

考虑基质多尺度扩散的双孔隙介质模型

阴昊阳¹, 许石青^{1*}, 郑连军²

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州天筹质量技术检测中心有限公司, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 基于煤层瓦斯运移的多尺度扩散效应, 根据变直径毛细管物理模型, 通过压汞实验、低温液氮和二氧化碳吸附实验对贵州某矿 7[#] 煤层煤样的孔径分布进行测定, 通过 Knudsen 方程得出不同扩散方式的临界直径, 从而得出不同扩散方式所占比例, 提出考虑多种扩散方式的有效扩散系数. 建立了考虑多尺度扩散、Klinkenberg 效应、基质收缩和有效应力的双孔隙介质耦合模型, 利用多物理场耦合软件对煤层瓦斯钻孔抽采情况进行了数值模拟研究, 分析了新模型条件下钻孔抽采煤基质和煤裂隙中的瓦斯压力分布以及瓦斯扩散速度和瓦斯渗流速度的差异, 得出煤层瓦斯钻孔抽采情况下的运移规律. 通过在井下打穿层钻孔进行瓦斯抽采, 测量每天的瓦斯流速和流量, 将现场测得的瓦斯流速和流量与数值模拟结果做对比, 得出所建立的双孔隙介质模型符合工程实际的要求, 为深煤层开采瓦斯防治提供参考.

关键词: 多尺度机理; 瓦斯扩散; 双孔隙介质模型; 数值模拟

中图分类号: X936 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2021)01-0062-09

Dual Porosity Medium Model Considering Multi-scale Diffusion of Matrix

YIN Haoyang¹, XU Shiqing¹, ZHENG Lianjun²

(1. College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Tianqian Quality Technology Testing Center Co., Ltd, Guiyang 550000, China)

Abstract: Based on the multi-scale diffusion effect of coal seam gas migration, according to the variable diameter capillary physical model, through mercury injection experiment, low temperature liquid nitrogen adsorption and CO₂ adsorption experiment, the pore size distribution of coal samples in No.7 coal seam of a mine in Guizhou Province is measured. The critical diameter of different diffusion modes is obtained by Knudsen equation, and the proportion of different diffusion modes is obtained. The effective diffusion considering multiple diffusion modes is proposed coefficient. A dual porosity medium considering multi-scale diffusion, Klinkenberg effect, matrix shrinkage and effective stress is established. The numerical simulation of coal seam gas drainage by drilling is carried out by using multi-scale physical field coupling software. The gas pressure distribution in matrix and coal fissure, gas diffusion velocity and gas diffusion velocity are analyzed. According to the difference of gas seepage velocity, the migration law of coal seam gas under the condition of borehole drainage is obtained. The gas flow rate and flow rate of each day are measured by drilling through the layer under the mine for gas drainage. The gas flow rate and flow rate measured under the mine are compared with the numerical simulation results. It is concluded that the established double porosity medium model meets the actual requirements of the project, which provides a reference for gas prevention and control in deep coal seam mining.

Keywords: multi-scale mechanism; gas diffusion; dual porosity medium model; numerical simulation

随着我国煤炭资源的开发和利用,煤层开采深度也向更深一步迈进^[1].深部煤层普遍具有瓦斯压力大、瓦斯解吸速度快、瓦斯含量大等特点,瓦斯治理工作难以开展,成为制约煤矿开采和井下人员安全的首要难题^[2-5].瓦斯抽采是矿井瓦斯防治和瓦斯开发利用的主要手段,因此研究瓦斯抽采过程中的煤层瓦斯的运移规律对矿井瓦斯防治和瓦斯开发利用具有重要意义.

关于煤层瓦斯运移前人已做了大量的工作.梁冰^[6]建立了瓦斯抽采的流固耦合模型,考虑了煤岩体变形及多孔介质中瓦斯的吸附解吸对渗流特性的影响;尹光志^[7]通过引入瓦斯吸附膨胀应力参数,建立了考虑骨架可变形性和气体可压缩性的固气耦合动态模型;刘佳佳^[8]综合考虑了有效应力和解吸收缩对煤体变形及渗流特性的影响,建立了流固耦合模型,对考虑 Klinkenberg 效应与不考虑 Klinkenberg 效应做了对比研究;赵忠明^[9]基于瓦斯渗流理论,得出钻孔流量与时间的近似关系式,得出抽采负压、钻孔布置对钻孔流量的影响规律.Liu^[10]综合考虑瓦斯运移过程中的扩散和渗流作用,提出了一种基于 P-M 模型的孔隙度和渗透率模型.张波^[11,12]分别从不同渗透率模型和不同布孔参数对煤层瓦斯抽采效果进行了研究.Wang^[13]基于煤中割理系统的瓦斯流动是非达西性质的假设下,建立了煤的形成、裂缝中的非达西流动和煤基质中气体扩散的全耦合有限元模型.

前人的研究多是假设瓦斯在煤基质的扩散符合 Fick 扩散,忽略了瓦斯在不同尺度孔隙中的扩散.本文在双重孔隙度模型的基础上,考虑了煤基质瓦斯的多种尺度扩散效应,提出了考虑多种扩散方式的有效扩散系数,建立了考虑多尺度扩散的多场耦合模型,同时考虑了有效应力、基质收缩以及 Klinkenberg 效应,为煤层瓦斯运移及瓦斯治理提供参考.

1 煤层瓦斯多尺度扩散特性

1.1 瓦斯在多尺度孔隙中的扩散方式差异

由于煤中孔隙具有多尺度的特点,煤基质中瓦斯发生的扩散行为包含 Fick 扩散、Knudsen 扩散和过渡扩散等多种扩散方式,瓦斯在煤体中不同扩散方式由 Knudsen 数划分:

$$K_n = \frac{\lambda}{d}. \quad (1)$$

式中: K_n 为 Knudsen 数; λ 为气体分子的路径长度,m; d 为孔隙平均直径,m.

各类扩散方式的划分及扩散系数如表 1 所示^[14].

表 1 扩散方式的划分及扩散系数

K_n 范围	表达式	流动形式
$0.01 < K_n < 0.1$	$D_{\text{Fick}} = \frac{\kappa_b T}{6\pi\mu r}$	Fick 扩散
$0.1 < K_n < 10$	$\frac{1}{D_{\text{transition}}} = \frac{1}{D_{\text{Knudsen}}} + \frac{1}{D_{\text{Fick}}}$	过渡扩散
$K_n > 10$	$D_{\text{Knudsen}} = \frac{2r}{3} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{0.5}$	Knudsen 扩散

表中: D 为扩散系数, m^2/s ; κ_b 为玻尔兹曼常数; T 为温度,K; μ 为流体黏度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; r 为孔隙半径,nm; R 为理想气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; M 为气体分子的分子量,mol.

1.2 不同扩散方式孔隙占比研究

在煤基质中,存在着多尺度孔隙,煤层瓦斯运移的过程中多种扩散方式是共存的.不同扩散方式所占比例根据煤基质中不同大小孔隙决定,通过测定煤基质中不同孔径从而确定其中不同扩散方式的占比.

压汞实验是将水银压入煤体的孔隙中,通过注入压力与汞体积之间的关系曲线得出煤体的孔隙数据.低温液氮吸附实验和二氧化碳吸附实验是根据 BET 多层吸附模型,氮气或二氧化碳饱和温度条件下在固体表面发生物理吸附和毛管凝结,实验测得氮气和二氧化碳的等温吸附-解吸曲线,进而获得煤体的孔隙

数据.使用压汞实验、低温液氮吸附实验和二氧化碳吸附实验可以对煤体孔隙进行较为全面的表征^[15].

选取贵州某煤矿7[#]煤层的3个煤样,对该煤样进行压汞实验、低温液氮吸附实验和二氧化碳吸附实验,得出的孔径分布分别如图1、图2、图3所示.

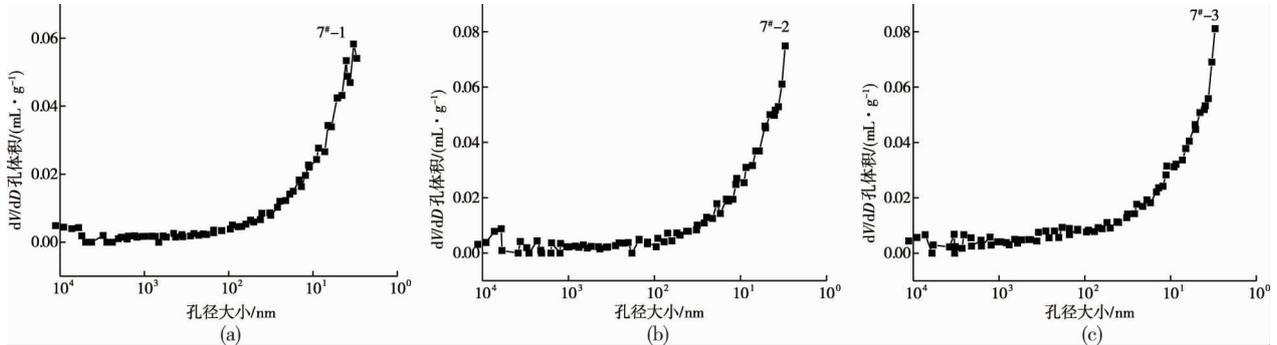


图1 压汞实验煤样孔径分布

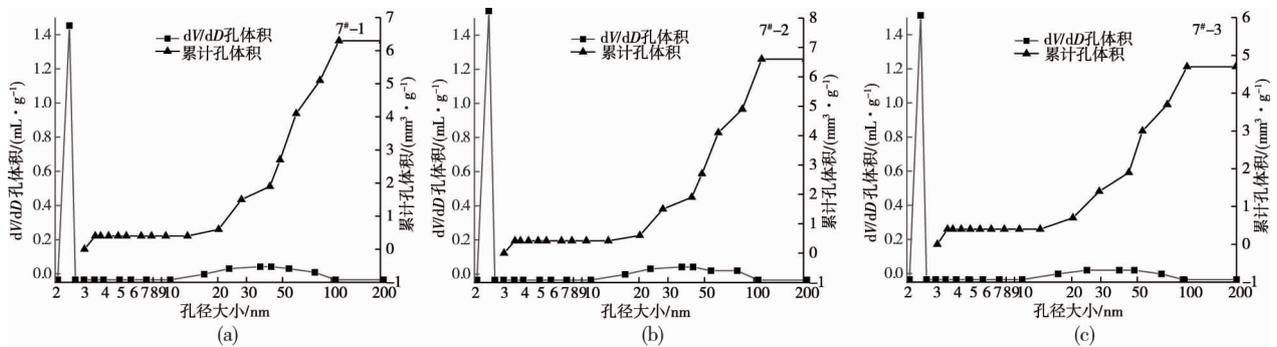


图2 低温液氮吸附实验煤样孔径分布

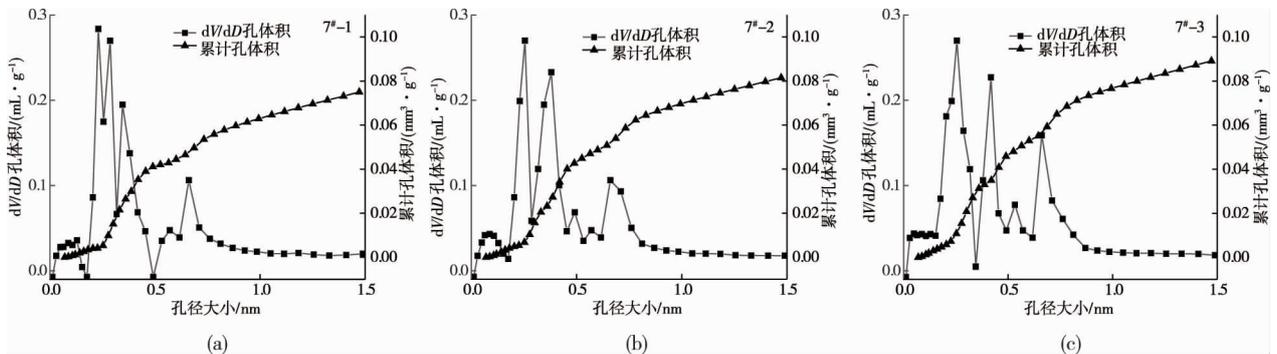


图3 二氧化碳吸附实验煤样孔径分布

根据不同的 Knudsen 数得出不同的临界孔径,以此划分不同的孔径范围,临界孔径由 Knudsen 方程表示:

$$d = \frac{\kappa_b T}{\sqrt{2} K_n \pi \delta^2 P} \tag{2}$$

式中: δ 为气体分子碰撞直径,约为 0.45 nm.

根据式(2),以气体解吸枯竭压力 0.7 MPa 作为下限^[16],煤基质原始储层温度为 30 ℃,由此得出 Fick 扩散发生的临界直径为 $d > 12$ nm,过渡扩散发生的临界直径为 $0.12 \text{ nm} < d < 12 \text{ nm}$,受甲烷分子有效直径的限制,在 $0.33 \text{ nm} < d < 1.10 \text{ nm}$ 的微孔内,由于吸附势能作用,甲烷主要以吸附项存在于煤基质中,因此煤层中发生 Knudsen 扩散的孔径范围为 1.10~1.23 nm^[17],得出不同扩散方式的孔径分布情况,如表 2 所示.根据不同扩散方式孔径分布作出煤样孔径分布,如图 4 所示.

表 2 不同扩散方式孔径分布情况

扩散方式	Knudsen 扩散	过渡扩散	Fick 扩散
有效直径分布范围	1.10~1.23 nm	1.23~123 nm	>123 nm
K_n 数	>10	0.1~10	0.01~0.10
样品平均孔隙体积比例/%	1.60	61.3	37.1

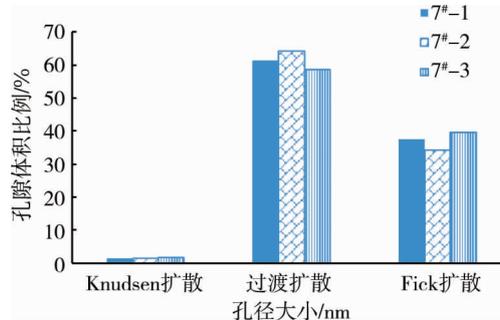


图 4 煤样孔径分布

1.3 考虑多种扩散方式的有效扩散系数

根据折文旭提出的变直径毛细管孔径模型,该模型假设煤岩体基质中气体传质路径为多根变直径毛细管的“并联”关系^[18].因此根据 Fick 扩散、Knudsen 扩散和扩散在煤岩体中所占的比例,有效扩散系数可表示:

$$D_e = \frac{1}{\frac{W_{\text{Fick}}}{D_{\text{Fick}}} + \frac{W_{\text{transition}}}{D_{\text{transition}}} + \frac{W_{\text{Knudsen}}}{D_{\text{Knudsen}}}} \quad (3)$$

式中: W_{Fick} 为 Fick 扩散在煤体中所占的比例; D_{Fick} 为 Fick 扩散系数, m^2/s ; $W_{\text{transition}}$ 为过渡扩散在煤体中的比例; $D_{\text{transition}}$ 为过渡扩散系数, m^2/s ; W_{knudsen} 为 Knudsen 扩散在煤体中所占的比例; D_{Knudsen} 为 K_{knudsen} 扩散系数, m^2/s .

2 基于有效扩散系数的双孔隙介质模型

2.1 模型假设

煤层是经典的双重孔隙介质系统,由煤基质和裂隙组成.双孔隙介质模型假设煤层瓦斯扩散和渗流行为为分别发生在煤基质和裂隙中,瓦斯通过吸附-解吸过程从煤基质中扩散到煤裂隙中,裂隙中瓦斯通过达西流动渗流至井筒.该物理模型满足以下假设:

- 1) 煤层是干燥的,忽略水分的影响;
- 2) 煤层瓦斯为理想气体,在等温条件下粘度恒定;
- 3) 煤岩体处于线弹性变形阶段.

2.2 瓦斯在煤体中的扩散方程

煤基质中的瓦斯多以吸附的形式赋存在煤基质的表面,少部分以游离态分布于煤基质的孔隙中.在抽采过程中,基质中的瓦斯解吸并通过扩散进入煤裂隙中.煤基质与裂隙之间的气体交换可由式(4)表示^[19].

$$Q_m = D_e \sigma_c (c_m - c_f) \quad (4)$$

式中, Q_m 为煤基质单位体积的气体传输速率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; D_e 为有效扩散系数, m^2/s ; σ_c 为形状因子, m^{-2} ; c_m 为煤基质内瓦斯浓度, kg/m^3 ; c_f 为煤裂隙内瓦斯浓度, kg/m^3 .

形状因子定义为

$$\sigma_c = \frac{3\pi}{L^2}. \quad (5)$$

式中: L 为煤体裂隙间距, m.

根据理想气体定律:

$$c_m = \frac{M_c}{RT} P_m; \quad (6)$$

$$c_f = \frac{M_c}{RT} P_f. \quad (7)$$

式中: M_c 为甲烷摩尔质量, kg/mol; P_m 为煤基质内的气体压力, Pa; P_f 为煤裂隙中的气体压力, Pa.

通过对煤基质质量守恒方程可得

$$\frac{\partial m_m}{\partial t} = -Q_m. \quad (8)$$

式中: m_m 为单位体积内煤基质气体含量, kg/(m³·s);

煤基质内气体包括吸附态瓦斯和少量游离瓦斯^[10]:

$$m_m = \frac{V_L P_m}{P_m + P_L} \rho_c \rho_{gs} + \varphi_m \frac{M_c}{RT} P_m; \quad (9)$$

$$\rho_{gs} = \frac{M_c}{V_M}. \quad (10)$$

式中: V_L 为 Langmuir 体积常数, m³/kg; P_L 为 Langmuir 压力常数, Pa; ρ_c 为煤体密度, kg/m³; ρ_{gs} 为在标准条件下的甲烷密度, kg/m³; φ_m 为煤基质孔隙度, %; V_M 为标准条件下甲烷的摩尔体积, m³/mol. 联立式(4)~式(10)可得瓦斯在煤体中的扩散方程:

$$\frac{\partial P_m}{\partial t} = \frac{\sigma_c D_e V_M (P_m - P_f) (P_m + P_L)^2}{V_L R T P_L \rho_c + \varphi_m V_M (P_m + P_L)^2}. \quad (11)$$

2.3 瓦斯在煤体中的渗流方程

瓦斯在煤裂隙中的渗流方程为^[10]

$$\varphi_f \frac{\partial P_f}{\partial t} + P_f \frac{\partial \varphi_f}{\partial t} = \nabla \left(\frac{k}{\mu_g} P_f \nabla P_f \right) + \sigma_c D_e (1 - \varphi_f) (P_m - P_f). \quad (12)$$

式中: φ_f 为煤裂隙孔隙度, %; k 为气体有效渗透率, m².

2.4 含瓦斯煤变形控制方程

双孔隙介质模型中含瓦斯煤岩的有效应力方程可以表示为^[20]

$$\sigma_{ij}^e = \sigma_{ij} - (\beta_f P_f + \beta_m P_m) \delta_{ij}. \quad (13)$$

式中: σ_{ij}^e 为有效应力; σ_{ij} 为总应力; β_f, β_m 分别为煤裂隙和煤基质的有效应力系数; δ_{ij} 为克罗内克函数.

煤裂隙和煤基质的有效应力系数分别表示为^[21],

$$\beta_f = 1 - \frac{K}{K_m}; \quad (14)$$

$$\beta_m = \frac{K}{K_m} - \frac{K}{K_s}. \quad (15)$$

式中: K 为煤的体积模量, $K = E/[3(1-2\nu)]$; K_m 为煤颗粒体积模量, $K_m = E_m/[3(1-2\nu)]$; K_s 为煤骨架体积模量, $K_s = K_m / \{1 - 3\varphi_m(1-2\nu)/[2(1-2\nu)]\}$, E 为煤的杨氏模量, MPa; E_m 为煤颗粒的杨氏模量, MPa; ν 为煤的泊松比.

平衡方程和应变-位移关系可以分别由式(16)和式(17)表示:

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0; \quad (16)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (17)$$

式中: F_i 表示 i 方向的力分量; ε_{ij} 表示总应变张量的分量; u_i 表示 i 方向位移的分量.

煤层的本构关系可以表示为

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \frac{2G\nu}{1-2\nu}\varepsilon_v\delta_{ij} - \beta_f P_f \delta_{ij} - \beta_m P_m \delta_{ij}. \quad (18)$$

式中: G 为煤的剪切模量; ε_v 为煤的体积应变, $\varepsilon_v = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$.

联立式(16)~式(18)可得含瓦斯煤变形控制方程:

$$Gu_{i,jj} + \frac{G}{1-2\nu}u_{j,ji} - \beta_f P_{f,i} - \beta_m P_{m,i} + F_i = 0. \quad (19)$$

假设煤岩体为线弹性材料,在单轴应力条件下,不考虑瓦斯热膨胀系数,则孔隙度对时间的偏导可定义为^[10]

$$\frac{\partial \varphi_f}{\partial t} = \frac{1}{M} \left(\beta_f \frac{\partial P_f}{\partial t} + \beta_m \frac{\partial P_m}{\partial t} \right) + \frac{\varepsilon_L P_L}{(P_L + P_m)^2} \left(\frac{K}{M} - 1 \right) \frac{\partial P_m}{\partial t}. \quad (20)$$

式中: ε_L 为 Langmuir 体积应变常数; M 为约束轴向模量, $M = E(1-\nu)/[(1+\nu)(1-2\nu)]$.

2.5 煤体孔隙率及渗透率动态演化

在 P-M 模型的基础上,引入双重孔隙有效应力,得出孔隙度变化方程^[10]:

$$\frac{\varphi_f}{\varphi_{f0}} = 1 + \frac{1}{M\varphi_{f0}} [\beta_f(P_f - P_{f0}) + \beta_m(P_m - P_{m0})] + \frac{\varepsilon_L}{\varphi_{f0}} \left(\frac{K}{M} - 1 \right) \left(\frac{P_m}{P_L + P_m} - \frac{P_{m0}}{P_L + P_{m0}} \right). \quad (21)$$

式中:下标 0 表示相应变量的初始值.

煤体渗透率是随孔隙度变化而变化,渗透率与孔隙度有三次方的关系^[22]:

$$\frac{k_\infty}{k_{\infty 0}} = \left(\frac{\varphi_f}{\varphi_{f0}} \right)^3. \quad (22)$$

式中: k_∞ 为绝对气体渗透率, m^2 .

综合 Klinkenberg 效应得出的煤体渗透率为

$$k = k_{\infty 0} \left(1 + \frac{b}{P_f} \right) \left\{ 1 + \frac{1}{M\varphi_{f0}} [\beta_f(P_f - P_{f0}) + \beta_m(P_m - P_{m0})] + \frac{\varepsilon_L}{\varphi_{f0}} \left(\frac{K}{M} - 1 \right) \left(\frac{P_m}{P_L + P_m} - \frac{P_{m0}}{P_L + P_{m0}} \right) \right\}^3. \quad (23)$$

式中: b 为 Klinkenberg 系数, $b = 0.251k_\infty^{0.36}$ ^[23].

3 几何模型及定解条件

3.1 几何模型

本文通过多物理场耦合数值模拟软件实现对煤层瓦斯运移的模拟,选取贵州省某煤矿 7# 煤层为工程实例.根据该矿地质资料,该井田属于低温正常区,7# 煤层全层厚度 1.42~3.10 m,平均厚度 2.5 m,倾角 $0^\circ \sim 2^\circ$,煤层测点温度为 20.3°C ,平均埋深 +400 m,顶板为细砂岩,底板为砂质泥岩,层位较稳定.矿区水文地质条件复杂程度为中等,根据地质报告中的预测结果,井区正常涌水量为 $59\text{ m}^3/\text{h}$,最大涌水量为 $131\text{ m}^3/\text{h}$.几何模型如图 5 所示.模型相关参数见表 3.

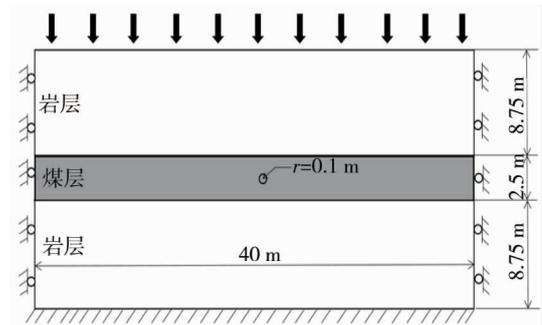


图 5 几何模型

3.2 初始条件及边界条件

在含瓦斯煤岩变形场中,给定模型顶部岩层上部施加 10 MPa 的压力,模型左右两侧为辊支撑,设定其在法线方向不发生位移,模型底部施加固定约束.在煤基质扩散场中,给定初始压力为 2 MPa,煤层的四周设置为零通量边界,钻孔周围设置狄氏边界条件,指定压力为 87 KPa.在渗流场中,给定初始瓦斯压力为 2 MPa,煤层的四周设置为零通量边界,钻孔周围设置狄氏边界条件,指定压力为 87 KPa.

表 3 几何模型参数表

参数	符号	取值
基质初始孔隙度	φ_{m0}	0.06
裂隙初始孔隙度	φ_0	0.012
基质初始压力	P_{m0}	2 MPa
裂隙初始压力	P_{f0}	2 MPa
煤的杨氏模量	E	2 713 MPa
煤颗粒杨氏模量	E_m	8 139 MPa
煤的泊松比	ν	0.33
煤的密度	ρ_c	1 250 kg/m ³
岩石的泊松比	ν	0.25
岩石的杨氏模量	E	24 500 MPa
初始绝对气体渗透率	k_0	1×10 ⁻¹⁶ m ²
Klingberg 常数	b	1.44×10 ⁵ Pa
Langmuir 压力常数	P_L	1 MPa
Langmuir 体积常数	V_L	0.02 m ³ /kg
Langmuir 体积应变常数	ε_L	0.04
瓦斯动力黏度系数	μ_g	1.08×10 ⁵ Pa·s
瓦斯摩尔质量	M_c	0.016 kg/mol
温度	T	293 K
煤体裂隙间距	L	0.005 m

4 计算结果及分析

图 6 分别给出了 $t=10$ d、 $t=50$ d、 $t=100$ d、 $t=200$ d 以及 $t=300$ d 情况下的煤基质与裂隙瓦斯压力分布情况,总体来看,随着与钻孔距离的减小,瓦斯压力呈衰减的趋势,通过对比可以发现,压力衰减速率在 $t=50$ d 之前较快, $t=50$ d 之后,压力衰减速率逐渐降低.煤基质的压力同样随着距离钻孔的减小而减小,对比图 6a 与图 6b 可以发现,煤基质压力与煤裂隙的压力基本一致,说明在煤层瓦斯运移过程中,瓦斯扩散同样发挥着重要的作用.

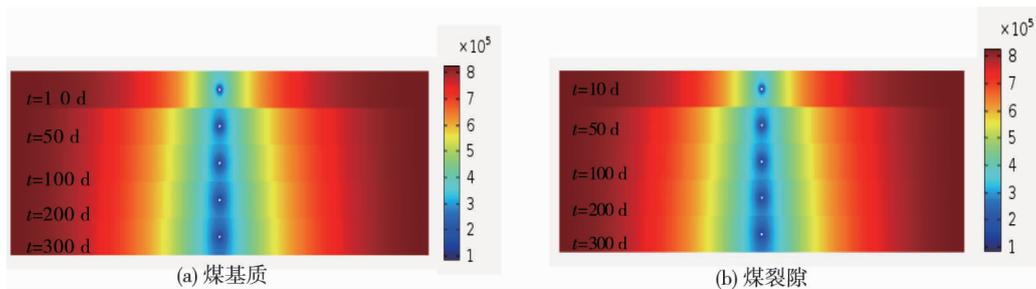


图 6 煤基质和裂隙压力分布

图 7 给出了 $t=10$ d 时煤层中部裂隙压力和煤基质压力随钻孔距变化的图像.从图 7 中可以看出,裂隙压力和煤基质压力都在模型的边缘达到最大值 2 MPa,这是由于在最初的时间,瓦斯由钻孔排除造成的压力衰减还没有达到模型边缘.同时可以看出,在同一位置下,煤基质压力比裂隙的压力要低,在模型边缘

处两者相等,这是由于瓦斯渗流速度比扩散速度大,抽采过程中煤层中的瓦斯在负压驱动下富集在煤层裂隙中.

图 8 给出了煤层中部距离钻孔 5 m 位置瓦斯渗流速率和扩散速率的对比图.从图 8 可以看出,扩散速度与渗流速度变化有相同的趋势,在大约 7 d 的时间达到峰值,之后随着时间的推移逐步降低,渗流速度比扩散速度略低,因此煤层瓦斯运移过程中的瓦斯扩散不容忽视.

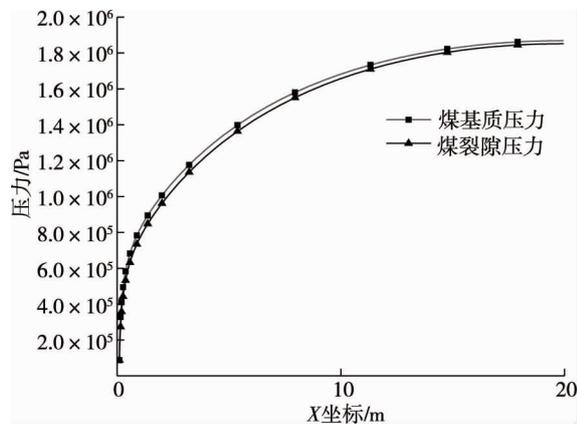


图 7 $t=10$ d 煤基质压力与裂隙压力对比

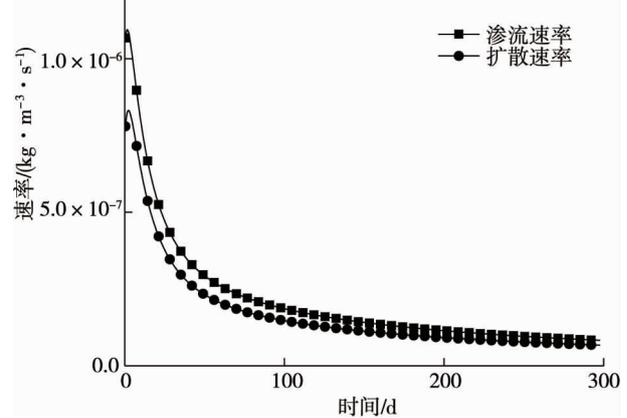


图 8 $x=5$ m 瓦斯扩散速度与渗流速度对比

5 工程验证

为进一步说明模型的合理性,对贵州省上述某矿 7# 煤层进行了现场实测.在 22802 运输巷风门外对 7# 煤层布置穿层钻孔,封孔完毕后连接抽采管,用流量表测量每日钻孔流速和流量.将实测获得的流量数据与模拟结果相对比,如图 9 所示.对比结果显示,两者具有相同的趋势,忽略现场和模拟存在的较小偏差,实测流速和流量曲线能够很好地与模拟曲线拟合.因此,所建立的有效扩散系数的双孔隙介质模型可以准确反映煤层瓦斯运移过程.

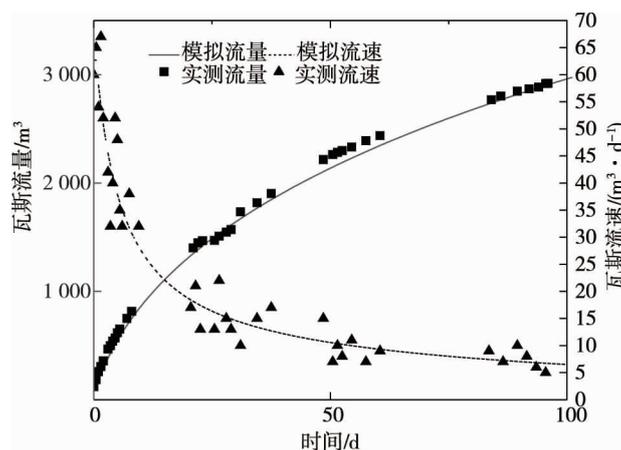


图 9 流速和流量曲线的实测与模拟曲线对比

6 结论

1) 煤体基质内瓦斯扩散过程主要包含 Fick 扩散、过渡扩散和 Knudsen 扩散,本文通过压汞实验和低温液氮吸附实验对贵州省某矿 7# 煤层煤样的孔径分布进行了实验测量,根据临界直径得出不同扩散方式在煤基质扩散过程中的分布,其中过渡扩散在煤层中的比例较大,约为 61.3%.通过变直径毛细管孔径模型对不同的临界直径中瓦斯的扩散方式进行划分,得出煤体基质瓦斯扩散的有效扩散系数.

2) 在煤层气运移过程中,基质瓦斯压力与裂隙瓦斯压力的变化有相同的趋势,且瓦斯渗流速率略大

于瓦斯扩散速率,可以说明在煤层瓦斯运移过程中,瓦斯扩散与瓦斯渗流同样发挥着重要作用。

3)本文综合考虑煤层多尺度扩散的特征,建立了考虑多尺度扩散的含瓦斯煤岩流固耦合模型,根据现场实测资料,该模型得到了很好的验证,为煤层瓦斯防治提供了较好的指导。

参考文献:

- [1] 袁亮.我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J].煤炭学报,2016,41(1):1-6.
- [2] 刘俊杰,乔德清.对我国煤矿瓦斯事故的思考[J].煤炭学报,2006,31(1):58-62.
- [3] 谢和平,高峰,鞠杨.深部开采岩体力学研究探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
- [4] 周心权,陈国新.煤矿重大瓦斯爆炸事故致因的概率分析及启示[J].煤炭学报,2008,33(1):42-46.
- [5] 申宝宏,刘见中,张泓.我国煤矿瓦斯治理的技术对策[J].煤炭学报,2007,32(7):673-679.
- [6] 梁冰,刘蓟南,孙维吉,等.掘进工作面瓦斯流动规律数值模拟分析[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(4):46-51.
- [7] 尹光志,李铭辉,李生舟,等.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[J].煤炭学报,2013,38(4):535-541.
- [8] 刘佳佳,王丹,王亮,等.考虑 Klinkenberg 效应的瓦斯抽采流固耦合模型及其应用[J].中国安全科学学报,2016,26(12):92-97.
- [9] 赵忠明,董伟,魏国营,等.百米钻孔瓦斯流量数值模拟研究及应用[J].采矿与安全工程学报,2018,35(2):436-441.
- [10] Liu Q, Cheng Y, Zhou H, et al. A mathematical model of coupled gas flow and coal deformation with gas diffusion and Klinkenberg effects[J].Rock Mech Rock Eng,2015,48:1163-1180.
- [11] 张波,谢雄刚,许石青.某矿顺层钻孔瓦斯抽采及布孔参数数值模拟[J].工矿自动化,2018,44(11):49-56.
- [12] 张波,谢雄刚.煤层气开采过程中渗透率模型比较研究[J].中国安全生产科学技术,2018,14(9):50-54.
- [13] Wang J G, Kabir A, Liu J S, et al.Effects of non-Darcy flow on the performance of coal seam gas wells[J].International Journal of Coal Geology, 2012,93: 62-74.
- [14] 陈晋南.传递过程原理[M].北京:化学工业出版社,2014.
- [15] 李阳,张玉贵,张浪,等.基于压汞、低温 N_2 吸附和 CO_2 吸附的构造煤孔隙结构表征[J].煤炭学报,2019,44(4):1188-1196.
- [16] 陈春琳,林大杨.等温吸附曲线方法在煤层气可采资源量估算中的应用[J].中国矿业大学学报,2005,34(5):679-681.
- [17] 张小东,刘炎昊,桑树勋,等.高煤级煤储层条件下的气体扩散机制[J].中国矿业大学学报,2011,40(1):43-48.
- [18] 折文旭,陈军斌,张杰.考虑吸附和多流动形式共存的页岩气藏纳米级孔隙基质视渗透率计算方法[J].西安石油大学学报(自然科学版).2015,30(4):39-42.
- [19] Mora C A, Wattenbarger R A. Analysis and verification of dual porosity and CBM shape factors[J].Journal of Canadian Petroleum Technology,2009,48(2):17-21.
- [20] Zhang J, Roegiers J C, Bai M. Dual-porosity elastoplastic analyses of non-isothermal one-dimensional consolidation[J].Geotechnical Geological Engineering,2004,22(4):589-610.
- [21] Chen M, Chen Z D. Effective stress laws for multi-porosity media[J].Applied Mathematics Mechanics,1999,20(11):1207-1213.
- [22] Wu Y, Liu J, Elsworth D, et al. Dual poroelastic response of a coal seam to CO_2 injection[J].International Journal of Greenhouse Gas Control,2010,4(4):668-678.
- [23] Hu G, Wang H, Fan X, 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.