



煤层双重孔隙瓦斯输运机理及模型评估

刘伟 韩冬阳 徐浩 周禹军 李天男

引用本文:

刘伟, 韩冬阳, 徐浩, 等. 煤层双重孔隙瓦斯输运机理及模型评估[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(2): 151-162.

LIU Wei, HAN Dongyang, XU Hao. Mechanism investigation and models evaluation of gas transport in dual-porosity coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2): 151-162.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1771>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

密度梯度驱动的煤粒瓦斯解吸扩散模型及试验研究

Gas desorption and diffusion model driven by density gradient in coal particle and its experimental study

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 169-176 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5e74b2a0-fb91-4497-a1c4-43b982697510>

急倾斜特厚煤层水平分段开采工作面瓦斯涌出影响因素研究

Study on influencing factors of gas emission in horizontal sub-level mining face of steeply inclined and extra-thick coal seam

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 127-135 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f5ce26fc-a6e8-4b9d-a5a7-611047fe8a4d>

近距离煤层群开采工作面瓦斯涌出量预测方法研究

Study on prediction method of gas emission rate in mining faces of contiguous seams

煤炭科学技术. 2021, 49(7): 104-109 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d9f936ef-fa69-40a4-aa67-5d6e2f440c2d>

深部近距离煤层群瓦斯涌出异常煤层孔隙结构综合表征

Comprehensive characterization of pore structure in coal seams with abnormal gas emission in deep close range coal seam clusters

煤炭科学技术. 2024, 52(12): 116-126 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0490>

孔隙压力升降条件下煤岩双孔隙渗透率模型研究

Study on dual pore permeability model of coal under the conditions of pore pressure rise and fall

煤炭科学技术. 2022, 50(11): 116-121 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f9f4bc3c-2603-4fca-9223-54b9f6ac4ddd>

基于蠕变曲线对称的蠕变模型研究及参数敏感性分析

Study on symmetric creep model based on creep curves and parametric sensitivity analysis

煤炭科学技术. 2024, 52(7): 48-56 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1084>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

安全科学与工程



移动扫码阅读

刘 伟,韩冬阳,徐 浩,等.煤层双重孔隙瓦斯运输机理及模型评估[J].煤炭科学技术,2025,53(2):151-162.
LIU Wei, HAN Dongyang, XU Hao, *et al.* Mechanism investigation and models evaluation of gas transport in dual-porosity coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2): 151-162.

煤层双重孔隙瓦斯运输机理及模型评估

刘 伟^{1,2}, 韩冬阳¹, 徐 浩³, 周禹军¹, 李天男¹

(1. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083; 2. 清华大学 安全科学学院, 北京 100084; 3. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590)

摘 要: 瓦斯是赋存于煤层中的非常规天然气。瓦斯的输运行为是煤层气开采的核心问题, 然而双重孔隙煤层的瓦斯输运机理还没有达成共识。为了明确瓦斯输运机理, 可视化瓦斯动态输运过程, 构建裂隙中瓦斯由压力梯度驱动、煤基质内瓦斯分别由压力梯度驱动和密度梯度驱动的 2 种煤层双重孔隙钻孔瓦斯渗流模型。2 种模型均采用有限差分法求解。通过自主开发的数值模拟软件得到瓦斯压力分布、瓦斯涌出速度和瓦斯累计涌出量。通过对比数值解算结果与现场实测数据, 探讨 2 种模型的准确性和差异性。结果表明: ① 2 种模型在抽采前期均由达西流主导, 其瓦斯涌出速度和累计瓦斯涌出量与现场基本保持一致, 而煤基质内的气体将在后期主导气体输运。② 由于游离瓦斯的存在, 基质密度梯度模型的钻孔瓦斯压力变化范围比压力梯度模型的更大, 更符合现场实测情况。说明煤基质中的扩散行为更符合游离瓦斯密度梯度驱动模型。③ 钻孔瓦斯涌出速度与原始瓦斯压力、孔隙率、裂隙渗透系数呈正相关, 与基质半径负相关。所构建的裂隙瓦斯压力梯度驱动、基质游离瓦斯密度梯度驱动双重孔隙钻孔瓦斯输运模型更真实、准确地反映煤储层钻孔瓦斯输运的物理行为。

关键词: 煤层; 瓦斯输运; 密度梯度; 双重孔隙模型; 瓦斯涌出速率; 参数敏感性

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)02-0151-12

Mechanism investigation and models evaluation of gas transport in dual-porosity coal seam

LIU Wei^{1,2}, HAN Dongyang¹, XU Hao³, ZHOU Yujun¹, LI Tiannan¹

(1. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Safety Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Methane is an unconventional natural gas in coal seams. Coalbed methane (CBM) migration behavior constitutes a core issue in coalbed methane extraction. However, there is no consensus on the gas migration mechanism of dual-porosity coal seams. To elucidate the mechanism of gas migration and visualize the dynamic migration process of gas, two dual-porosity borehole gas seepage models were established. Specifically, the pressure gradient drives gas in the fracture, and gas in the coal matrix is driven by the pressure gradient and density gradient respectively. The finite difference method is employed to solve both models. Through the self-developed numerical simulation software, the gas pressure distribution, gas emission velocity, and gas accumulation emission amount were obtained. By comparing the numerical results with the field-measured data, the accuracy and disparities between the two models were investigated and discussed. The results show that: ① In the initial stage of extraction, both models are predominantly governed by Darcy flow, and their gas emission velocity and cumulative gas emission quantity are substantially in consonance with the field data. In the subsequent stage, the gas within the coal matrix assumes a dominant role in gas migration. ② Due to the existence of free gas, the variation range of gas pressure in borehole in the density gradient model is larger than that in the pressure gradient model. The diffusion behavior in coal matrix is more consistent with the density gradient model in coal matrix. ③ The gas emission rate of the borehole exhibits a positive correlation with the origin-

收稿日期: 2024-12-01

策划编辑: 朱恩光

责任编辑: 王晓珍

DOI: 10.12438/cst.2024-1771

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3009004); 国家自然科学基金资助项目(52474273, 52074303)

作者简介: 刘 伟(1985—), 男, 安徽宁国人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: liuwei7230@cumt.edu.cn

al gas pressure, porosity, and fracture permeability coefficient, and a negative correlation with the matrix radius. The dual-porosity borehole gas transport model driven by the gas pressure gradient in fracture and free gas density gradient in coal matrix can reflect the physical behavior of borehole gas transport in coal reservoir more truly and accurately.

Key words: coal seam; gas transport; density gradient; dual-porosity model; gas emission rate; parameter sensitivity

0 引言

瓦斯(煤层气)是成煤过程中的伴生产物,是一种具有广泛应用的清洁能源。将煤层中的瓦斯抽采并加以利用,不但可以保障煤炭资源的安全开采、促进煤矿瓦斯高效洁净能源的利用,还可以控制与煤炭开采过程相关的温室气体排放,实现“安全、能源、环境”的协同发展、多措并举^[1-2]。由于煤体结构的复杂性,瓦斯在煤层中,尤其是在煤基质中的输运机理不明确^[3]。研究瓦斯在煤层中的扩散-渗流机理对于预测煤层瓦斯储量,优化煤层瓦斯抽采有重要意义^[4-5]。

煤基质中气体输运研究引起了学者的广泛关注。现阶段主流观点认为,大孔及裂隙中的流动符合达西定律,即气体流动由压力梯度驱动^[6-7]。与此同时,瓦斯从煤体微孔隙解吸的过程被认为属于由气体浓度梯度引发的扩散,遵循菲克定律^[8-9]。LIU 和 QIN 等^[10-11]开展了不同粒径、不同压力条件的瓦斯解吸试验,并分别以达西定律和菲克定律为依据建立瓦斯流动模型。研究结果显示,以达西定律为基础理论建立的数学模型与试验结果更加吻合。然而,LIU 等^[12]在对煤粒渗透系数进行反演时发现,当渗透系数随压力发生变化时,试验结果才能使与基于达西定律建立的煤基质瓦斯流动模型结果相适配。但从理论层面而言,模型中的关键常数不应随时间或压力发生变化。在实际情况中,钻孔内瓦斯的流动呈现出一个连续的过程:首先瓦斯从煤孔隙表面解吸,随后在煤基质中进行扩散渗流,最终从裂隙流入钻孔内。王登科等^[13]构建了孔隙-裂隙双重介质的孔隙率和渗透率动态演化模型,并运用 COMSOL 软件模拟煤层瓦斯抽采过程,进而分析瓦斯压力随抽采时间的动态分布规律。然而,菲克定律未对瓦斯的游离态和吸附态加以区分和界定,认为瓦斯的扩散量仅与瓦斯浓度梯度成正比。而在煤粒瓦斯解吸扩散试验的研究中,实际参与流动的主要是游离瓦斯^[14]。LIU 等^[15]建立浓度梯度和密度梯度驱动模型,分别模拟煤粒的瓦斯扩散,得到在煤基质密度梯度模型比浓度模型有更高的精度。尽管在煤基质气体流动研究领域已积累了诸多成果,但由于不同研究结果之间的矛盾以及部

分理论的局限性,瓦斯在煤基质中的流动理论仍未达成广泛共识。

数值模拟为煤层瓦斯采收率预测和煤层瓦斯输运机理的研究提供了可行性。目前,基于达西渗流定律的均匀连续介质瓦斯流动模型的应用较为普遍。事实上,裂隙与煤基质中的瓦斯压力均会影响煤层瓦斯含量^[16-17]。均匀连续介质模型仅使用裂隙中的瓦斯压力计算煤层瓦斯含量,未考虑煤基质中吸附瓦斯从孔隙内表面的解吸可能造成较大计算误差。ZHAO 等^[18]建立了煤体内转换煤层气主要运移形式的临界应力预测模型,证实了煤层瓦斯流动主导形式由渗流转变为扩散临界应力的存在。秦跃平等^[19]假设瓦斯在煤基质及裂隙的流动均服从达西定律,建立了双重孔隙煤体钻孔瓦斯渗流数学模型,得到该模型结果与连续介质模型相比更符合实际。但该模型未考虑煤基质中游离瓦斯的存在。XU 等^[20]建立了游离瓦斯密度梯度驱动的扩散模型,得到游离瓦斯密度梯度假说比达西定律更适合用来描述煤基质中的瓦斯输运规律。目前,煤层气输运的数学模型不够明确和统一,瓦斯在煤基质中的流动理论尚未形成定论。

鉴于甲烷在不同煤体结构中的解吸-扩散-渗流过程的驱动方式存在差异,笔者构建了煤基质瓦斯扩散分别由压力梯度和密度梯度驱动的双重孔隙钻孔瓦斯输运模型。通过对比现场实测数据与数值解算得到的瓦斯涌出速度和瓦斯涌出量等参数,探讨 2 种钻孔瓦斯模型的精确性及误差。该研究旨在评估适用于预测现场煤层储量与煤层气采收率的数值模型,为阐释气体输运行为提供理论基础。

1 双重孔隙钻孔瓦斯模型建立与解算

1.1 模型的基本假设

假设煤基质嵌入裂隙网络,如图 1a 和图 1b 所示。其中, L_1 为钻孔壁边界, L_2 为不受瓦斯抽采影响的煤层区域边界。为简化建模过程,双重孔隙模型的基本假设如下:① 将煤层中的气体视为理想气体,其流动过程为等温;② 煤基质呈球形且各向同性,其孔隙率不受内部瓦斯压力变化的影响;③ 忽略 Klinkenberg 效应及因基质收缩或膨胀引起的微小变形。2 种模型均假设裂隙中瓦斯流动服从达西定律(压力

梯度驱动),煤基质中的瓦斯流动方式分别服从压力梯度和密度梯度,故以下将 2 种模型简称为压力梯度模型和密度梯度模型。模型瓦斯流动如图 1c 所示。

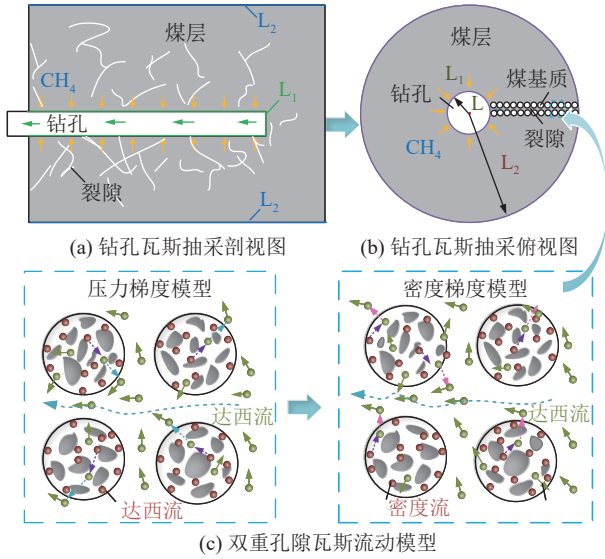


图 1 2 种模型瓦斯运输示意

Fig.1 Schematic diagram of gas transport in two models

1.2 模型的建立过程

煤基质内压力梯度的模型建立过程与密度梯度模型相似^[21-22],此处不再详细阐述。文中只展示密度梯度模型的具体建立过程。

1.2.1 煤基质游离瓦斯密度梯度扩散理论模型

基质中瓦斯含量由游离态瓦斯和吸附态瓦斯组成,参考 Langmuir 吸附方程^[23]。表达式如下:

$$X_m = \frac{ab\rho_g}{1+b\rho_g} + \frac{Vn_m\rho_g}{\rho_c M_g} \quad (1)$$

式中: X_m 为煤基质瓦斯含量, cm^3/g ; n_m 为煤基质的孔隙率, %; a 为煤的极限吸附能力, cm^3/g ; b 为瓦斯在煤表面的吸附强度, MPa^{-1} ; ρ_g 为游离态瓦斯密度, kg/m^3 ; ρ_c 为煤的视密度, kg/m^3 ; V 为摩尔体积, L/mol ; M_g 为气体的摩尔质量, kg/mol 。

引入微孔道扩散系数 K_m ^[24],得到密度梯度下的瓦斯在煤基质中的瓦斯涌出速率如下:

$$J_m = -K_m \frac{d\rho_g}{dr} \quad (2)$$

根据理想气体状态方程和质量守恒定律,煤基质中游离瓦斯密度梯度扩散模型^[24]如下:

$$\frac{\partial \left(\frac{ab\rho_g}{1+b\rho_g} + \frac{Vn_m\rho_g}{\rho_c M_g} \right)}{\partial t} = \frac{K_m}{\rho_c \rho_n} \left(\frac{2}{r} \frac{\partial \rho_g}{\partial r} + \frac{\partial^2 \rho_g}{\partial r^2} \right) \quad (3)$$

式中: ρ_n 为瓦斯标准密度, kg/m^3 ; t 为瓦斯抽采时间, d ; r 为煤基质球心到煤基质内任意一点的距离, m 。

1.2.2 裂隙瓦斯流动模型的建立

假设煤的孔隙率不受瓦斯压力变化的影响。则裂隙内的瓦斯含量^[25]可表示为

$$X_f = n_f \rho_f \quad (4)$$

式中: n_f 为裂隙空间的孔隙率; ρ_f 为单位体积煤体裂隙空间内瓦斯密度, kg/m^3 。

裂隙中的瓦斯涌出速率如下

$$G_f = -\lambda_f \frac{\partial P_f}{\partial x} \quad (5)$$

式中: λ_f 为裂隙的透气性系数, $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{s})$; x 为煤体任一点距钻孔壁的距离, m ; P_f 为裂隙内瓦斯压力的平方, MPa^2 。

瓦斯源项如下:

$$J_{st} = -\frac{3K_m}{r_m} \frac{\partial \rho_g}{\partial r} \quad (6)$$

式中: J_{st} 为由煤基质流入裂隙中的瓦斯量, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; r_m 为煤基质半径, m 。

裂隙瓦斯流动的偏微分方程为

$$\frac{n_f \rho_n}{2p_0 \sqrt{P_f}} \frac{\partial P_f}{\partial t} = \lambda_f \rho_n \left(\frac{1}{x} \frac{\partial P_f}{\partial x} + \frac{\partial^2 P_f}{\partial x^2} \right) + J_{st} \quad (7)$$

密度梯度模型的初始条件与边界条件为

$$\begin{cases} P_f = p_r^2, t = 0 \\ \frac{\partial \rho_g}{\partial r} = 0, \rho_g = \frac{p_r}{R_g Z T}, r = 0 \\ P_f(x, t) = p_0^2, x = L_1 \\ \frac{\partial P_f}{\partial x} = 0, x = L_2 \end{cases} \quad (8)$$

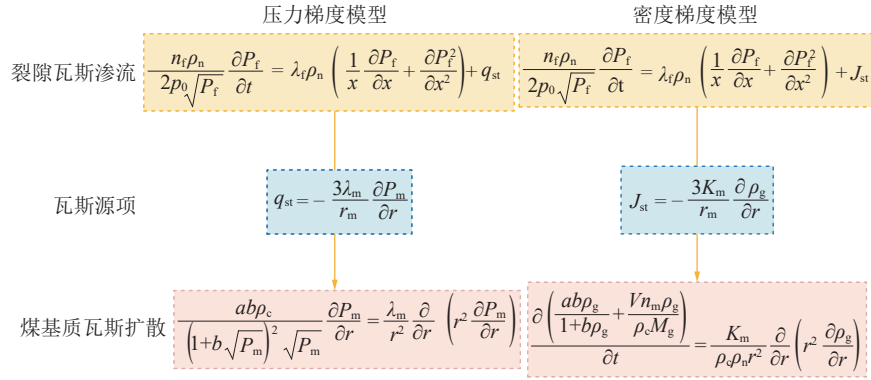
式中: p_0 为标准状态下的大气压力, 0.101325 MPa ; p_r 为煤层原始瓦斯压力, MPa ; L_1 为至钻孔壁距离, m ; L_2 为煤层未受钻孔影响的距离, m ; R_g 为气体常数; Z 为气体的压缩因子; T 为温度, K 。

煤基质内由压力梯度驱动的双重孔隙钻孔瓦斯运输模型建立过程与密度梯度模型相似,建立过程此处不再赘述。所建立的煤基质内压力梯度模型和密度梯度模型比较如图 2 所示。

1.3 模型的解算

1.3.1 网格划分

模型均采用变步长的网格划分方法。钻孔内的裂隙用横向 x 方向的网格线表示。煤基质中瓦斯流动方向为球径向 r 方向。裂隙中的瓦斯包括其原有瓦斯和煤基质内解吸出的瓦斯,如图 3 所示。为提高计算精度,减少计算量,横向和纵向网格间距采取等比变化。纵向网格线的划分方法为从原点开始沿 x 轴间隔越来越大,对应公比为 $c_1 > 1$ 。横向网格线应从原点开始沿 r 轴间隔越来越小, $0 < c_2 < 1$ 。 c_1 取 1.1,



注: P_m 为煤瓦斯压力平方, MPa^2 ; λ_m 为煤基质瓦斯扩散系数, $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{s})$; q_{st} 为压力梯度模型由煤基质流入裂隙中的瓦斯量, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

图 2 2 种瓦斯运输模型的比较

Fig. 2 Comparison of two gas transport models

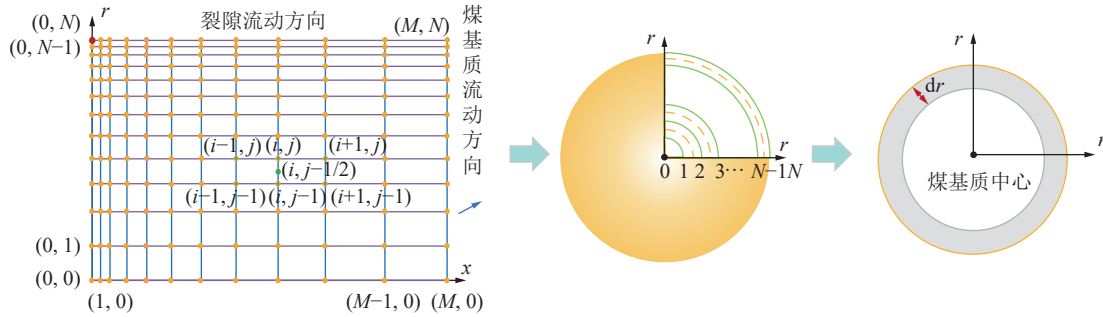


图 3 网格与节点划分

Fig. 3 Grid and node division

c_2 取 0.95。

x 方向上网格首步长为

$$\Delta x = h(1 - c_1) / (1 - c_1^M) \quad (9)$$

式中: h 为钻孔影响深度, m 。

r 方向上网格首步长为

$$\Delta r = r_m(1 - c_2) / (1 - c_2^N) \quad (10)$$

采用有限差分法对密度梯度模型和压力梯度模型进行离散, 具体离散化过程及模型的离散方程参考文献 [24]。

1.4 解算程序与流程

通过瓦斯涌出速度和瓦斯累计涌出量来比较模型的准确性和差异性。钻孔瓦斯涌出速度和涌出量分别见式 (11) 和式 (12):

$$V_g = 2\pi R_b l \lambda_f \frac{P_f^n(0, N) - P_f^n(1, N)}{r(1, N) - r(0, N)} \quad (11)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n 2\pi R_b l \lambda_f \frac{P_f^n(0, N) - P_f^n(1, N)}{r(1, N) - r(0, N)} \Delta t \quad (i = 1, 2, 3 \cdots n) \quad (12)$$

式中: V_g 为瓦斯涌出速度, m^3/d ; l 为钻孔长度, m ; R_b 为钻孔半径, m ; Q 为累计瓦斯涌出量, m^3 。

在山西省晋城市玉溪煤矿 3 号煤层区域, 开展了顺层钻孔瓦斯抽采试验。其抽采的 3 号煤层属于煤层瓦斯赋存稳定、无地质构造区域。依据煤层瓦斯涌出量测定报告所示, 该煤矿一盘区开采作业期间, 矿井所呈现出的最大绝对瓦斯涌出量可达 $240 \text{ m}^3/\text{min}$ 。其中, 回采工作面的瓦斯涌出约为 $127 \text{ m}^3/\text{min}$, 掘进面瓦斯涌出约为 $47 \text{ m}^3/\text{min}$, 采空区瓦斯涌出达 $66 \text{ m}^3/\text{min}$ 。通过实验室测量、现场实测和曲线拟合得到数值模拟所用参数, 见表 1。

2 模型结果与分析

2.1 模拟结果和现场实测对比

为验证数值模型准确性, 将玉溪煤矿顺层瓦斯抽采的现场实测数据与 2 种模型的瓦斯涌出速率比较 (图 4)。瓦斯抽采 15 d 内, 压力梯度和密度梯度模型与现场实测数据变化趋势相同。随抽采时间增加, 压力梯度模型瓦斯涌出速度几乎不变且略高于现场数据, 而密度梯度模型与现场实测吻合。这是由于抽采后期压力梯度模型高估微小孔隙输运能力, 密度梯度模型虽增加考虑了基质中游离瓦斯的存在, 但是游离气仅占煤层总含气量的 5% ~ 15% [26], 当游

表 1 数值模拟参数
Table 1 Numerical simulation parameters

参数	数值
极限吸附量 $a/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	0.032
吸附常数 b/MPa^{-1}	2.87
瓦斯标准密度 $\rho_w/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.717
煤的视密度 $\rho_c/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 460
煤基质半径 r_m/m	0.000 95
孔隙率 n_f	0.12
裂隙渗透系数 $\lambda_f/(\text{m}^2 \cdot (\text{MPa}^2 \cdot \text{s})^{-1})$	0.000 12
煤层原始瓦斯压力 p_i/MPa	1.30
煤层温度/K	298.15
钻孔抽采负压 p_n/MPa	0.07
钻孔半径 R_b/m	0.047
钻孔长度 l/m	108

离气扩散后,吸附相气体将作为整个输送过程的气源,将在后期主导气体运输。比较 2 种模拟结果,煤层双重孔隙钻孔瓦斯的密度梯度模型更有效反映煤层钻孔瓦斯运输物理行为。

2.2 瓦斯压力分布

2.2.1 钻孔瓦斯压力分布

煤层瓦斯压力可反映瓦斯抽采效率和效果。图 5 展示了压力梯度模型与密度梯度模型在不同抽采时间下钻孔周围瓦斯压力分布。抽采时间增加,钻孔周围煤壁压力逐渐降低。压力梯度模型在抽采时间达 60 d 时,煤壁周围压力持续下降,但基质中心瓦斯压力仍未改变。相同条件下,密度梯度模型的瓦斯压力下降范围大于压力梯度模型。这是由于煤中瓦斯以游离态和吸附态存储,若无吸附项,游离瓦斯质量与压力梯度成正比;若考虑吸附项,则密度梯度模型压力高于压力梯度模型。

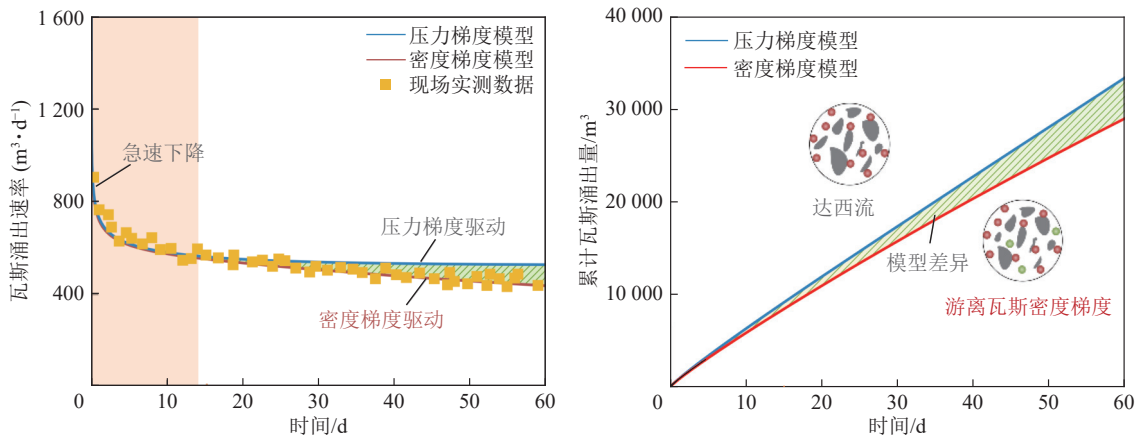


图 4 模拟结果和现场数据对比
Fig.4 Comparison between simulation results and field data

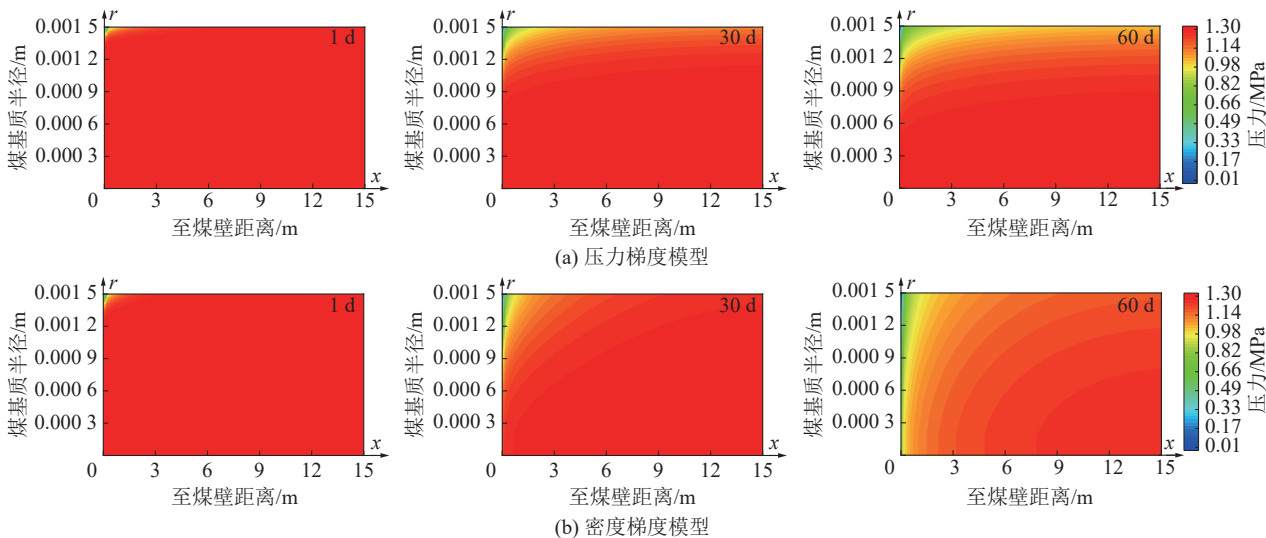


图 5 钻孔周围压力分布云图
Fig.5 Pressure distribution cloud image around the borehole

2.2.2 煤基质瓦斯压力分布

压力梯度和密度梯度模型驱动下,距钻孔 0.2 m 和 2 m 的煤基质内的瓦斯压力如图 6 和图 7 所示。

抽采初期,距离钻孔 0.2 m 和 2 m 的 2 种模型煤基质内瓦斯压力差异较小,这也是由于抽采前期裂隙的瓦斯流动占主导。抽采 30 d 时,2 种模型煤基质外

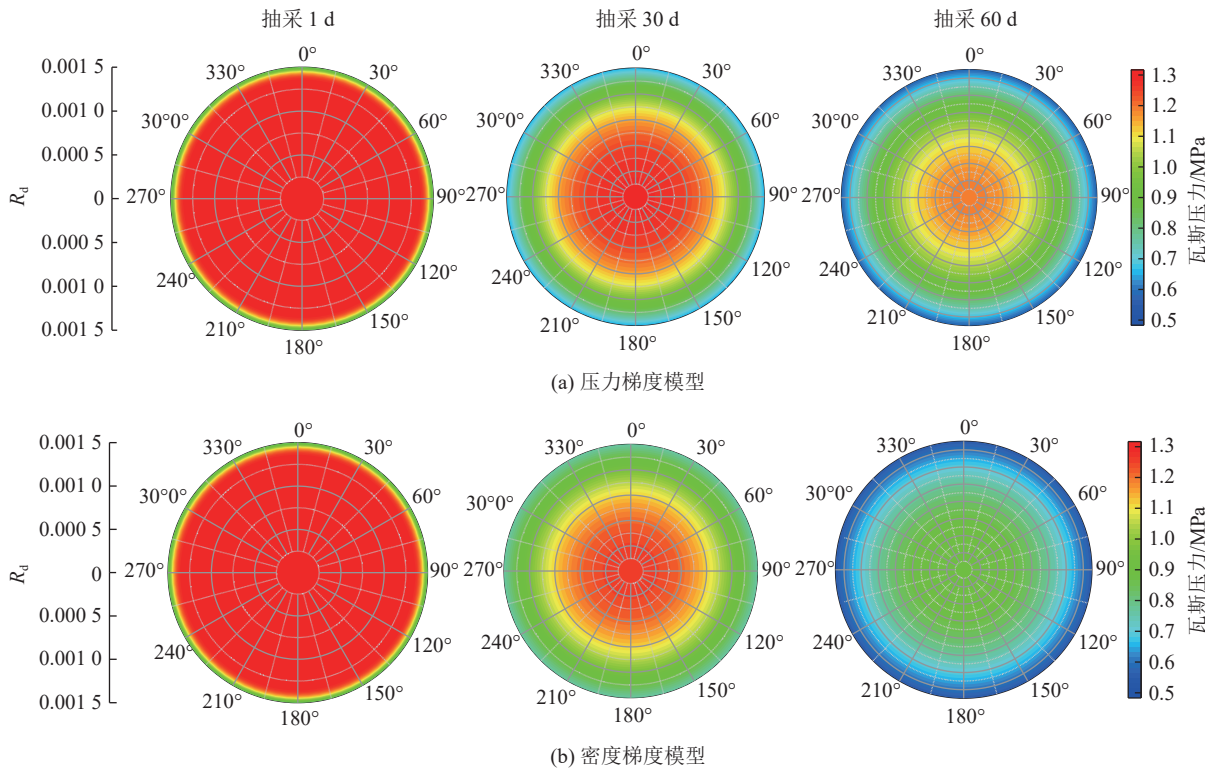


图 6 距钻孔 0.2 m 的煤基质内瓦斯压力分布

Fig.6 Gas pressure distribution within coal matrix 0.2 m away from borehole

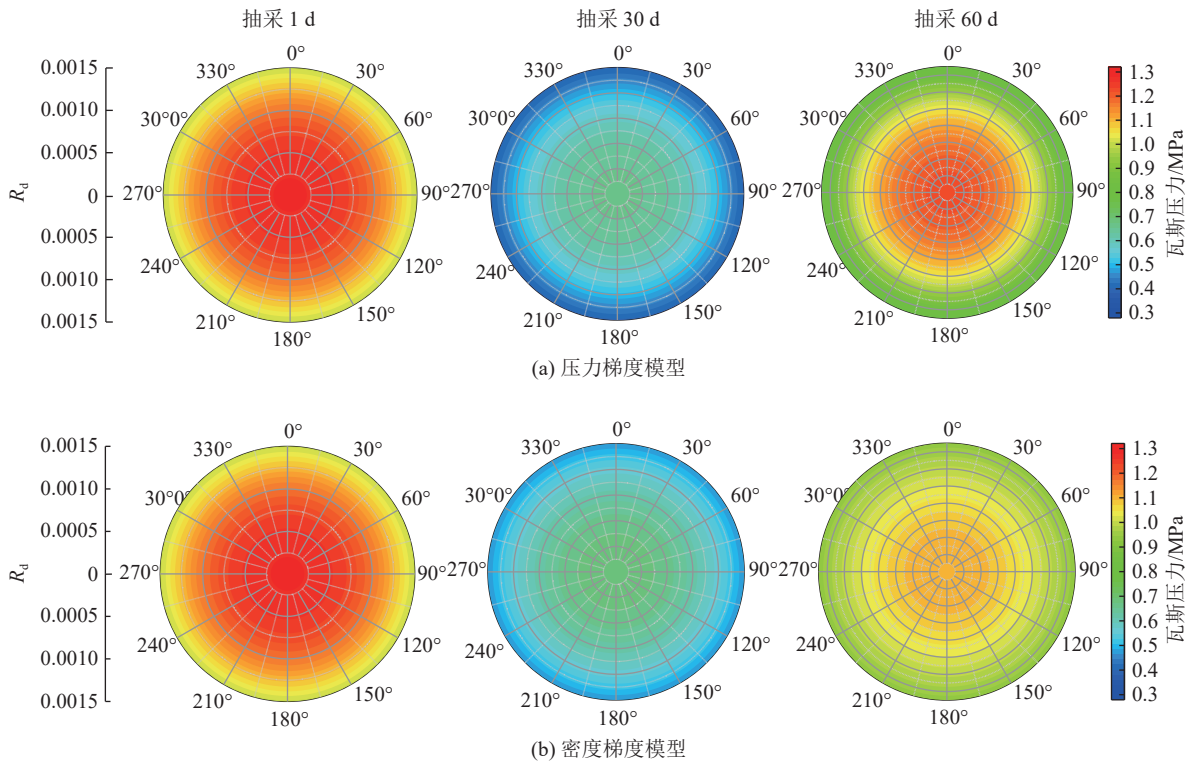


图 7 距钻孔 2 m 的煤基质内瓦斯压力分布

Fig.7 Gas pressure distribution within coal matrix 2 m away from borehole

表面压力变化较明显,而抽采时间达到 60 d 时,密度梯度模型基质内的压力变化与压力梯度模型相比较,尤其是距钻孔 2 m 的瓦斯压力。综上所述,密度梯度模型可以更有效描述煤基质中心的瓦斯压力变化。

3 瓦斯输运多因素敏感性分析

3.1 原始瓦斯压力

对比压力梯度模型与密度梯度模型在不同煤层

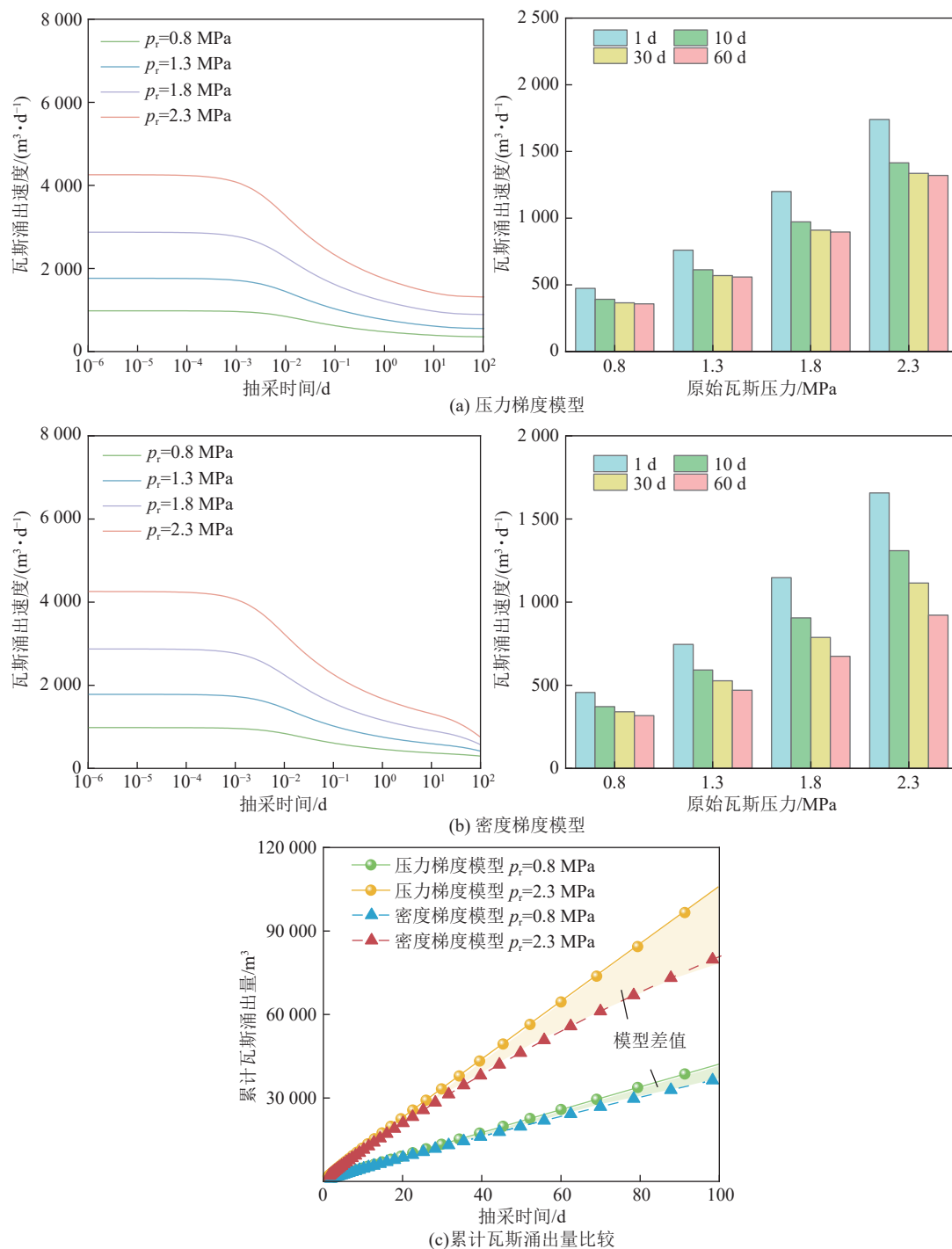


图 8 改变原始瓦斯压力下的瓦斯涌出规律

Fig.8 Gas emission rules under changing original gas pressure

始瓦斯压力越大, 气体输运驱动力越大。

在抽采初期, 压力梯度模型的瓦斯涌出速度和累计涌出量与密度梯度模型接近。随抽采时间增加, 压力梯度模型瓦斯涌出量高于密度梯度模型。原始瓦斯压力越大, 两模型瓦斯的涌出速度差异越明显。抽采后期基质内解吸、扩散为控制煤层气产量主要因素, 此时用达西流计算不准确。值得注意的是, 原始瓦斯压力为 0.8 MPa 时, 2 种模型瓦斯涌出速度和

瓦斯涌出量在抽采后期也接近, 如图 8c 所示。这是由于煤基质和裂隙内压力梯度相差较小时达西流占主导。故煤层原始瓦斯压力较低时, 采用压力梯度模型评估煤层气产量误差较小。

3.2 孔隙率

图 9 显示了孔隙率变化对压力梯度模型和密度梯度模型的瓦斯运输的影响。钻孔瓦斯抽采瞬间, 2 种模型不同孔隙率的初始瓦斯涌出速度均相同。在

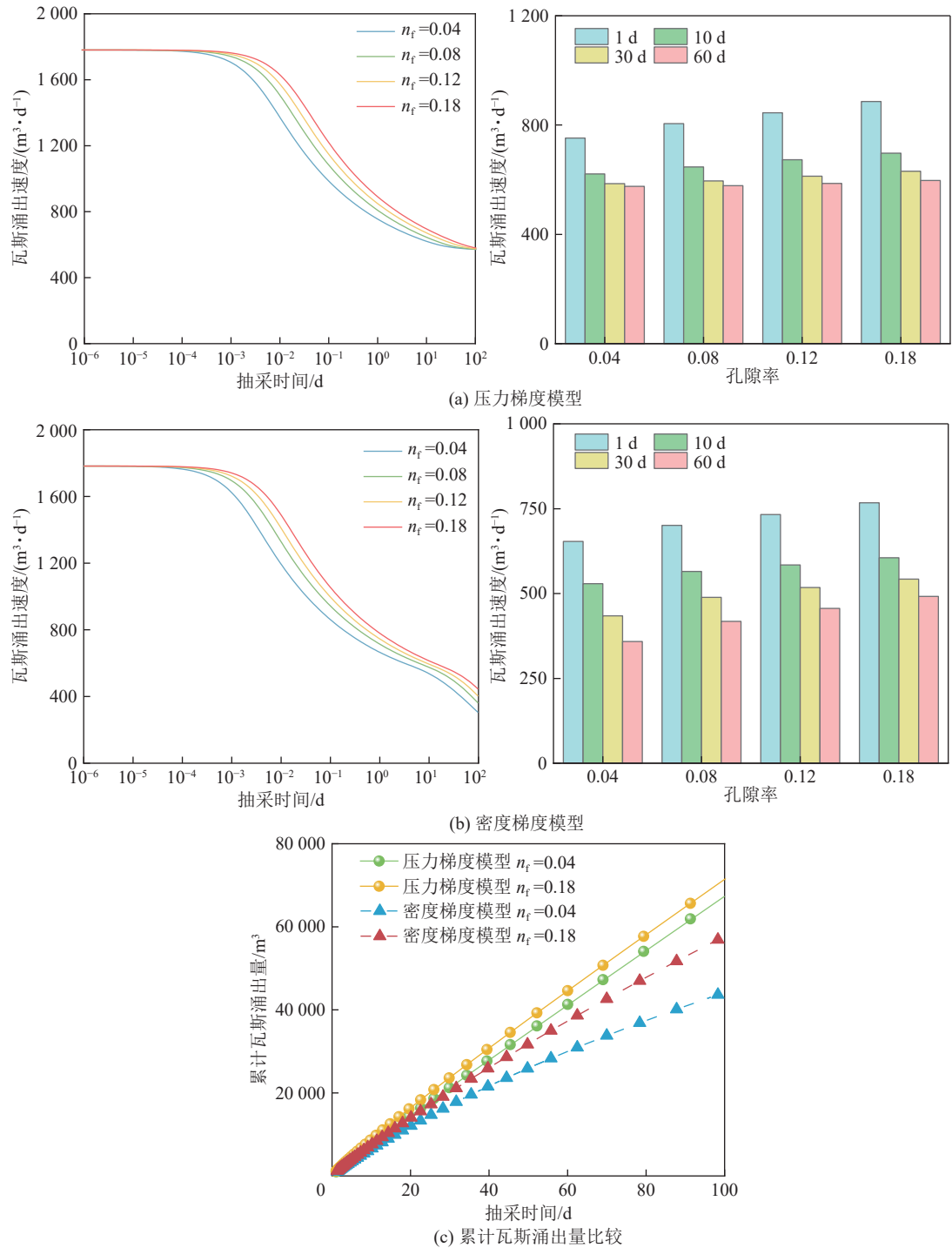


图 9 改变孔隙率的瓦斯涌出规律

Fig.9 Gas emission rules with changing porosity

压力梯度模型中。孔隙率的改变对于瓦斯抽采前期的影响较大,而在抽采后期瓦斯涌出速度接近,如图 9a 所示。相反,密度梯度模型中在抽采 0.001 d 后,不同孔隙率的瓦斯涌出速度差异均较明显,如图 9b 所示。相比而言,密度梯度模型中,孔隙率的变化对抽采中后期瓦斯涌出速度影响更显著。如图 9c 所示。随着抽采时间增加,2 种模型累计瓦斯涌出量差值增大。

3.3 裂隙透气性系数

裂隙内气体输运能力与裂隙透气性系数的大小有关^[27]。压力梯度模型中,瓦斯抽采 10 d 后,不同裂隙渗透系数下的瓦斯涌出速度均稳定,如图 10a 所示。密度梯度模型中,钻孔抽采初期,瓦斯涌出速度下降较快。随着抽采时间增加,不同裂隙渗透系数的瓦斯涌出速度逐渐接近,如图 10b 所示。2 种模型的裂隙透气性系数均在抽采初期对瓦斯涌出速度产

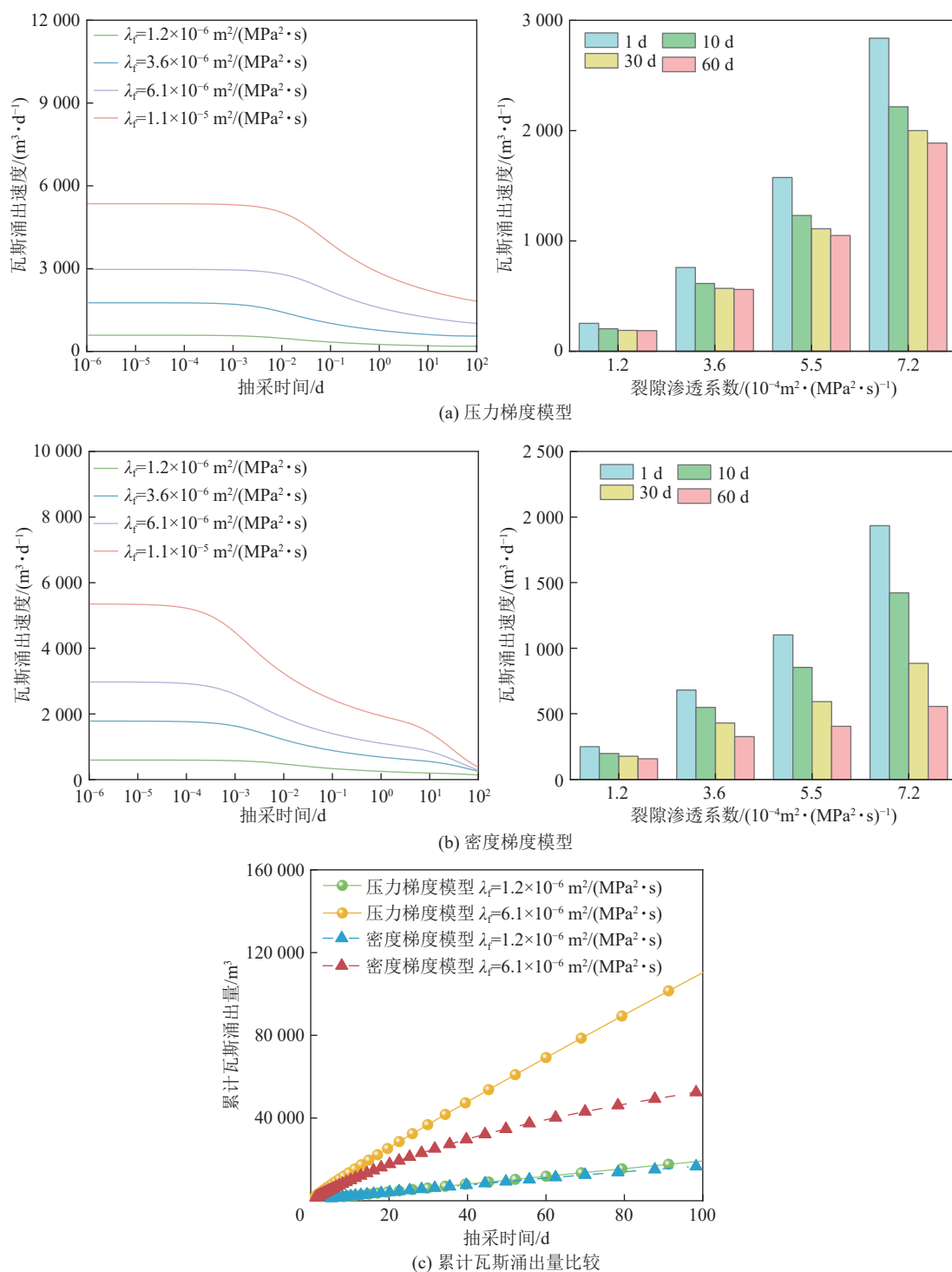


图 10 改变裂隙渗透系数的瓦斯涌出规律

Fig.10 Gas emission rules with changing fracture permeability coefficient

生较大影响。这还是由于当煤层打入钻孔时,裂隙中游离瓦斯为气体流动的主体。然而,随着抽采时间增加,裂隙中的游离瓦斯全部涌入钻孔,煤基质中解吸的气体占主导。

相同裂隙渗透系数下,抽采时间的变化对于 2 种模型的瓦斯涌出速的影响差异显著。裂隙渗透系数在 λ_f 较小时,2 个模型的涌出量较为接近。随着抽

采时间的增加,改变裂隙透气性系数,密度梯度模型的瓦斯涌出速度的衰减速率高于压力梯度模型。进一步证实钻孔瓦斯抽采初期裂隙中达西流主导着气体运输,煤基质中密度梯度扩散主导后期气体运输。

3.4 煤基质半径

煤基质半径的大小也会影响瓦斯的解吸速率。由图 11a、图 11b 可以得到煤基质半径的改变对初始

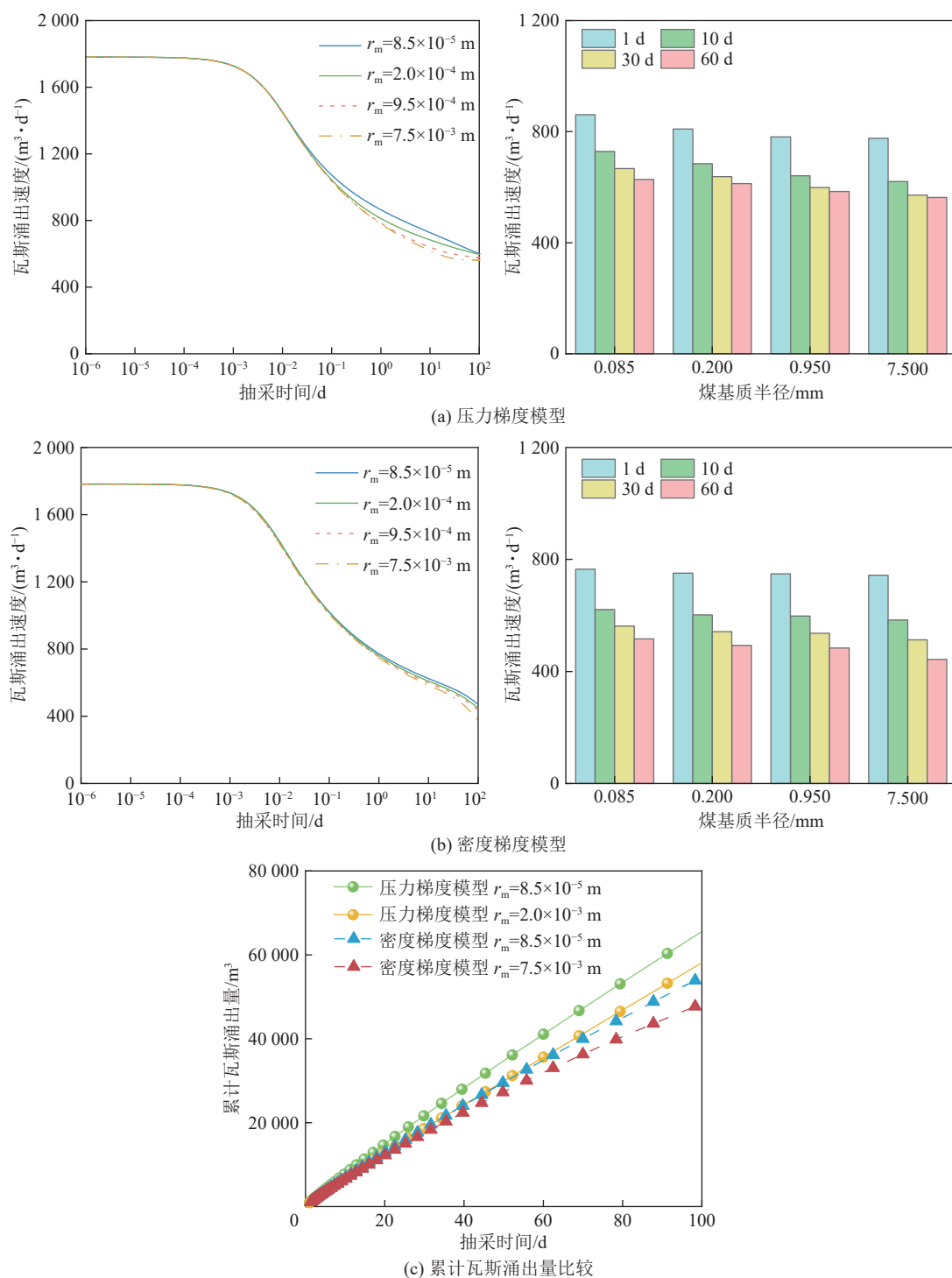


图 11 改变煤基质半径的瓦斯涌出规律

Fig.11 Gas emission rules of changing the radius of coal matrix

瓦斯涌出速度没有影响。随着抽采时间的增加,煤基质半径越小的煤层瓦斯涌出速度越快。对于压力梯度模型,基质半径的改变对抽采时间 0.03 ~ 80 d 瓦斯涌出速度影响较大,并且煤基质半径越小,瓦斯涌出速度衰减越快。相反,密度梯度模型中,煤基质半径越大,抽采后期瓦斯涌出速度下降越快。

2 种模型中,改变基质半径和改变孔隙率得到的瓦斯涌出速度在抽采初期的变化趋势较为相似,如图 9 和图 11 所示。综合以上敏感性分析,基质半径的变化对瓦斯涌出速度的影响较其他参数小,这可能由于基质半径变化煤颗粒的外表面积的影响较大,而内表面积与气体吸附、解吸能力密切相关。

实际上,煤基质中吸附气体解吸流动并不是瞬时的,其解吸表现出滞后性。当煤基质中解吸气体由煤基质球体中心扩散至表面时,较小的煤基质半径对应较短的解吸路径。这意味着煤基质中解吸气体的速率增加导致煤基质与裂隙之间的传质速率增加,从而形成更大的钻孔瓦斯涌出速度。以上研究充分证实煤基质游离瓦斯密度梯度扩散理论的准确性。煤基质密度驱动下的双重孔隙瓦斯模型更适用于评估钻孔瓦斯涌出特性。

4 结 论

1)通过对比现场实测数据与煤基质中由压力梯度模型和密度梯度模型得到,密度梯度模型模拟结果与整个现场实测结果更加吻合。压力梯度模型虽在早期采气阶段拟合较好,但瓦斯抽采后期相对误差逐渐增加。煤基质内的气体在后期主导气体运输,使密度梯度模型与实际结果更一致。

2)模拟了煤基质内由压力梯度和密度梯度模型钻孔周围与距钻孔 0.2 m 和 2 m 的煤基质内的瓦斯压力分布。由瓦斯压力分布云图得到,煤基质密度驱动模型瓦斯压力变化范围大于压力梯度模型。抽采过程中,密度梯度模型的煤层瓦斯压力下降更符合现场实际。

3)煤层基质孔隙和裂隙控制着不同开采阶段井内瓦斯涌出速率。裂隙瓦斯渗流在早期控制瓦斯抽采速率,后期瓦斯在煤基质微通道内扩散主导瓦斯抽采速率。结合敏感性分析,煤基质瓦斯由密度梯度驱动的双重孔隙钻孔瓦斯模型更适用于描述瓦斯扩散行为。

4)对影响瓦斯运移的主要因素进行敏感性分析。钻孔瓦斯涌出率与原始瓦斯压力、孔隙率、裂隙渗透系数呈正相关,与基质半径负相关。裂隙透气性系

数、瓦斯压力对于瓦斯运移速率影响较大。

参考文献(References):

- [1] 刘大锰,贾奇峰,蔡益栋. 中国煤层气储层地质与表征技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 196–203.
LIU Dameng, JIA Qifeng, CAI Yidong. Research progress on coal-bed methane reservoir geology and characterization technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 196–203.
- [2] 谢和平,崔鹏飞,尚德磊,等. 深部煤层原位保压取心技术原理与瓦斯参数测定研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(8): 1–12.
XIE Heping, CUI Pengfei, SHANG Delei, et al. Research advances on the *in situ* pressure-preserved coring and gas parameter determination for deep coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(8): 1–12.
- [3] 王刚,陈雪畅,程卫民,等. 煤孔裂隙多尺度表征及其对渗透率的影响分析: 以中国 14 个大型煤炭基地为例[J]. 重庆大学学报, 2024, 47(4): 34–50.
WANG Gang, CHEN Xuechang, CHENG Weimin, et al. Multi-scale characterization of coal pore and fractures and its influence on permeability-Taking 14 large coal bases in China as examples[J]. Journal of Chongqing University, 2024, 47(4): 34–50.
- [4] WANG H, WANG E Y, LI Z H, et al. Study and application of dynamic inversion model of coal seam gas pressure with drilling[J]. Fuel, 2020, 280: 118653.
- [5] 张超林,王恩元,许江,等. 瓦斯抽采中煤层参数动态响应及其应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 127–134.
ZHANG Chaolin, WANG Enyuan, XU Jiang, et al. Dynamic response of coal seam parameters during gas drainage and its application[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(5): 127–134.
- [6] WANG Y, LIU S M. Estimation of pressure-dependent diffusive permeability of coal using methane diffusion coefficient: Laboratory measurements and modeling[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(11): 8968–8976.
- [7] VISHAL V, SINGH L, PRADHAN S P, et al. Numerical modeling of Gondwana coal seams in India as coalbed methane reservoirs substituted for carbon dioxide sequestration[J]. Energy, 2013, 49: 384–394.
- [8] 秦玉金,安丰华,苏伟伟,等. 基于 Fick 定律的柱状煤瓦斯扩散系数变化规律及模型构建[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 140–149.
QIN Yujin, AN Fenghua, SU Weiwei, et al. Direct determination of the diffusion coefficient variation of coal based on Fick's law and model establishment[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(8): 140–149.
- [9] 周世宁. 瓦斯在煤层中流动的机理[J]. 煤炭学报, 1990, 15(1): 15–24.
ZHOU Shining. The mechanism of gas flow in coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15(1): 15–24.
- [10] 秦跃平,王健,郑赞,等. 煤粒瓦斯变压吸附数学模型及数值解算[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 923–928.
QIN Yueping, WANG Jian, ZHENG Yun, et al. Coal particle gas

- adsorption mathematical model and numerical solution under variable pressures[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(4): 923–928.
- [11] WU F, QIN Y P, XU H, et al. Numerical solution of the mathematical model for constant pressure gas desorption in a coal matrix[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(1): 415–424.
- [12] LIU W, HE C, QIN Y P, et al. Inversion of gas permeability coefficient of coal particle based on Darcy's permeation model[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 50: 240–249.
- [13] 王登科, 唐家豪, 魏建平, 等. 煤层瓦斯多机制流固耦合模型与瓦斯抽采数值模拟分析[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 763–775.
WANG Dengke, TANG Jiahao, WEI Jianping, et al. A fluid-solid coupling model of coal seam gas considering gas multi-mechanism flow and a numerical simulation analysis of gas drainage[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 763–775.
- [14] 陈学习, 高泽帅, 金霏阳, 等. 不同粒径煤的瓦斯解吸扩散特性实验研究[J]. *华北科技学院学报*, 2022, 19(4): 1–6.
CHEN Xuexi, GAO Zeshuai, JIN Feiyang, et al. Experimental studies on gas desorption and diffusion characteristics of coal with different particle sizes[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2022, 19(4): 1–6.
- [15] LIU P, QIN Y P, LIU S M, et al. Non-linear gas desorption and transport behavior in coal matrix: Experiments and numerical modeling[J]. *Fuel*, 2018, 214: 1–13.
- [16] YE P P, LI B B, REN C H, et al. Investigation on damage-permeability model of dual-porosity coal under thermal-mechanical coupling effect[J]. *Gas Science and Engineering*, 2024, 123: 205229.
- [17] LIU J, QIN Y P, ZHANG S, et al. Numerical solution for borehole methane flow in coal seam based on a new dual-porosity model[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 68: 102916.
- [18] ZHAO C X, CHENG Y P, LI W, et al. Critical stress related to coalbed methane migration pattern: Model development and experimental validation[J]. *Energy*, 2023, 284: 128681.
- [19] 秦跃平, 徐浩, 毋凡, 等. 密度梯度驱动的煤粒瓦斯解吸扩散模型及试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(1): 169–176.
QIN Yueping, XU Hao, WU Fan, et al. Gas desorption and diffusion model driven by density gradient in coal particle and its experimental study[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 169–176.
- [20] XU Hao, QIN Yueping, WU Fan, et al. Mathematical model and numerical solution of constant pressure adsorption of gas in coal particles[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(4): 445–452.
- [21] 秦跃平, 郝永江, 王亚茹, 等. 基于两种数学模型的煤粒瓦斯放散数值解算[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(6): 923–928.
QIN Yueping, HAO Yongjiang, WANG Yaru, et al. Numerical solution of gas emission in coal particle based on two kinds of mathematical model[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(6): 923–928.
- [22] 郝永江. 煤体双重孔隙特征及钻孔瓦斯流动规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2015, 60–79.
Hao Yongjiang. Study on Dual Porosity Characteristics of Coal and Flowing Law of Gas in Drilling[D]. Beijing: China University of Mining and Technology–Beijing, 2015, 60–79.
- [23] ZHANG Z, LIU G F, WANG X M, et al. A fractal Langmuir adsorption equation on coal: Principle, methodology and implication[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 488: 150869.
- [24] XU H, QIN Y P, WU F, et al. Numerical modeling of gas extraction from coal seam combined with a dual-porosity model: Finite difference solution and multi-factor analysis[J]. *Fuel*, 2022, 313: 122687.
- [25] XU H, QIN Y P, YANG D Y, et al. Modeling of diffusion kinetics during gas adsorption in a coal seam with a dimensionless inversion method[J]. *Fuel*, 2022, 326: 125068.
- [26] LIU W, CHU X Y, XU H, et al. Migration behavior of two-component gases among CO₂, N₂ and O₂ in coal particles during adsorption[J]. *Fuel*, 2022, 313: 123003.
- [27] 王凯, 赵伟. 煤孔隙空间几何特征对瓦斯解吸曲线形态的控制机制研究进展[J]. *中国科学基金*, 2021, 35(6): 917–923.