 \quad (5)$$

式中, k_x, k_y, k_z 分别为 x, y, z 三个方向的渗透率, k_{x0}, k_{y0}, k_{z0} 分别为 x, y, z 三个方向的初始渗透率 (m^2); R_m 为煤体模量损失比; ν 为煤体泊松比, K 为煤体体积模量 (GPa); $\Delta \varepsilon^s$ 为吸附引起的体应变变化量。

此模型相比 P-M 模型已经可以描述单轴应变条件下的渗透各向异性情况, 但其煤体结构模型仍然是各向同性的, 其仍然不能描述固定围岩位移边界等条件下的煤体渗透各向异性情况, 究其原因是上述模型并没有考虑煤体结构和力学特性的各向异性, 因此本文将从应变的角度出发, 基于煤体结构异性, 结合煤体宏观力学特性, 考虑力作用和吸附效应的适用于多种边界条件下的渗透各向异性模型。

(2) 渗透各向异性模型的推导

针对模型, 作如下假设: ①煤体作为双重介质模型来考虑, 裂隙系统中煤体层理开度与割理开度之比为 n ; ②裂隙系统为气体运移的主要场所, 基质系统为气体储存的主要场所, 同时忽略基质系统的渗透率对煤体整体渗透率的影响; ③煤体应变服从线弹性模型; ④煤体边界条件为恒定围岩应力条件和恒定储层体积条件 (constant overburden stress and constant reservoir volume); ⑤气体运移过程是等温变化过程, 气体黏度不发生改变。

假设中已提到将煤体作为双重介质模型来考虑, 因此基质块整体 (基质单元与裂隙单元组成的整体结构) 变形量 (ΔS_i) 应是基质单元的变形量 (ΔS_m) 与裂隙开度的变形量 (Δb_i) 之和, 且 $b_i < s$, 如图 2 所

示, 可令 $i=1, 2, 3$ 分别为 x, y, z 三个方向, 可以得到

$$\Delta b_i = \Delta S_i - \Delta S_m = (b_i + s) \frac{\Delta \sigma_e}{E_i} - s \frac{\Delta \sigma_e}{E_m} = b_i \left[1 + \frac{s}{b_i} \left(1 - \frac{E_i}{E_m} \right) \right] \frac{\Delta \sigma_e}{E_i} \approx b_i \left[\frac{s}{b_i} \left(1 - \frac{E_i}{E_m} \right) \right] \Delta \varepsilon_i^e, \quad (6)$$

式中, 下标 i 代表方向, b_i 为 i 方向裂隙开度 (m); s 为裂隙间距 (m); σ_e 为有效应力 (MPa); E_i 为煤体 i 方向的弹性模量 (GPa); E_m 为煤体基质单元的弹性模量 (GPa); $\Delta \varepsilon_i^e$ 为 i 方向煤体的有效应变增量。

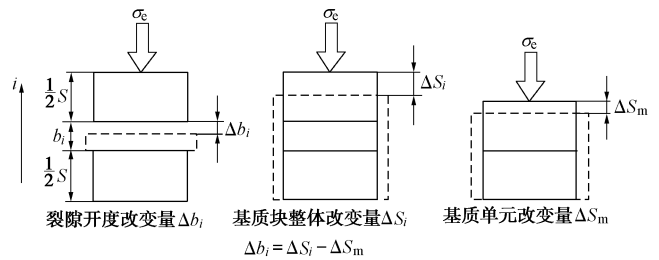


图2 裂隙开度变化示意图

Fig. 2 Schematic diagram of change of opening

同时, 根据图 2 中的空间关系, 参考 Liu 等^[13]关于开度与孔隙率的定义, 可以得到三维情况下:

$$\varphi_{f0} \approx \frac{b_1}{s} + \frac{b_2}{s} + \frac{b_3}{s} = (2+n) \frac{b}{s}. \quad (7)$$

煤体有效应变为煤体围岩应力产生的总应变与煤体吸附应变之差, 因此 i 方向煤体的有效应变增量可以定义为

$$\Delta \varepsilon_i^e = \Delta \varepsilon_i^t - \frac{1}{3} \Delta \varepsilon^s. \quad (8)$$

式中 $\Delta \varepsilon_i^t$ 为 i 方向煤体的应变; $\Delta \varepsilon^s$ 为解、吸附引起的体应变变化量, 需要注意的是本文假设煤体为横观各向同性材料, 其宏观力学性质是由结构面决定的, 但是基质单元是各向同性材料, 解、吸附引起的应变也是各向同性的, 只考虑吸附引起的正应变。

如图 1 所示, 假设有 3 组互相垂直的裂隙, 则在 i 方向上的渗透率与其互相垂直的两组裂隙有关。根据魏明尧^[14]的计算方法, 可以得到各坐标轴方向的渗透率公式如下所示:

$$\begin{cases} \frac{k_x}{k_{x0}} = \frac{(b_2 + \Delta b_2)^3 + (b_3 + \Delta b_3)^3}{b_2^3 + b_3^3}, \\ \frac{k_y}{k_{y0}} = \frac{(b_1 + \Delta b_1)^3 + (b_3 + \Delta b_3)^3}{b_1^3 + b_3^3}, \\ \frac{k_z}{k_{z0}} = \frac{(b_1 + \Delta b_1)^3 + (b_2 + \Delta b_2)^3}{b_1^3 + b_2^3}. \end{cases} \quad (9)$$

联立式 (1)、(6)、(7)、(8)、(9) 可以得到各坐标轴方向的煤体渗透各向异性方程为

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{k_x}{k_{x0}} = \frac{k_y}{k_{y0}} = \frac{1}{1+n^3} \left[1 + \frac{(2+n) \left(1 - \frac{E_1}{E_m} \right)}{\varphi_{f0}} \left(\Delta \varepsilon_1^t - \frac{1}{3} \Delta \varepsilon^s \right) \right]^3 + \\ \frac{n^3}{1+n^3} \left[1 + \frac{(2+n) \left(1 - \frac{E_3}{E_m} \right)}{n\varphi_{f0}} \left(\Delta \varepsilon_3^t - \frac{1}{3} \Delta \varepsilon^s \right) \right]^3 \\ \frac{k_z}{k_{z0}} = \left[1 + \frac{(2+n) \left(1 - \frac{E_1}{E_m} \right)}{\varphi_{f0}} \left(\Delta \varepsilon_1^t - \frac{1}{3} \Delta \varepsilon^s \right) \right]^3 \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式(10)中 i 方向煤体的有效应变增量有两部分组成: 一部分为煤体 i 方向的总应变, 这是由煤体所受的边界条件决定的; 另一部分为煤体解、吸附产生的应变, 这是由气体压力决定的。 n 为煤体结构异性比。 $n=1$ 即裂隙各方向开度相等, 此时煤体结构和宏观力学特性都是各向同性的, $n>1$ 即层理开度大于割理开度, 此参数只取决于确定边界条件下的煤体本身的结构。

对于式(10)中边界条件的设置或气体压力的变化都离不开气体在煤中的运移过程, 而这一过程是应力场、渗流场相互作用的, 因此下一节将着重讨论含瓦斯煤—固耦合过程。

1.3 含瓦斯煤—固耦合模型

气体在煤体中的运移大体可分为两个过程: ①基质系统内孔隙及内表面作为瓦斯储存的场所, 瓦斯通过解吸(吸附)—扩散过程进入裂隙系统, 此时可将基质看做质量源; ②现有大多研究认为裂隙系统内煤体裂隙较大, 气体的流动为层流运动, 因此气体运动遵循达西定律。

(1) 应力场控制方程

参考 Coussy^[15]对于各向异性孔隙介质的本构模型的研究, 煤体本构模型可写作如下形式:

$$\sigma_{ij}^e = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} - \frac{1}{3} C_{ijkl} \varepsilon^s \delta_{kl}, \quad (11)$$

同样的可以得到应变与应力的关系:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} - \frac{1}{3} S_{ijkl} b_{kl} p \delta_{kl} + \frac{1}{3} \varepsilon^s \delta_{ij}. \quad (12)$$

式中 σ_{ij}^e 为有效应力张量; σ_{ij} 为总应力张量; ε_{ij} 为总应变张量; ε^s 为解、吸附引起的体应变; $[b_{ij}]$ 为 Biot 系数, 对于有效应力系数的研究不是本文的重点, 此处取值 1; δ_{ij} 为 Kronecker 符号, $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$, $i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$; C_{ijkl} 为刚度矩阵, S_{ijkl} 为柔度矩阵, 二者互为逆矩阵, 当煤体为横观各向同性体时, 假设其弹性对称面分别平行与笛卡尔坐标系平面, 再假设煤体在 xy 平面内是各向同性的, 同时此平面与煤体的层理

面平行, 可定义平行层理方向弹性模量与泊松比为 E_1 和 ν_1 , 垂直层理方向弹性模量、泊松比和剪切模量为 E_3 , ν_3 和 G_3 。

煤体的运动平衡方程为

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = 0, \quad (13)$$

考虑有效应力时,

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^e + p \delta_{ij}, \quad (14)$$

因此运动平衡方程可变为

$$\frac{\partial \sigma_{ij}^e}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i = 0. \quad (15)$$

应变张量用位移张量表示时, 即

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (16)$$

联立式(12)、(15)、(16)可得 Navier 形式的煤体变形控制方程如下:

$$\frac{1}{2} C_{ijkl} (u_{k,li} + u_{l,ki}) = \frac{1}{3} C_{ijkl} \varepsilon_{,i}^s - p_{,i} - f_i. \quad (17)$$

Harpalani 等^[16]在研究煤体吸附变形时, 采用了类似于 Langmuir 方程形式进行拟合给出了与试验数据拟合精度较高的吸附体积应变方程:

$$\varepsilon^s = \frac{\varepsilon_L p}{p_L + p}, \quad (18)$$

式中, ε_L 和 p_L 为应变 Langmuir 曲线的相关参数, p_L 单位为 Pa; p 为气体压力 (Pa)。

将式(18)代入式(17), 可以得到

$$\frac{1}{2} C_{ijkl} (u_{k,li} + u_{l,ki}) = \frac{1}{3} C_{ijkl} \frac{\varepsilon_L p_L}{(p_L + p)^2} p_{,i} - p_{,i} - f_i, \quad (19)$$

式中, 等式左边为 i 方向煤体的位移, 右边第一项为 i 方向解、吸附应变, 第二项为 i 方向气体压力引起的应变。式(19)即煤体变形控制方程

(2) 渗流场控制方程

煤体内发达的裂隙构成了连通的裂隙网络, 是瓦斯进行流动的主要空间。裂隙系统内瓦斯以游离态存在, 煤体裂隙系统内的单位体积气体浓度为

$$C = \rho \varphi_f + (1 - \varphi_f) \rho_g \rho_s \frac{V_L p_f}{p_L + p_f}. \quad (20)$$

式中 C 为基于煤体体积的气体密度 (kg/m^3); ρ 为裂隙内游离气的气体密度 (kg/m^3); ρ_g 为大气压力下的气体密度 (kg/m^3); ρ_s 为煤体的密度 (kg/m^3); C_m 为基质内的气体吸附量 (m^3/kg); V_L 为最大吸附体积常数。

为计算方便, 将 ρ , ρ_g , C 换算成压力形式, 即

$$\rho = \frac{p_f M}{RT}, \quad (21)$$

式中, M 为理想气体的摩尔质量 (kg/mol); R 为气体

常数 $J/(K \cdot \text{mol})$; T 为煤体内的温度 (K)。

因此煤体内气体浓度可以用压力表示为

$$C = \frac{p_f M}{RT} \varphi_f + (1 - \varphi_f) \rho_s \frac{p_a M}{RT} \frac{V_L p_f}{p_L + p_f} \quad (22)$$

瓦斯在裂隙系统内是层流运动, 符合 Darcy 定理的渗流规律, 因此裂隙系统内气体连续性方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (23)$$

$$\bar{u} = -\frac{k_f}{\mu} \nabla p_f \quad (24)$$

式中 $\bar{u}$ 为裂隙中气体的达西速度 (m^2/s); K_f 为煤体渗透率 (m^2); μ 为表气体黏度系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

因此联立式 (22) ~ (24) 即可得到

$$\frac{\partial(p_f \varphi_f)}{\partial t} + \frac{\partial \left[(1 - \varphi_f) \rho_s p_a \frac{V_L p_f}{p_L + p_f} \right]}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(-\frac{k_f}{\mu} p_f \nabla p_f \right) \quad (25)$$

式 (25) 即为煤体中渗流场控制方程。式 (10)、(19)、(25) 共同组成含瓦斯煤气—固耦合控制方程, 由于所得方程组为偏微分方程组, 无法求得其解析解。因此, 本文基于 Comsol 计算平台对其数值求解。

2 数值求解

2.1 边界条件

根据式 (10) 得到, 煤体渗透率的演化受边界条件的控制, 本文中将讨论恒定围岩应力条件和位移控制条件两种条件下的渗透特性, 与岳高伟等^[5]和黄学满等^[4]进行不同节理方向渗透试验数据作对比, 验证本文提出的模型的合理性。

(1) 恒定围岩应力

恒定围岩应力条件下, $\Delta \sigma_x = \Delta \sigma_y = \Delta \sigma_z = 0$, 可以得到以下关系:

$$\Delta \varepsilon_x^e = \Delta \varepsilon_y^e = \left(\frac{1 - \nu_1}{E_1} - \frac{\nu_3}{E_3} \right) (p - p_0) \quad (26)$$

$$\Delta \varepsilon_z^e = \left(\frac{1 - 2\nu_3}{E_3} \right) (p - p_0) \quad (27)$$

将式 (26)、(27) 代入式 (10) 即可得到恒定围岩应力条件下的渗透各向异性方程:

$$\frac{k_x}{k_{x0}} = \frac{k_y}{k_{y0}} = \frac{\left[1 + \frac{(2+n)}{\varphi_{f0}} \left(1 - \frac{E_1}{E_m} \right) \left(\frac{1 - \nu_1}{E_1} - \frac{\nu_3}{E_3} \right) (p_0 - p) \right]^3}{1 + n^3} + \frac{n^3 \left[1 + \frac{(2+n)}{n\varphi_{f0}} \left(1 - \frac{E_3}{E_m} \right) \left(\frac{1 - 2\nu_3}{E_3} \right) (p_0 - p) \right]^3}{1 + n^3} \quad (28)$$

$$\frac{k_z}{k_{z0}} = \left[1 + \frac{(2+n) \left(1 - \frac{E_1}{E_m} \right)}{\varphi_{f0}} \left(\frac{1 - \nu_1}{E_1} - \frac{\nu_3}{E_3} \right) (p_0 - p) \right]^3 \quad (29)$$

式 (28)、(29) 即恒定围岩应力条件下含瓦斯煤气—固耦合方程中的渗透率方程形式, 其求解结果将在下文讨论。

(2) 位移控制边界

位移控制边界条件即固定煤体体积时, $\Delta \varepsilon_x^t = \Delta \varepsilon_y^t = \Delta \varepsilon_z^t = 0$, 由式 (10) 可以得到

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{k_x}{k_{x0}} = \frac{k_y}{k_{y0}} = \frac{1}{1 + n^3} & \left[1 + \frac{\left(1 - \frac{E_1}{E_m} \right) \left(-\frac{1}{3} \Delta \varepsilon^s \right)}{\frac{\varphi_{f0}}{(2+n)}} \right]^3 + \\ & \frac{n^3}{1 + n^3} \left[1 + \frac{(2+n) \left(1 - \frac{E_3}{E_m} \right) \left(-\frac{1}{3} \Delta \varepsilon^s \right)}{n\varphi_{f0}} \right]^3, \quad (30) \\ \frac{k_z}{k_{z0}} = \left[1 + \frac{(2+n) \left(1 - \frac{E_1}{E_m} \right)}{\varphi_{f0}} \left(-\frac{1}{3} \Delta \varepsilon^s \right) \right]^3 \end{aligned} \right.$$

式 (30) 即位移控制边界条件下含瓦斯煤气—固耦合方程中的渗透率方程形式, 其求解结果将在下文讨论。

2.2 模型参数

耦合模型中各参数见表 1。

表 1 模型所需参数

Table 1 Model parameters

参数	定义及单位	QF 煤对应 参数值	WY 煤对 应参数值
μ	气体的动力黏度系数(Pa/s)	1.84×10^{-5}	1.84×10^{-5}
ρ_s	煤的密度(kg/m^3)	1450	1250
ρ_g	大气气体密度(kg/m^3)	0.717	0.717
p	Langmuir 吸附常数(Pa)	7.75×10^5	7.75×10^6
V_L	最大吸附体积常数	0.013	0.088
ε_1	最大吸附体积应变常数	0.017	0.03
φ_{f0}	初始孔隙率	0.023	0.055
E_1	平行层理方向弹性模量(GPa)	0.98	0.9
E_3	垂直层理方向弹性模量(GPa)	0.16	0.12
E_m	基质弹性模量(GPa)	5	4
ν	泊松比	0.32	0.3

参数引自岳高伟等^[5]、黄学满^[4]渗透试验。煤样分别取自潘北气肥煤(QF)、贵州龙宫无烟煤(WY)。模拟过程为煤层气体吸附过程, 模型为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 立方体, 结构示意图如图 3 所示。渗流场中除上表面压力恒定为 $p_a = 2.5 \text{ MPa}$, 其他边界无流动, 渗流场内初始气体压力为 0.5 MPa , 渗透率监测点为模型中心位置。

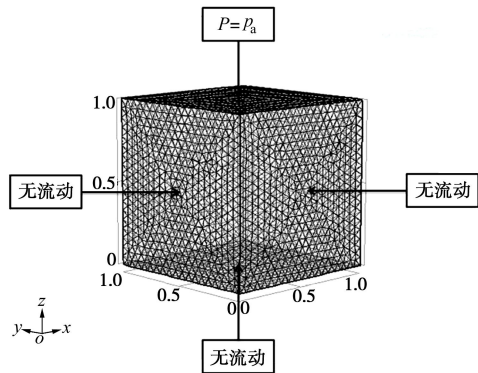


图 3 模型示意图

Fig. 3 Diagram of model

同时为简化计算, 下文中潘北气肥煤气压 0.5 MPa 下, 煤体坐标轴方向初始渗透率 $k_{x0}=1.45\times10^{-16}\text{ m}^2$, $k_{z0}=3.47\times10^{-17}\text{ m}^2$, 初始结构异性比为 1.95; 龙宫无烟气压 0.5 MPa 下, 煤体坐标轴方向初始渗透率 $k_{x0}=1.46\times10^{-17}\text{ m}^2$, $k_{z0}=1.23\times10^{-17}\text{ m}^2$, 初始结构异性比为 2.84; 相关的割理结构尺寸 b_i 如图 1 所示。

恒定围压与恒定体积边界条件示意图如图 4、5 所示。恒定围压条件即模拟过程应立加载时模型四面同时加载相同应力, 同时开始注气过程。恒定体积边界条件表示煤体总体积不变, 即煤体四周边界位移固定, 模拟过程中全过程边界位移固定, 同步进行注气过程, 监测模型中心点位置的气体压力与渗透率变化情况。

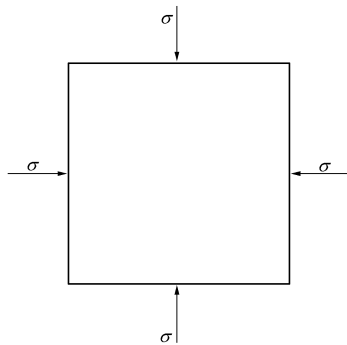


图 4 恒定围压边界条件示意图

Fig. 4 Constant confining stress

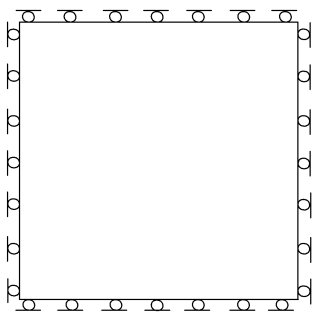


图 5 恒定体积边界条件示意图

Fig. 5 Constant volume

2.3 模型计算结果与验证

(1) 结构异性比与气体压力的规律分析

前文中已经提到结构异性比 n 是气体压力 p 下层理开度与割理开度之比, 因此气体运移过程中, 随压力变化, 其结构异性比也是不断变化的, 根据式 (10) 可以得到以下结论:

假设煤体割理开度相同, 层理开度与割理开度不同, 则煤体结构异性比可通过不同节理方向的渗透率反推得到, 结构异性比越大, 则垂直层理方向渗透率与平行层理方向渗透率之比越小。

结构异性比越大, 则层理开度对于平行层理方向的渗透率贡献越大, 割理开度的贡献则越小, 而垂直层理方向的渗透率则和结构异性比无关系。

潘北气肥煤试验与模拟结构异性比变化趋势如图 6 所示, 试验渗透率反推得到结构异性比 n 呈明显增大趋势, 本文模型计算得到的结构异性比呈现类指数的增大趋势, 这是因为在恒定围岩压力条件下, 气体压力的力作用是决定渗透率改变的关键因素, 垂直层理方向模量要小于平行层理的煤体模量, 进而力作用引起的层理开度的应变变量要大于割理开度的应变变量, 但是随气体压力的增加, 力作用引起的应变增量变化率在减小, 相应的层理开度的减小速率在要小于割理开度的减小速率, 因此恒定围压条件下, 结构异性比随压力的增大而增大, 平行层理方向的渗透率与垂直层理方向的渗透率比值也在增大。

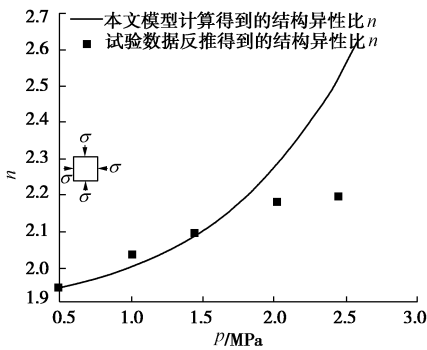


图 6 潘北气肥煤试验与模拟结构异性比变化趋势图

Fig. 6 Changing trend of test and simulated anisotropic structure ratios of QF coal

龙宫无烟煤试验与模拟结构异性比变化趋势如图 7 所示, 试验渗透率反推得到结构异性比 n 呈逐渐减小趋势, 而本文模型计算得到的结构异性比也呈现小幅减小趋势, 理论上来说在恒定体积条件下, 相同气体压力下, 煤体各方向的吸附效应相同, 即基质的膨胀应变相同, 但层理开度的应变增量小于割理开度的应变增量, 随气体压力的增大, 吸附速度减慢, 则吸附引起的基质膨胀应变变化速率也在减慢, 相应的层

理开度的应变增量变化率也要小于割理开度的应变增量变化率,则层理开度的减少量要小于割理开度的减少量,因此结构异性比在恒定体积条件下随气体压力增大呈逐渐减小趋势。

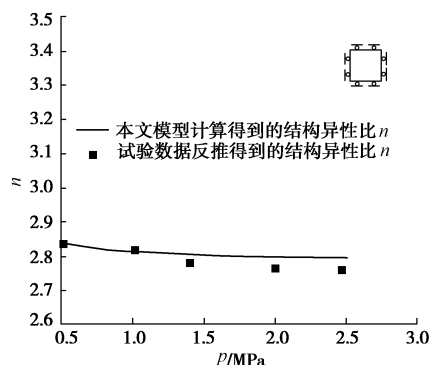


图7 龙宫无烟煤试验与模拟结构异性比变化趋势图

Fig. 7 Changing trend of test and simulated anisotropic structure ratios of WY coal

(2) 模型与试验数据验证

采用上述模拟相关参数,代入本文推导的渗透模型和刘继山推导的渗透率模型,得到的渗透率数据将分别与岳高伟等^[5]恒定围岩应力条件下煤不同节理渗透率试验数据与黄学满^[4]恒定体积条件下煤不同节理渗透率试验数据拟合,以验证两种模型的适用性。

潘北气肥煤试验与模拟渗透率变化趋势如图8所示,恒定围岩应力条件下,本文推导的渗透各向异性模型,当煤体结构异性比 $n=1.95$ 即层理开度与割理开度之比为1.95时,在平行层理方向和垂直层理方向的渗透率上,本文推导模型经计算所得数据与岳高伟试验中的渗透率数据吻合度较高,而刘继山模型只能反映单轴应变下渗透各向异性情况,在恒定围岩应力条件下,其不同层理方向的渗透率在相同气体压力下是相同的,因此其数据不能较好吻合岳高伟等渗透试验数据。从渗透率的方向性来说,岳高伟等试验与本文的渗透模型,均反映了煤体不同层理方向上渗透率的各向异性情况,这是由于煤体本身是非均质材料,其在结构上必然是各向异性的,具体即表现为节理开度的不同,而节理开度不同自然导致渗透率的不同,本文的模型本身基于结构异性比,自然其计算结果也能反映渗透的各向异性情况;从渗透率变化趋势来说,岳高伟等试验与本文的渗透模型,随气体压力的增大,平行层理方向的渗透率 k_x 和垂直层理方向的渗透率 k_z 逐渐减小,且 k_x 和 k_z 的变化速率越来越小,这是因为气体压力逐渐增大,基质吸附气体膨胀,裂隙开度减小,渗透率自然降低,同时气体吸附速度逐渐变慢,相应的裂隙开度变化速率也将减小,即渗透率变化速率也在降低。

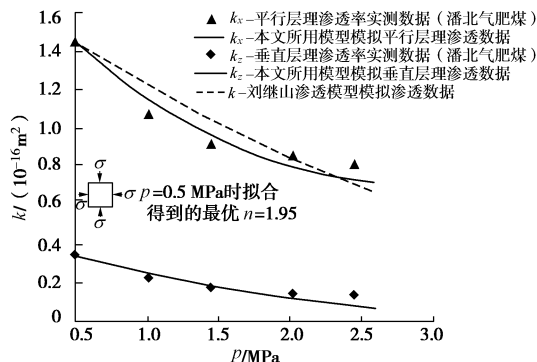


图8 潘北气肥煤试验与模拟渗透率变化趋势图

Fig. 8 Changing trend of test and simulated permeabilities of QF coal

龙宫无烟煤试验与模拟渗透率变化趋势如图9所示,恒定体积条件下,本文推导的渗透各向异性模型,当煤体结构异性比 $n=2.84$ 时,本文模型代入黄学满试验中相关参数后, k_x 和 k_z 与试验中测得的渗透率数据拟合程度较高,而刘继山模型在采用黄学满试验中相关参数后,渗透率计算结果仍有差距,同时也不能反映出此条件下不同层理方向的渗透率差异情况;从渗透率变化趋势来说,气体压力升高,煤体吸附气体膨胀,裂隙开度减小,渗透率逐渐降低,两种模型均能反映此种趋势,但本文模型在不同节理方向上均更好地吻合了黄学满渗透试验中的渗透率变化趋势。

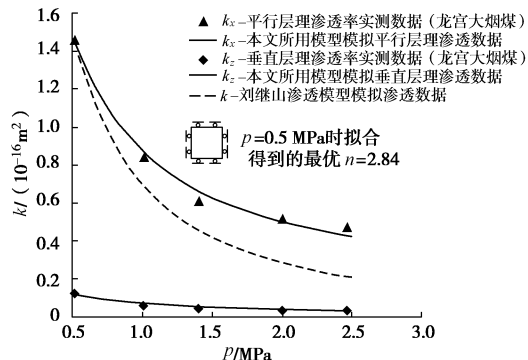


图9 龙宫无烟煤试验与模拟渗透率变化趋势图

Fig. 9 Changing trend of test and simulated permeabilities of WY coal

由于本文模型考虑了结构异性比对于渗透率的影响,通过拟合两种试验条件下的渗透率数据,可以看到本文的渗透模型均能较好地反映不同节理方向的渗透率异同及变化趋势,相对刘继山模型在渗透各向异性问题上适用范围上也更广。综上所述,本文的模型是合理的。

3 结 论

本文基于煤体的结构异性,假设煤体为横观各向同性体,建立了煤体各向异性渗透模型,在此基础上,推导出含瓦斯煤的气-固耦合控制方程,并植入

Comsol 计算平台,系统研究了煤体各向异性对气体扩散和渗透的影响,得到以下4点结论。

(1) 煤体结构性比值和平行层理方向渗透率与垂直层理方向渗透率的比值之间存在指数关系,结构性比值越大,则渗透率比值越大。

(2) 恒定围压条件下,结构性比值随压力的增大而增大,平行层理方向的渗透率与垂直层理方向的渗透率比值也在增大。

(3) 恒定围体积条件下,结构性比值随压力的增大而减小,平行层理方向的渗透率与垂直层理方向的渗透率比值也在减小。

(4) 通过与渗透各向异性试验数据对比分析,验证了本文模型的合理性,可适用恒定围岩应力、恒定储层体积等多种条件的渗透各向异性研究。

本文建立的基于结构性比值的含瓦斯煤渗透模型,将进一步的结合煤层气开采实例,在后续论文中从工程应用的角度阐述本文模型的合理性。

参考文献:

- [1] POMEROY C D, ROBINSON D J. The effect of applied stresses on the permeability of a middle rank coal to water[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1967, **4**(3): 329 - 343.
- [2] KOENIG R A, STUBBS P B. Interference testing of a coalbed methane reservoir[C]// SPE Unconventional Gas Technology Symposium. Society of Petroleum Engineers, 1986.
- [3] GASH B W, RICHARD F V, POTTER G, et al. The effects of cleat orientation and confining pressure on cleat porosity, permeability and relative permeability in coal[C]// SPWLA/SCA Symposium, Oklahoma City, 1992.
- [4] 黄学满. 煤结构性对瓦斯渗透特性影响的实验研究[J]. 矿业安全与环保, 2012, **39**(2): 1 - 3. (HUANG Xue-man. Experimental study on influence of structural anisotropy of coal upon gas permeability[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2012, **39**(2): 1 - 3. (in Chinese))
- [5] 岳高伟, 王 辉, 赵 宇, 等. 结构性煤体渗透率特性[J]. 科技导报, 2015, **33**(12): 50 - 55. (YUE Gao-wei, WANG Hui, ZHAO Yu, et al. Permeability characteristics of structurally anisotropic coal[J]. Science & Technology Review, 2015, **33**(12): 50 - 55. (in Chinese))
- [6] SEIDLE J P, HUITT L G. Experimental measurement of coal matrix shrinkage due to gas desorption and implications for cleat permeability increases[C]// SPE.1995.-30010-MS.
- [7] SHI J Q, DURUCAN S. Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: a new interpretation of the reservoir response to primary recovery[J]. Transport in Porous Media 2004, **56**: 1 - 16.
- [8] PALMER I, MANSOORI J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: a new model[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 1996.
- [9] 傅雪海, 秦 勇, 姜 波, 等. 煤割理压缩试验及渗透率数值模拟[J]. 煤炭学报, 2001, **26**(6): 573 - 577. (FU Xue-hai, QIN Yong, JIANG Bo, et al. Compression experiment of coal cleat and mathematical simulation of coal reservoir permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2001, **26**(6): 573 - 577. (in Chinese))
- [10] 王端平, 周涌沂, 马泮光, 等. 方向性岩石渗透率的矢量特性与计算模型[J]. 岩土力学, 2005, **26**(8): 1294 - 1297. (WANG Duan-ping, ZHOU Yong-yi, MA Pan-guang, et al. Vector properties and calculation model for directional rock permeability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(8): 1294 - 1297. (in Chinese))
- [11] GU F, CHALATURNYK R. Permeability and porosity models considering anisotropy and discontinuity of coalbeds and application in coupled simulation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, **74**(3/4): 113 - 131.
- [12] 祝 捷, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 考虑吸附作用的各向异性煤体有效应力[J]. 中国矿业大学学报, 2010, **39**(5): 699 - 704. (ZHU Jie, JIANG Yao-dong, ZHAO Yi-xin, et al. Effective stress of anisotropic coal considering adsorption[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, **39**(5): 699 - 703. (in Chinese))
- [13] LIU J S, ELSWORTH D, BRADY B H. Linking stress dependent effective porosity and hydraulic conductivity fields to RMR[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, **36**: 581 - 596.
- [14] 魏明尧. 含瓦斯煤体气固耦合渗流机理及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013. (WEI Ming-yao. Study of gas-solid coupling seepage flow in coal containing methane and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2013. (in Chinese))
- [15] COUSSY O. Poromechanics[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 2004: 71 - 112.
- [16] HARPALANI S, SCHRAUFNAGEL R A. Shrinkage of coal matrix with release of gas and its impact on permeability of coal[J]. Fuel, 1990, **69**(5): 551 - 556.