

# 基于改进 QSGS 法的瓦斯多机制统一传输模型 与流动特性研究

张宏图<sup>1,2,3</sup>, 韦佳琪<sup>1</sup>, 王登科<sup>1,2,3</sup>, 李博涛<sup>1,2,3</sup>, 白云<sup>4</sup>, 何彪<sup>4</sup>, 袁明羽<sup>1</sup>, 卢卫永<sup>5</sup>

(1. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学 河南省瓦斯地质与瓦斯治理省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454000; 3. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同中心, 河南 焦作 454000; 4. 四川芙蓉川南建设工程有限公司, 四川 宜宾 644000; 5. 吕梁学院 资源与机械工程系, 山西 吕梁 033001)

**摘要:** 为准确揭示瓦斯在真实煤层中的流动特性, 基于瓦斯流动理论, 建立瓦斯多机制统一传输模型, 采用改进四参数随机生成法(QSGS)构建有效表征煤体孔隙结构的几何模型, 并用两点相关函数进行孔隙结构校验. 通过数值模拟分析不同流动机制的瓦斯传输模型及在不同入口压力下瓦斯多机制统一传输模型的瓦斯流速分布和瓦斯流量变化规律. 研究表明: 改进 QSGS 法重构孔隙结构与真实煤样孔隙结构的两点相关系数曲线在指数拟合曲线上呈现相似的变化规律, 能准确表征真实煤体孔隙结构. 重构孔隙结构的孔隙数量和有效运移通道均与孔隙率呈正相关关系, 孔隙分布随初始生长核分布概率增大而更加均匀. 与其他流动机制的传输模型相比, 瓦斯多机制统一传输模型其瓦斯流速和瓦斯流量最大, 更接近真实煤体孔隙内瓦斯流动规律, 且瓦斯流量随初始生长核分布概率的增大而略微增加. 瓦斯多机制统一传输模型模拟瓦斯流量与试验测量流量之间的误差随初始生长核分布概率的增大从 8.7% 增加至 10.1%. 入口压力增大使瓦斯流速在孔径较窄处显著提升, 瓦斯流量呈非线性增长趋势. 不同入口压力下, 瓦斯多机制统一传输模型模拟流量与试验测量流量之间误差最大为 10.2%, 进一步验证瓦斯多机制统一传输模型对瓦斯流动规律的描述更接近真实煤样中的流动情况.

**关键词:** 四参数随机生成法; 瓦斯多机制流动; 传输模型; 流动特性; 数值模拟

**中图分类号:** TD 712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)03-0640-13

## Research on the unified multi-mechanism gas transport model and flow characteristics based on improved QSGS method

ZHANG Hongtu<sup>1,2,3</sup>, WEI Jiaqi<sup>1</sup>, WANG Dengke<sup>1,2,3</sup>, LI Botao<sup>1,2,3</sup>,  
BAI Yun<sup>4</sup>, HE Biao<sup>4</sup>, YUAN Mingyu<sup>1</sup>, LU Weiyong<sup>5</sup>

(1. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 3. State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 4. Sichuan Furong Chuannan Construction Engineering Co., Ltd., Yibin, Sichuan 644000, China; 5. Department of Resources and Mechanical Engineering,

**收稿日期:** 2025-01-26 **修回日期:** 2025-03-30 **DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250031

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52174174); 河南省杰出青年科学基金项目(252300421010); 河南理工大学创新团队计划项目(T2022-1)

**通信作者:** 王登科(1980—), 男, 湖南省永州市人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事安全科学与工程方面的研究.

**E-mail:** wdk@hpu.edu.cn **Tel:** 18790238336

**引用格式:** 张宏图, 韦佳琪, 王登科, 等. 基于改进 QSGS 法的瓦斯多机制统一传输模型与流动特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(3): 640-652.

ZHANG Hongtu, WEI Jiaqi, WANG Dengke, et al. Research on the unified multi-mechanism gas transport model and flow characteristics based on improved QSGS method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(3): 640-652.

Lyuliang University, Lyuliang, Shanxi 033001, China)

**Abstract:** A unified transmission model of gas multi-mechanism was established based on gas flow theory to accurately reveal the flow characteristics of gas in authentic coal seams. The improved quartet structure generation set (QSGS) was utilised to construct a geometric model. The pore structure of coal is efficaciously characterised by this model. The two-point correlation function was employed to verify the pore structure. The gas velocity distribution and gas flow variation law of gas transmission models with different flow mechanisms and gas multi-mechanism unified transmission models under different inlet pressures were analysed through numerical simulation. The results indicate that a similar trend of change on the exponential fitting curve is exhibited by the two-point correlation coefficient curves of the pore structure reconstructed by the improved QSGS method and the pore structure of the real coal. This indicates that the pore structure of real coal can be accurately characterized by the reconstructed structure. The number of pores and effective migration channels of the reconstructed pore structure are positively correlated with porosity. The pore distribution becomes more uniform as the probability of the initial growth nucleus distribution increases. Compared with other transmission models of flow mechanism, the unified transmission model of gas multi-mechanism has the largest gas velocity and flow rate. This model is closer to the gas flow law in the pores of real coal. The gas flow rate increases slightly with the increase of the initial growth nucleus distribution probability. The error between the gas flow rate simulated by the gas multi-mechanism unified transmission model and the measured flow rate increases from 8.7 % to 10.1 % with the increase in the initial growth nucleus distribution probability. The gas velocity increases significantly at the narrow aperture because of the increase in inlet pressure. The gas flow rate shows a nonlinear growth trend. Under different inlet pressures, the maximum error between the simulated flow rate of the gas multi-mechanism unified transmission model and the measured flow rate is 10.2 %. The gas multi-mechanism unified transmission model's description of the gas flow law is closer to the real coal flow situation.

**Key words:** quartet structure generation set; gas multi-mechanism flow; transmission model; flow characteristic; numerical simulation

我国煤炭资源十分丰富,其开发利用对能源产业和工业发展具有重要意义,但煤炭资源的高效、安全开采目前仍面临着诸多挑战<sup>[1]</sup>.由于煤层中瓦斯含量较高,煤层开采过程中瓦斯突出灾害已成为制约煤矿安全生产的主要难题之一,因此提高瓦斯抽采效率、降低瓦斯含量和瓦斯压力是解决这一问题的关键<sup>[2]</sup>.然而研究发现,我国大部分矿区煤层瓦斯渗透率较低且煤体孔隙结构复杂,瓦斯多机制流动规律尚不明确,导致瓦斯抽采效率不甚理想<sup>[3]</sup>.因此,深入研究煤体孔隙结构对瓦斯流动特性的影响,揭示瓦斯多机制流动规律,对提高煤层渗透率、实现瓦斯高效抽采具有重要的理论和实践意义.

由于煤体孔隙结构具有复杂的非均质特征,诸多学者采用不同方法对多孔介质结构进行了重构.文献[4]在研究多孔介质介观尺度的孔隙流时

采用规则排列法构造出孔隙结构并对比分析了该结构的孔隙分布特征;文献[5]采用随机配置法构造出不同孔隙度的岩石骨架,探讨了该方法在分析页岩气方面的适用性;文献[6]分别采用规则排列法、随机配置法及随机生成法对多孔介质结构进行了重构;文献[7]采用工业 CT 扫描技术对试验煤样进行扫描,经数据处理得到了真实煤样的孔隙结构图像.四参数随机生长法(Quartet Structure Generation Set, QSGS)在重构多孔介质结构时具有较好的结构真实性与参数可控性,可等效表征多种类型的煤体孔隙结构<sup>[8]</sup>.QSGS 由文献[9]于 2007 年提出,该方法基于孔隙生长模型和丛生理理论,由 4 个关键参数调控多孔介质结构的形成.文献[10]采用 QSGS 法研究了微观孔隙结构的解析特性,可为关键参数合理取值提供参考.文献[11]利用 QSGS 法建立二维微观孔隙模型,得

出了孔隙度等变化对孔隙分布的影响. 文献[12]采用 QSGS 法构建了多孔介质二维数字结构, 模拟结果与试验数据具有较好的一致性. 文献[13]采用 QSGS 法构建了随机多孔材料模型, 通过与经验模型比较, 成功预测了多孔材料的有效扩散率. 文献[14]研究表明 QSGS 法可用于重构非均质页岩基质. 文献[15]通过调整 QSGS 的控制参数来研究其对生成各种多孔介质结构的影响, 并取得显著成果.

煤岩渗透率是影响瓦斯抽采效率的重要因素之一, 渗透率的变化需要考虑不同的瓦斯流动机制, 包括黏性流动、滑脱效应和表面扩散等<sup>[16-17]</sup>. 煤层中瓦斯赋存分为游离态和吸附态. 游离态瓦斯在煤层孔隙中以浓度梯度为驱动力的扩散行为统称为扩散, 扩散分为 Fick 扩散和克努森扩散. 吸附态瓦斯会在化学势能驱动下发生表面扩散<sup>[18]</sup>. 气体滑脱效应指气体在低渗透介质中流动时, 因分子与壁面作用减弱, 导致气体流动速度增加的现象<sup>[19]</sup>. 文献[20]研究发现瓦斯流中存在多种流动机制, 包括达西流、滑脱流、过渡流和自由分子流. 文献[21]将达西流、滑脱效应及高速非达西效应等多种非线性效应进行综合考量, 构建了储层气的多尺度统一流动模型. 文献[22]认为纳米孔气体传输机理包括连续流动、滑脱流动、克努森扩散和表面扩散. 文献[23]在研究纳米多孔结构瓦斯多机制流动特性时推导出了纳米孔气体传输统一模型.

综上所述, 现有研究多集中于 QSGS 法在多孔介质中传输特性的应用, 以及瓦斯在宏观煤样中的多机制流动规律. 目前关于瓦斯在真实煤体微观孔隙结构中的多机制流动规律尚不明确, 也未系统开展不同流动机制的传输模型对瓦斯运移规律影响的研究. 因此, 本研究采用改进 QSGS 法重构真实煤样孔隙结构并建立了瓦斯多机制统一传输模型, 分析了不同传输模型及不同入口压力下瓦斯多机制统一传输模型的瓦斯流速分布和瓦斯流量变化规律, 可为进一步研究瓦斯多机制流动的应用提供依据.

## 1 煤体孔隙结构重构与分析

### 1.1 改进的四参数随机生成法

传统 QSGS 法主要用于多孔介质结构的建模与重构, 尤其适用于复杂多孔材料内部孔隙结构的表征与分析. 通过对孔隙率  $\epsilon$ 、初始生长核分布概率  $P_c$ 、生长概率  $P_i$  及概率密度  $I_i^{m,n}$  的调控来

重构真实煤体孔隙结构<sup>[24]</sup>. 孔隙率  $\epsilon$  和初始生长核分布概率  $P_c$  是生长单元初始生长阶段的关键参数; 而生长概率  $P_i$  为在  $i$  方向上相邻单元生成生长相的概率, 对于二维多孔介质而言, 通常以 D2Q9 模型为基础构建, 表示在二维空间范围内, 有 9 个流体粒子生长方向, 即 4 个边方向、4 个角方向以及自身方向. 运用 QSGS 法时, 首先在生长区域内设置初始生长核, 以分布概率为  $P_c$  的固相颗粒作为初始生长相, 向各个离散方向以生长概率  $P_i$  进行生长, 直至孔隙占比达到预先设定的孔隙率, 生长过程停止<sup>[25]</sup>.

传统 QSGS 法虽能生成与真实煤样相似的孔隙结构, 但无法定量控制非线性孔隙特征. 因此, 为使孔隙结构更接近真实煤样, 笔者采用改进 QSGS 法重构煤体的孔隙结构, 整个重构过程在 Matlab 软件中完成. 与传统 QSGS 法相比, 改进 QSGS 法的优势在于将传统的固相生长转化为孔隙相生长, 更能精准映射煤岩孔隙的多成因动态耦合和非均质性特征, 且构造出的多孔介质结构孔隙连通性较强, 有利于分析瓦斯的流动特性<sup>[26]</sup>; 根据试验所用煤样的孔径分布曲线, 分  $j$  步将孔隙离散成多个生长相(即  $P_1, P_2, \dots, P_j$ )对孔径进行重构<sup>[27]</sup>. 孔隙相的生长概率为  $P_{cd}^j$ , 在构建过程中应始终保证  $P_{cd}^j$  不超过真实孔隙的分布概率以免孔隙分布过于离散或不均匀, 影响孔隙结构的真实性和有效性. 当第  $j$  步孔隙度达到设置孔隙度要求时, 构建工作完成, 停止生成孔隙. 采用改进 QSGS 法在重构煤体孔隙结构时,  $P_i$  和  $I_i^{m,n}$  的设定与传统 QSGS 构建方法保持一致. 图 1 为改进四参数随机生成法构建流程.

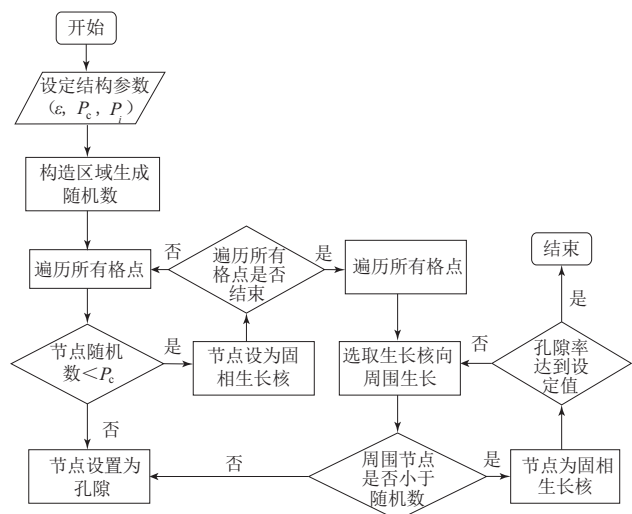


图 1 改进的四参数随机生成法流程

Fig. 1 Improved quart structure generation set process

## 1.2 孔隙重构结果

为使重构孔隙结构与真实煤体孔隙特性相匹配,选取孔隙率  $\epsilon$  与初始生长核分布概率  $P_c$  作为研究对象. 孔隙率  $\epsilon$  直接表征孔隙的体积占比,若孔隙率  $\epsilon$  偏离实际值,即使通过调整其他参数进行校正,重构孔隙结构仍难以与真实煤体孔隙结构保持一致;初始生长核分布概率  $P_c$  通过调控初始生长核的空间分布模式,决定孔隙成核位点的密度与聚集特性,从而影响孔隙网络的分形维数等结构特征;生长概率  $P_i$  与概率密度  $I_i^{m-n}$  对整体拓扑结构的影响占次要地位<sup>[28-29]</sup>. 孔隙率  $\epsilon$  和初始生长核分布概率  $P_c$  可通过试验手段量化标定,具备明确的物理意义与数据可获取性<sup>[30]</sup>.

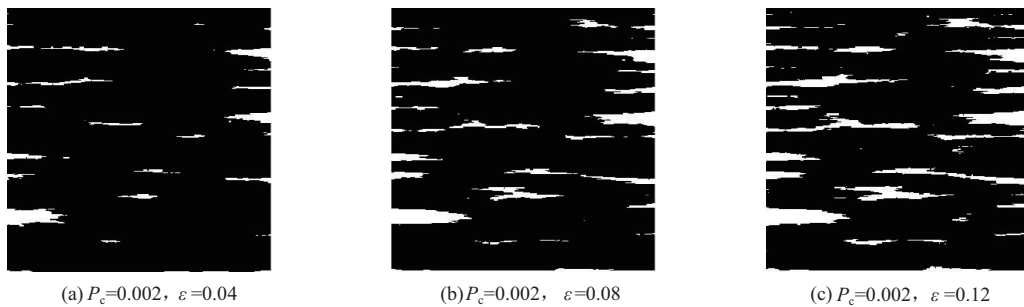


图2 不同孔隙率的重构煤体孔隙结构

Fig. 2 Pore structures of reconstructed coal with different porosity

### 1.2.2 不同初始生长核分布概率的重构孔隙结构

为明确初始生长核分布概率对孔隙结构重构的影响,设定孔隙率  $\epsilon$  为 0.04,将初始生长核分布概率  $P_c$  分别设定为 0.002, 0.005 和 0.010 进行模拟,重构结果如图3所示. 由该图可见,当初始生长核概率较小时,孔隙主要集中在少数区域,且孔

### 1.2.1 不同孔隙率的重构孔隙结构

为探讨孔隙率对煤体孔隙结构分布的影响,基于实际煤样孔隙率,设置  $\epsilon$  分别为 0.04, 0.08 和 0.12,设置  $P_c$  为 0.002,构造出相同初始生长核分布概率下不同孔隙率的几何模型<sup>[31]</sup>. 改进 QSGS 法重构的孔隙结构模型为二维模型,其尺寸为 8 mm×8 mm,如图2所示,图中黑色为煤基质,白色为煤层孔隙. 由图2可见,孔隙数量随孔隙率增大而增加,孔隙尺寸随孔隙率增大先增大后减小;孔隙率较低时,孔隙分布较稀疏,孔隙间的连通性较差;随孔隙率增加,孔隙分布更加密集,连通性增强,进而直接影响煤层渗透率和瓦斯流动特性.

隙尺寸较大,导致孔隙分布不均匀,呈现明显的聚集效应;随着初始生长核分布概率增大,孔隙朝着更广泛的区域蔓延,孔径逐渐减小,孔隙数量逐步增多,进而构建出均匀且分散的孔隙网络结构. 因此,选择适当的初始生长核分布概率,可有效重构孔隙大小和数量,同时使重构后的孔隙分布更接近于真实煤样.

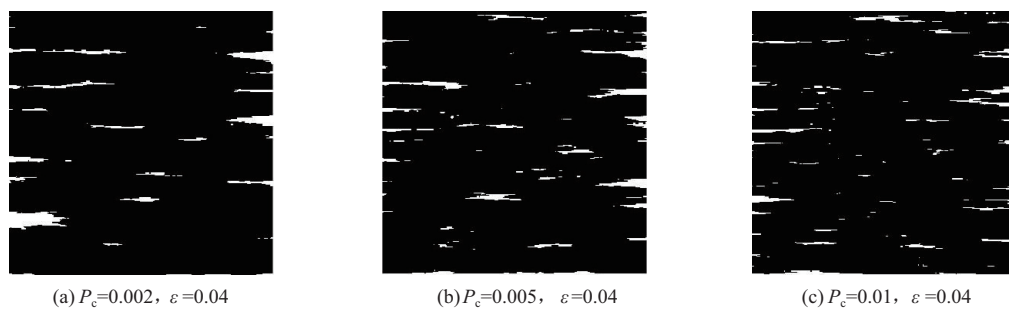


图3 不同初始生长核分布概率的重构煤体孔隙结构

Fig. 3 Pore structure of coal with different initial growth nucleus distribution probabilities

## 1.3 重构孔隙结构校验

与多孔介质中任意孔隙距离为  $h$  (由于两点相关系数衡量的是变量间的线性关系强度和方向,而非物理距离,两点相关函数距离无单位)的点是否为孔隙,可采用两点相关函数进行分析<sup>[27]</sup>. 若该点为孔隙,则两点相关性数值为 1,否则为 0. 随机

分布函数的两点相关系数  $R_{Z(x), Z(x+h)}$  求解公式为

$$R_{Z(x), Z(x+h)} = \frac{S - \epsilon^2}{\epsilon - \epsilon^2}, \quad (1)$$

式中:  $S$  为多孔介质中任意相距  $h$  的两点均为孔隙的概率;  $x$  为多孔介质中任意方向的位置;  $Z(x)$ ,  $Z(x+h)$  为两点随机分布函数.

图 4 展示了采用改进 QSGS 法重构的孔隙结构与真实煤样孔隙结构的两点相关系数对比情况. 真实煤样孔隙结构通过电镜扫描试验获取, 经二值化处理后得到编号为 BP1, BP2 及 BP3 共 3 组煤样的多孔介质图像, 再求解得出两点相关系数  $R$ . 由图 4 可见, 重构孔隙结构与真实煤样孔隙结构的两点相关系数曲线均随两质点间距增大而先减小后逐渐趋于平稳. 对 QSGS 重构孔隙结构、BP1、BP2 和 BP3 的两点相关系数曲线分别进行指数函数非线性拟合, 得到拟合函数  $R_1, R_2, R_3$  和  $R_4$ , 其拟合优度  $R^2$  均在 0.99 以上, 表明拟合结果与试验数据相关性较高.  $R_1, R_2, R_3$  与  $R_4$  的衰减幅度分别为 0.079 5, 0.091 8, 0.061 9 和 0.079 5; 衰减速率分别为 0.075 6, 0.058 9, 0.062 9 和 0.079 1; 最终收敛值分别为 0.018 8, 0.016 1, 0.008 5 和 0.027 0. 由于受扫描电镜精度局限和二值化阈值分割过程影响, 重构孔隙结构与真实煤样的拟合函数存在一定误差, 但其衰减幅度、衰减速率及最终收敛值仍具有高度相似性, 整体上能够反映真实煤体孔隙结构的几何特性.

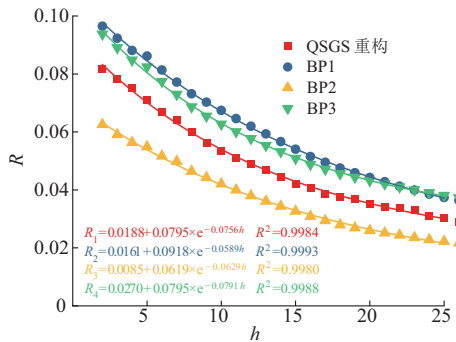


图 4 重构煤样与真实煤样的两点相关系数对比

Fig. 4 Comparison of two-point correlation coefficients between reconstructed coal samples and real coal samples

## 2 煤层瓦斯运输数值模拟

### 2.1 模型假设

瓦斯在煤层中的流动受达西定律和气体扩散理论的综合影响. 由于煤层孔隙结构复杂且瓦斯流动机制多样, 为提高计算效率并兼顾模拟精度, 在实际模拟中通常需要对瓦斯流动规律进行合理简化, 笔者做了以下假设:

- 1) 煤体变形属于小变形, 可不予考虑;
- 2) 瓦斯运移全过程为等温状态, 温度影响可忽略不计, 温度设置为 293 K;
- 3) 压力变化对瓦斯气体黏度的影响可忽略, 且瓦斯气体黏度为常数;
- 4) 不考虑单位体积煤基质中吸附态瓦斯解吸

的影响, 仅考虑瓦斯渗流与扩散.

### 2.2 瓦斯流动传输模型

为研究微观煤层孔隙中瓦斯多机制流动特性, 分别建立不同流动机制的传输模型进行数值模拟.

#### 2.2.1 瓦斯多机制统一传输模型

瓦斯在煤层中的流动机制并非单一传输模型能够描述, 瓦斯多机制统一传输模型需综合考虑瓦斯滑脱黏性流动、浓度扩散和吸附瓦斯表面扩散等因素. 为准确表征不同机制的作用及其耦合关系, 以瓦斯流动理论模型为基础, 建立瓦斯多机制统一传输模型<sup>[32]</sup>. 基于质量守恒定律, 单位体积煤基质中瓦斯的传输方程为

$$\frac{\partial m}{\partial t} + J = 0, \quad (2)$$

$$J = J_{vs} + J_T, \quad (3)$$

$$J_{vs} = \frac{r_e^2 PM}{8\mu RTl} (1 + \alpha Kn) \left(1 + \frac{4Kn}{1 - bKn}\right) \frac{dP}{dl}, \quad (4)$$

$$J_T = \frac{\pi\mu M}{12ART} \left(\frac{\lambda}{1 + Kn} + \frac{1}{1 + 1/Kn}\right) \frac{D_f}{1 + D_T - D_f} \cdot \frac{r_{\max}^{1+D_T}}{L_0^{D_T-1}} \left[1 - \left(\frac{r_{\min}}{r_{\max}}\right)^{1+D_T-D_f}\right] \Delta P \frac{M}{RT}, \quad (5)$$

式中:  $m$  为单位体积煤基质中的瓦斯质量, kg;  $M$  为瓦斯摩尔质量, kg/mol;  $P$  为气体进口端压力, Pa;  $R$  为瓦斯常数, J/(mol · K);  $T$  为煤层温度, K;  $t$  为时间, s;  $J$  为瓦斯总质量通量, kg/(m<sup>2</sup> · s);  $J_{vs}$  为考虑滑脱效应影响的连续流瓦斯质量通量, kg/(m<sup>2</sup> · s);  $J_T$  为考虑浓度扩散影响的瓦斯质量通量, kg/(m<sup>2</sup> · s);  $r_e$  为有效孔径, m;  $\mu$  为瓦斯气体黏度, Pa · s;  $l$  为气体流经的距离, m;  $Kn$  为克努森数;  $\alpha$  为稀疏因子;  $b$  为滑移系数, 通常为 1;  $A$  为多孔介质的毛束管渗流横截面积, m<sup>2</sup>;  $\lambda$  为瓦斯分子的平均自由程, m;  $L_0$  为长度尺度;  $D_f$  为孔径的分形维数;  $D_T$  为迂曲度分形维数;  $r_{\max}$  和  $r_{\min}$  分别为最大和最小孔径, m;  $\Delta P$  为试样两端压差, Pa.

联立式(3), (4), (5)可得到考虑瓦斯多机制流动的统一传输模型(模型一), 其表达式为

$$\frac{\varphi M}{RT} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{r_e^2 PM}{8\mu RTl} (1 + \alpha Kn) \left(1 + \frac{4Kn}{1 - bKn}\right) \frac{dP}{dl} + \frac{\pi\mu M}{12ART} \left(\frac{\lambda}{1 + Kn} + \frac{1}{1 + 1/Kn}\right) \frac{D_f}{1 + D_T - D_f} \cdot \frac{r_{\max}^{1+D_T}}{L_0^{D_T-1}} \left[1 - \left(\frac{r_{\min}}{r_{\max}}\right)^{1+D_T-D_f}\right] \Delta P = 0, \quad (6)$$

式中  $\varphi$  为单位体积煤基质中的瓦斯体积, m<sup>3</sup>.

### 2.2.2 不考虑滑脱效应影响的传输模型

不考虑滑脱效应影响的传输模型与模型一相比,主要区别在于前者不考虑克努森数修正的滑移项对瓦斯传输的影响,其传输方程<sup>[33]</sup>为

$$\frac{\partial m}{\partial t} + J_2 = 0, \quad (7)$$

$$J_2 = J_v + J_T, \quad (8)$$

$$\frac{\varphi M}{RT} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{r_c^2 PM}{8\mu RT l} \frac{dP}{dl} + \frac{\pi \mu M}{12ART} \left( \frac{\lambda}{1+Kn} + \frac{1}{1+1/Kn} \right) \frac{D_f}{1+D_T-D_f} \frac{r_{\max}^{1+D_T}}{L_0^{D_T-1}} \left[ 1 - \left( \frac{r_{\min}^{1+D_T-D_f}}{r_{\max}} \right) \right] \Delta P = 0. \quad (10)$$

### 2.2.3 不考虑瓦斯扩散影响的传输模型

不考虑瓦斯扩散影响的传输模型与模型一相比,主要区别在于前者未考虑瓦斯的克努森扩散及 Fick 扩散对瓦斯传输的影响,仅考虑滑脱效应,此时传输方程为

$$\frac{\partial m}{\partial t} + J_3 = 0, \quad (11)$$

$$J_3 = J_{vs}, \quad (12)$$

式中  $J_3$  为不考虑瓦斯扩散影响的瓦斯质量流量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

结合式(4)得到不考虑瓦斯扩散影响的传输模型(模型三),其表达式为

$$\frac{\varphi M}{RT} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{r_c^2 PM}{8\mu RT l} (1 + \alpha Kn) \left( 1 + \frac{4Kn}{1 - bKn} \right) \frac{dP}{dl} = 0. \quad (13)$$

### 2.2.4 不考虑瓦斯多机制流动影响的传输模型

在描述瓦斯宏观渗流特性时通常不考虑瓦斯多机制流动影响、滑脱效应影响及瓦斯分子扩散影响,仅考虑连续达西流动,此时传输方程为

$$\frac{\partial m}{\partial t} + J_v = 0, \quad (14)$$

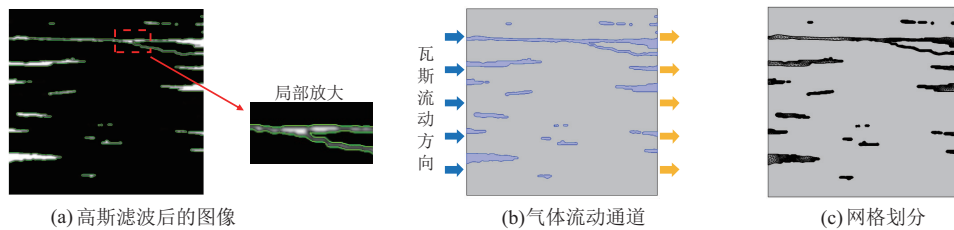


图5 几何模型的网格划分

Fig. 5 Meshing of geometric model

表1 数值模拟参数

Table 1 Numerical simulation parameters	
模拟参数	数值
上、下边界压力/MPa	0
入口压力/MPa	0.198, 0.317, 0.512, 0.791, 0.988
出口压力/Pa	101 325
孔隙率	0.04
初始生长核分布概率	0.002, 0.005, 0.010

$$J_v = \frac{r_c^2 \rho}{8\mu l} \Delta P, \quad (9)$$

式中:  $J_2$  为不考虑滑脱效应的瓦斯质量流量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $J_v$  为流经孔隙的连续流瓦斯质量流量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $\rho$  为瓦斯密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

将式(5),(8),(9)联立可得到不考虑滑脱效应影响的瓦斯传输模型(模型二),其表达式为

$$J_v = \frac{r_c^2 PM}{8\mu RT} \frac{dP}{dl}. \quad (15)$$

联立式(14),(15)得到不考虑瓦斯气体多机制流动影响的传输模型(模型四),其表达式为

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \frac{r_c^2 PM}{8\mu RT} \frac{dP}{dl} = 0. \quad (16)$$

### 2.3 几何模型与边界条件

以孔隙率为 0.04、初始生长核分布概率为 0.002 的重构孔隙结构为例,对重构出的煤体孔隙结构进行网格划分,如图 5 所示.采用 Comsol 软件实现重构图像到曲线的提取过程,经高斯滤波函数过滤后,绘制孔隙的等值线以形成孔隙轮廓曲线如图 5a 所示.将等值线阈值和曲线容差分别设置为 0.12 和 0.002,插值方式为线性单元.形成孔隙实体作为气体流动的通道如图 5b 所示.利用网络模块对几何模型进行网格划分,构建模型的网格划分如图 5c 所示.重构煤体孔隙结构的几何模型的上下边界处于无通量状态,且不受任何应力作用影响,瓦斯从左端流入,右端流出,如图 5b 所示.瓦斯入口压力及出口压力通过 Dirichlet 边界条件设定,具体参数设置如表 1 所示.

### 2.4 模型验证

为验证数值模型的准确性,采用河南理工大学的微尺度气体流动试验系统对流经真实煤样的瓦斯流量进行测定,并与数值模拟瓦斯流量进行对比<sup>[34]</sup>.试验系统如图 6 所示,该系统由气体的压力控制系统、调压阀、压力表与压差表、试样夹持

器和出口流量测量仪组成. 主要技术参数为: 进口压力控制在  $0 \sim 1$  MPa 之间, 精度为  $\pm 0.01$  MPa; 气体流量计测量范围为  $0 \sim 1.67$  mL/s (误差为  $\pm 1\%$ )、 $0 \sim 8.33$  mL/s (误差为  $\pm 1\%$ )、 $0 \sim 33.3$

mL/s (误差为  $\pm 1\%$ ); 压力传感器测压范围为:  $0 \sim 1.6$  MPa (误差为  $\pm 0.25\%$ ); 压差传感器测压范围为:  $0 \sim 40$  kPa (耐压 3 MPa, 误差为  $\pm 1\%$ ); 试样尺寸:  $\varnothing 34$  mm.

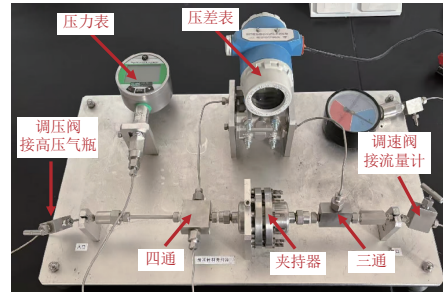
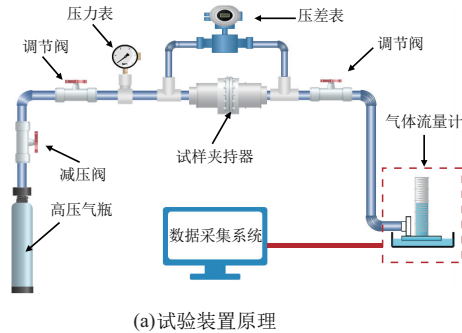


图 6 瓦斯微尺度气体流动试验系统<sup>[35]</sup>

Fig. 6 Gas micro scale gas flow test system

试验对象为白坪煤矿的软煤, 将煤样切割成直径为 34 mm、高度为 8 mm 的圆柱形试样. 试验过程中保持出口调速阀大小不变, 使出口压力为大气压, 通过调节进气口的调压阀控制进口气体的压力, 以完成不同克努森数下的气体流动试验. 具体试验步骤为:

首先连接好各个管路, 在放置试验煤样之前, 检查试验装置整体的气密性, 保证每个接口处气密性完好. 将制备好的煤样与试验系统的进气管和出气管连接后再次检查连接处有无漏气现象.

打开出口调速阀并保持不变. 调节入口调压阀, 将进气压力调节至设定的试验数值, 当煤样夹持器两端压差传感器的数值为零后, 打开出气口阀门, 连接气体流量计, 观察流量计有均匀、连续的气泡冒出时, 开始计时, 记录此时流量计数值. 监测一段时间后, 再次记录流量计数值及此时压力表数据, 压力表数据代表此时入口压力. 数据记录完成后, 使压力范围保持一致, 重复上述步骤, 共完成相同压力范围的 2 组 (A, B 组) 试验, 最后取平均值作为试验数据. 试验结果如表 2 所示.

表 2 不同入口压力下瓦斯流量试验结果

Table 2 The gas flow rates under varying inlet pressures were measured

入口压力/MPa	$Kn$	A 组流量/(mL · s <sup>-1</sup> )	B 组流量/(mL · s <sup>-1</sup> )	平均流量/(mL · s <sup>-1</sup> )
0.198	0.146	0.162	0.170	0.166
0.317	0.091	0.341	0.351	0.346
0.512	0.057	0.671	0.669	0.670
0.791	0.037	1.611	1.631	1.621
0.988	0.029	2.634	2.626	2.630

将试验结果与通过理论计算得出的瓦斯多机制统一传输模型的体积流量进行对比, 结果如图 7 所示.

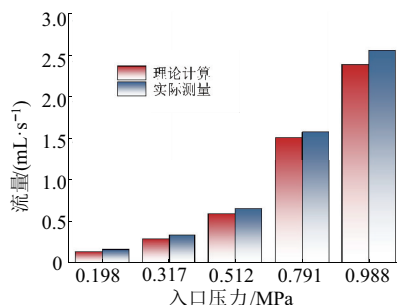


图 7 试验测试流量与理论流量对比

Fig. 7 Comparison between experimental test flow and theoretical flow

由图 7 可知, 在较低入口压力下, 由于煤样两端压差较小, 流经煤样的瓦斯流量增长缓慢; 随着入口压力增大, 煤样内的试验气体受压力驱动力作用更加显著, 瓦斯流量快速增长. 经理论计算出的瓦斯流量和试验测试流量变化趋势相同. 受模型假设影响, 试验测试流量与理论计算流量之间存在一定误差, 平均误差为 10.8%, 整体上误差较小, 可为数值模拟分析提供参考依据.

### 3 数值模拟结果分析

#### 3.1 不同传输模型流动规律研究

为分析不同传输模型的瓦斯流动规律, 同时考虑不同初始生长核分布概率对瓦斯流动规律的影响

响,将孔隙率设置为 0.04、初始生长核分布概率设置为 0.002,0.005 和 0.010,孔隙压力设置为 0.317 MPa,对不同流动机制的传输模型开展数值

模拟,得到不同初始生长核分布概率下的瓦斯流速分布如图 8 所示.

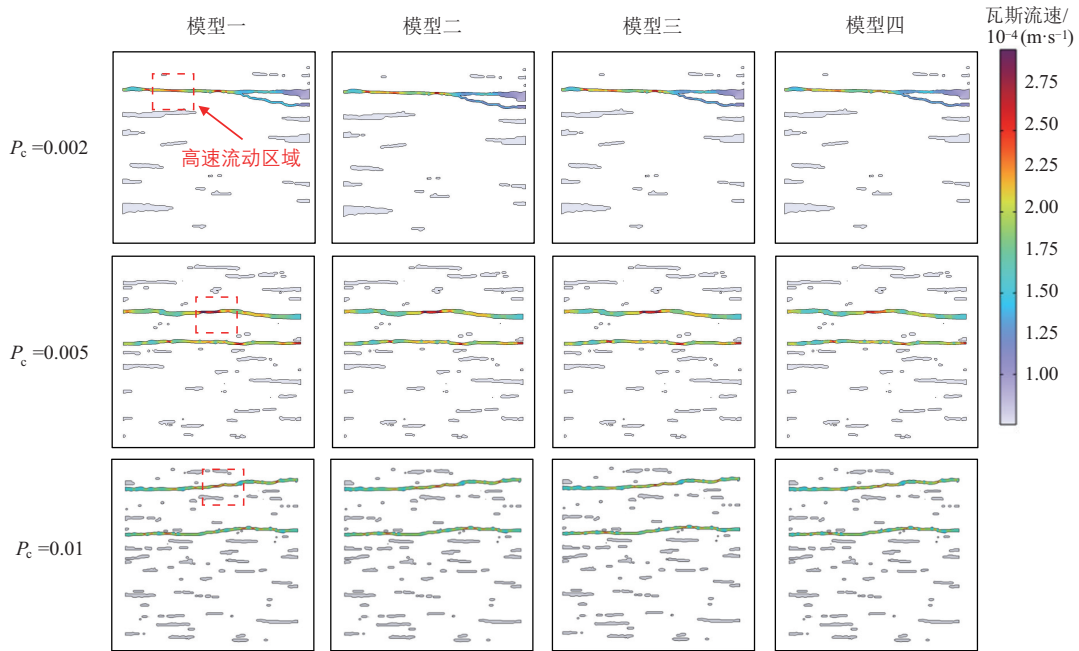


图 8 不同初始生长核分布概率条件下不同传输模型瓦斯流速云图

Fig. 8 The velocity contours of the different models under varying initial nucleation probability distributions

由图 8 可知,封闭孔隙内部不存在瓦斯的流动现象,瓦斯率先进入连通性较好的孔隙中流动,孔径较大且相互连通的孔隙是瓦斯流动的主要通道.在孔径较窄处,瓦斯流速显著增加;反之在孔径较宽处,瓦斯流速相对平缓.模型一相较于其他传输模型的瓦斯流速在孔径较窄处最大,模型二与模型三次之,模型四最小.表明不同传输模型的瓦斯运移规律存在一定的差异,模型一考虑渗流、扩散和滑脱效应的耦合作用,能够较为全面地反映瓦斯运移特征,其中扩散机制在低渗煤层或微孔隙中起主导作用,通过压力梯度和浓度梯度输

送瓦斯,不考虑扩散效应将导致低渗透区域的瓦斯传输效率下降;文献[35]在研究考虑滑脱效应的受载含瓦斯煤运移规律中指出,滑脱效应能够减弱瓦斯分子与孔壁之间的相互作用,降低流动阻力,提高瓦斯传输效率;反之,若不考虑滑脱效应,瓦斯分子与孔隙壁面之间的摩擦阻力增大,导致流动效率下降.此外,模型四忽略多机制流动的耦合作用,瓦斯流动仅依赖于压力梯度驱动,流动效率显著降低.

将数值模拟得出的瓦斯流量与试验测得的瓦斯流量进行对比,结果如图 9 所示.

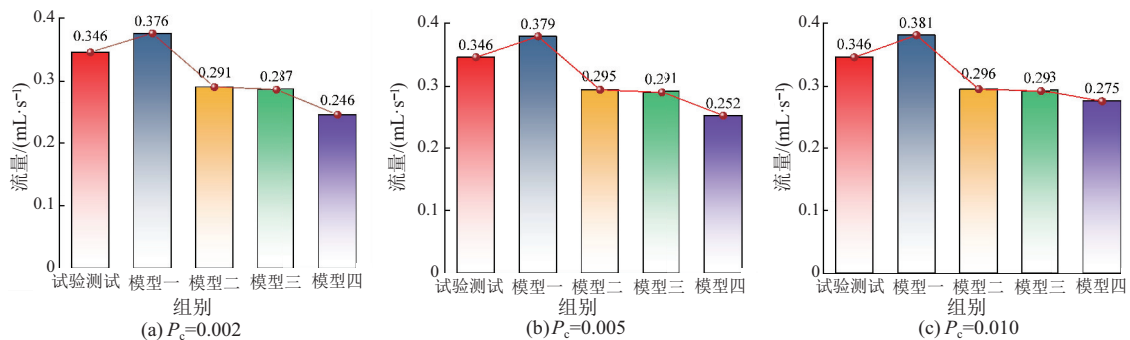


图 9 不同初始生长核分布概率下试验测得流量与 4 个模型模拟气体流量对比

Fig. 9 The experimentally measured flow rates under different initial nucleation probabilities were compared with the simulated gas flow rates of the four models

由图 9 可知,不同传输模型的瓦斯流量存在一定差异, $P_c=0.002$  时,模型一瓦斯流量最大,为 0.376 mL/s;模型二和模型三次之,分别为 0.291, 0.287 mL/s,其中模型三瓦斯流量略低于模型二,表明不考虑瓦斯扩散对瓦斯运移的影响较大;模型四瓦斯流量最小,为 0.246 mL/s.文献[36]在研究煤的纳米孔隙中瓦斯多机制流动模型时指出:在低压条件下,考虑吸附和扩散时的表观渗透率比仅考虑扩散和仅考虑滑脱效应时的表观渗透率更大,因此模型一的表观渗透率高于其他传输模型,进而引起瓦斯运移效率的提高,瓦斯流量随之增大.由图 9b 与图 9c 可知, $P_c=0.005$  及  $P_c=0.010$  时,模型一的模拟瓦斯流量分别为 0.379, 0.381 mL/s,其他传输模型的模拟瓦斯流量随初始生长核分布概率的增长均呈小幅增长趋势.这是因为初始生长核分布概率的增大使孔隙分布更加均匀,瓦斯有效运移通道增加,局部孔径略微减

小,导致瓦斯流速加快,瓦斯流量增加.

表 3 为不同传输模型的瓦斯模拟流量与试验测量流量的误差.由表 3 可知,模型一在不同初始生长核分布概率条件下的模拟流量与试验测量流量的误差最小,分别为 8.7%、9.5%和 10.1%,平均误差为 9.4%,表明模型一在表征瓦斯在煤层孔隙中的运移规律时更加准确,模拟结果与试验数据具有较高的一致性;模型二与模型三的模拟流量与试验测量流量之间的误差相对较大,在 14%~17%之间,二者数值相对接近,差距可忽略不计,可见不考虑滑脱效应或扩散效应的传输模型对瓦斯流动规律的描述存在一定偏差,且影响程度相近;模型四模拟流量与试验测量流量误差最大,在 20%~29%之间,表明忽略瓦斯多机制流动影响的传输模型将导致对瓦斯运移规律的描述存在较大偏差.

表 3 不同传输模型模拟瓦斯流量与试验测量流量误差

Table 3 The error of simulated gas flow and experimental measurement of different transmission models

模型编号	$P_c=0.002$		$P_c=0.005$		$P_c=0.010$	
	模拟流量/(mL·s <sup>-1</sup> )	误差/%	模拟流量/(mL·s <sup>-1</sup> )	误差/%	模拟流量/(mL·s <sup>-1</sup> )	误差/%
模型一	0.376	8.7	0.379	9.5	0.381	10.1
模型二	0.291	15.9	0.295	14.7	0.296	14.4
模型三	0.287	17.1	0.291	15.8	0.293	15.3
模型四	0.246	28.9	0.252	27.2	0.275	20.5

3.2 考虑不同入口压力作用下的瓦斯流动规律

进一步分析入口压力变化对模型一瓦斯流动

规律的影响,设置不同入口压力进行数值模拟,得到瓦斯流速分布如图 10 所示.

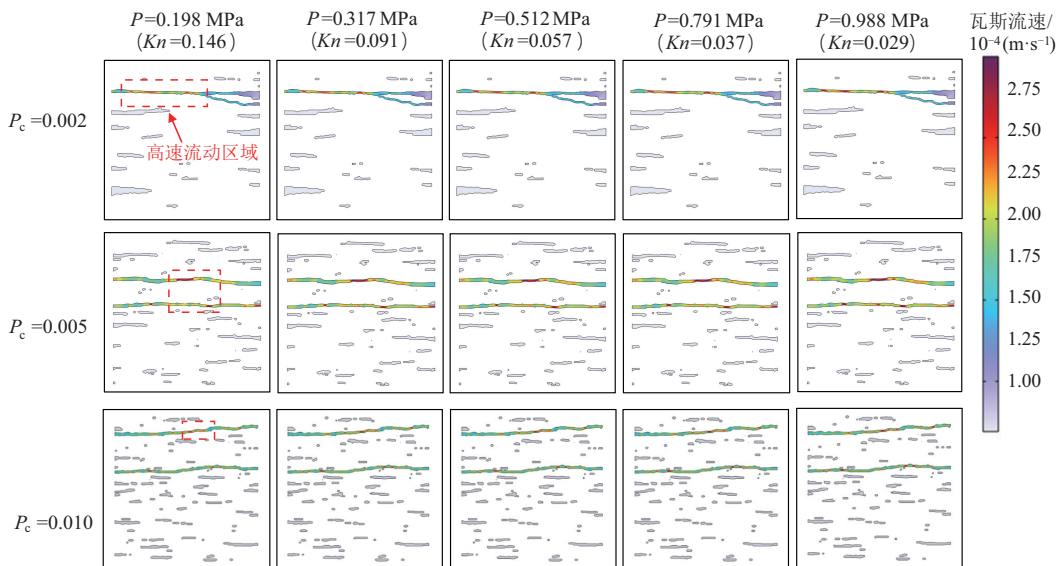


图 10 不同入口压力下瓦斯多机制统一传输模型的瓦斯流速分布

Fig. 10 The velocity distribution of gas multi-mechanism unified transmission model under different inlet pressures

由图 10 可见,随着入口压力增大,瓦斯流速在孔径较窄处明显加快.入口压力增大导致气体分

子之间的平均碰撞频率上升,分子平均自由程减小,从而使 Kn 数下降.具体表现为:入口压力为

0.198 MPa 时,  $Kn=0.146$ , 此时瓦斯流动处于过渡流动区, 瓦斯分子之间碰撞频率较低, 瓦斯与壁面之间碰撞频率相对较高, 瓦斯流动机制为滑脱效应与扩散效应并存, 且流动状态介于分子流动和连续流动之间, 瓦斯流速的分布较为复杂, 瓦斯在靠近壁面处流速较低; 入口压力为 0.317 MPa 时,  $Kn=0.091$ , 其值介于 0.01 与 0.10 之间, 瓦斯流动处于以滑脱流为主的瓦斯流动区, 瓦斯分子之间碰撞占主导作用, 此时主要应考虑滑脱效应, 即瓦斯在边界壁面处的流速不为零, 瓦斯流速加快使其流量增加; 入口压力分别为 0.512, 0.791 和 0.988 MPa 时, 克努森数均在 0.01 至 0.10 之间, 瓦斯运移规律与入口压力为 0.317 MPa 时相似, 表明适当增加煤体孔隙内的压差可有效提高瓦斯运移效率。

图 11 展示了不同入口压力下的模拟瓦斯流量与试验测量流量。

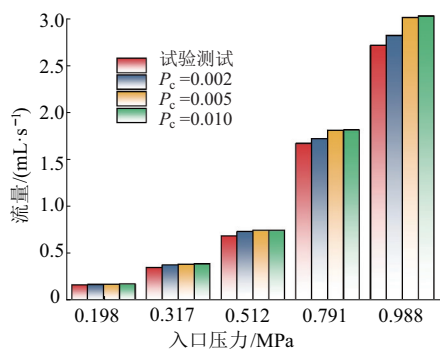


图 11 不同入口压力下的瓦斯流量

Fig. 11 Gas flow rate under different inlet pressures

由图 11 可见, 当入口压力由 0.198 MPa 增加至 0.317 和 0.512 MPa 时, 试验测量瓦斯流量由 0.166 mL/s 增加至 0.346 和 0.670 mL/s,  $P_c=0.002$  时的模拟瓦斯流量由 0.170 mL/s 增加至 0.372 和 0.714 mL/s, 瓦斯流量呈缓慢增加趋势; 入口压力增加至 0.791 MPa 及 0.988 MPa 时, 试验测量瓦斯流量增加至 1.621 和 2.630 mL/s,  $P_c=0.002$  时的模拟瓦斯流量增加至 1.672 和 2.732 mL/s, 瓦斯流量增加速率明显加快。瓦斯流量随入口压力的增大呈非线性增长趋势, 这与文献[37]的研究结论相似。文献[38]研究表明: 孔隙压力从 0.25 MPa 增大至 1.00 MPa 时, 滑脱效应逐渐减弱, 煤的气测渗透率降低。尽管煤层渗透率有所减小, 但由于煤层进出口压差的增大, 使气体密度增加, 导致瓦斯流经孔隙的总质量通量增加, 瓦斯流量依旧呈增加趋势。  $P_c=0.005$  和  $P_c=0.010$  时的模拟瓦斯流量变化规律与  $P_c=0.002$

时相同, 均呈非线性增加趋势。由于数值模拟基于一定假设条件, 模型中的假设无法完全反映煤层复杂性, 导致数值模拟流量与试验测量流量(见表 2)之间存在一定误差。  $P_c=0.002$  时模型一在不同入口压力下的模拟瓦斯流量与试验测量流量之间的误差范围为 2.4%~7.0%,  $P_c=0.005$ ,  $P_c=0.010$  时的误差范围分别为 4.0%~9.8%, 5.1%~10.2%。整体而言, 误差较小, 均在 10.2% 以下, 且在入口压力为 0.198 MPa 时, 模拟瓦斯流量与试验测量瓦斯流量之间的误差均在 5.0% 以下, 表明模型一在较低入口压力下对瓦斯流动规律的描述与实际情况更为接近。

## 4 结论

1) 采用改进 QSGS 法重构了孔隙结构, 其孔隙数量与孔隙率呈正相关, 孔径随孔隙率增大而先增大后减小; 初始生长核分布概率的增大使孔隙分布更加均匀。改进 QSGS 法重构孔隙结构与真实煤样孔隙结构的两点相关函数拟合曲线的变化趋势高度相似, 验证了改进 QSGS 法在表征真实煤岩孔隙结构方面的可靠性。

2) 瓦斯多机制统一传输模型与其他传输模型相比较, 其瓦斯流速在孔径较窄处明显加快, 瓦斯运移效率更高, 模型二与模型三次之, 模型四与真实煤体孔隙结构的差距最大, 且瓦斯多机制统一传输模型模拟瓦斯流量与试验测量流量误差最小, 验证了瓦斯多机制统一传输模型具有更高的适用性和准确性。

3) 瓦斯多机制统一传输模型中瓦斯流速随入口压力增大而增大, 适当增加煤体孔隙内的压差可有效提高瓦斯运移效率, 且瓦斯多机制统一传输模型在较低入口压力下的瓦斯流动与实际更加符合。

## 参考文献:

- [1] 袁 亮. 煤炭工业碳中和发展战略构想[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5): 103-110.  
YUAN Liang. Strategic conception of carbon neutralization in coal industry [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(5): 103-110.
- [2] WANG D K, LI L, ZHANG H T, et al. Intelligent identification of coal fractures using an improved U-shaped network [J]. Advances in Geo-Energy Research, 2025, 15(2): 129-142.
- [3] LI B T, LIN H F, WEI J P, et al. Investigation on coal damage and fracture extension law of liquid nitrogen

- injection precooling and fracturing under true triaxial stress [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2025, 35(2): 213-229.
- [4] 雷长征. 饱和多孔介质介观尺度孔隙流的 Lattice Boltzmann 模拟[D]. 南京: 南京大学, 2015.  
LEI Changzheng. Simulation on mesoscopic-scale flow in pores of saturated porous media using Lattice Boltzmann Method [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [5] 符东宇. 基于格子 Boltzmann 方法的页岩气藏微观渗流机理研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.  
FU Dongyu. Study of microscopic flow mechanisms of shale gas based on Lattice Boltzmann Method [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [6] 霍兴辉. 基于 LBM 的致密气藏微尺度渗流研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.  
HUO Xinghui. Research on microscale percolation of tight gas reservoir based on LBM [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [7] 王登科, 曾凡超, 王建国, 等. 显微工业 CT 的受载煤样裂隙动态演化特征与分形规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(6): 1165-1174.  
WANG Dengke, ZENG Fanchao, WANG Jianguo, et al. Dynamic evolution characteristics and fractal law of loaded coal fractures by micro industrial CT [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(6): 1165-1174.
- [8] 郭海军, 王凯, 崔浩, 等. 型煤孔裂隙结构及其分形特征实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(6): 1206-1214.  
GUO Haijun, WANG Kai, CUI Hao, et al. Experimental investigation on the pore and fracture structure of the reconstructed coal and its fractal characteristics [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(6): 1206-1214.
- [9] WANG M R, PAN N. Numerical analyses of effective dielectric constant of multiphase microporous media [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(11): 114102.
- [10] 张季如, 钟思维. 四参数随机生成法重构土体微观孔隙结构的分形特征[J]. *水利学报*, 2018, 49(7): 814-822.  
ZHANG Jiru, ZHONG Siwei. Fractal behaviors of micro-scope pore structure of soil reconstructed by quartet structure generation set [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(7): 814-822.
- [11] 罗齐彬. 隐伏铀矿勘探中地气测量机理及其应用研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2019.  
LUO Qibin. Research on mechanism and application of geogas measurement in concealed uranium deposit prospecting [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.
- [12] LI R, WANG Z H, DONG H, et al. Lattice Boltzmann modeling of the effective thermal conductivity in plant fiber porous media generated by quartet structure generation set [J]. *Materials & Design*, 2023, 234: 112303.
- [13] MA Q, CHEN Z Q, SHI J, et al. Lattice Boltzmann modeling of VOC desorption and diffusion in porous materials VOC desorption and diffusion [J]. *Building and Environment*, 2014, 72: 145-153.
- [14] LIU J, XUE Y, ZHANG Q, et al. Micro-cracking behavior of shale matrix during thermal recovery: Insights from phase-field modeling [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 239: 107301.
- [15] CHEN S, AI B, LI Y, et al. The effective thermal conductivity of random isotropic porous media analysis and prediction [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2024, 167: 105895.
- [16] 林柏泉, 张祥良. 低透难抽煤层等离子体致裂增透机制及研究进展[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(6): 1041-1057.  
LIN Baiquan, ZHANG Xiangliang. Mechanism and research progress of plasma induced cracking and enhancement in low permeability and hard to extract coal seams [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(6): 1041-1057.
- [17] 王蔚, 卫彦昭, 贾天让, 等. 华北煤系变形特征与煤矿瓦斯赋存规律[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(6): 121-130.  
WANG Wei, WEI Yanzhao, JIA Tianrang, et al. Deformation characteristics of coal measures and gas occurrence law of coal mines in north China [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(6): 121-130.
- [18] 宋浩晟, 李波波, 陈帅, 等. 页岩储层动态表观渗透率演化机制[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(5): 873-885.  
SONG Haosheng, LI Bobo, CHEN Shuai, et al. Evolution mechanism of dynamic apparent permeability of shale reservoirs [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(5): 873-885.
- [19] 王登科, 李文睿, 浦海, 等. 考虑气体多层吸附的表面扩散传输模型[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(1): 115-123.  
WANG Dengke, LI Wenrui, PU Hai, et al. A surface diffusion transport model considering multilayer adsorption behavior of gas [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*,

- 2020,44(1):115-123.
- [20] WANG D K, LIU S M, WEI J P, et al. A research study of the intranopore methane flow law [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (29):18607-18613.
- [21] 朱维耀, 亓倩. 页岩气多尺度复杂流动机理与模型研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(2): 111-119.  
ZHU Weiyao, QI Qian. Study on the multi-scale nonlinear flow mechanism and model of shale gas [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2016, 46(2): 111-119.
- [22] 吴克柳, 李相方, 陈掌星. 页岩气纳米孔气体传输模型[J]. 石油学报, 2015, 36(7):837-848.  
WU Keliu, LI Xiangfang, CHEN Zhangxing. A model for gas transport through nanopores of shale gas reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 837-848.
- [23] 魏强. 纳米多孔炭的瓦斯多机制流动特性与 LBM 数值模拟研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2021.  
WEI Qiang. Multi mechanism gas flow characteristics and LBM numerical simulation of nanoporous carbon [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2021.
- [24] 李仁民, 刘松玉, 方磊, 等. 采用随机生长四参数生成法构造黏土微观结构[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10):1897-1901.  
LI Renmin, LIU Songyu, FANG Lei, et al. Microstructure of clay generated by quartet structure generation set [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(10):1897-1901.
- [25] 钟思维. 四参数随机生成法重构土壤微观孔隙结构的量化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.  
ZHONG Siwei. Quantitative study on microscope pore structure of soil reconstructed by quartet structure generation set [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [26] 金毅, 宋慧波, 潘结南, 等. 煤微观结构三维表征及其孔-渗时空演化模式数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增1):2632-2641.  
JIN Yi, SONG Huibo, PAN Jienan, et al. Three-dimensional representation of coal's microstructure and numerical analysis of its pore-permeability spatial temporal evolution mode [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup 1): 2632-2641.
- [27] 袁明羽. 郑煤集团白坪煤业有限公司松软煤层瓦斯流动机制与数值模拟研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.  
YUAN Mingyu. Zhengmei Group Baiping Coal Industry Co., Ltd. gas flow mechanism and numerical simulation of loose and soft coal seams [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023.
- [28] 赵凯. 基于孔隙尺度的多孔介质流动与传热机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.  
ZHAO Kai. Mechanism investigation on flow and heat transfer in porous media on pore scale [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2010.
- [29] 郭勇义, 高亚斌, 曹敬, 等. 基于修正压汞法的不同瓦斯含量煤样孔隙结构及分形特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6):1075-1083.  
GUO Yongyi, GAO Yabin, CAO Jing, et al. Study on pore structure and fractal characteristics of coal samples with different gas content based on modified MIP [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6):1075-1083.
- [30] 金毅, 王俏俏, 董佳斌, 等. 颗粒填充型分形孔隙结构复杂组构表征[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6):1160-1171.  
JIN Yi, WANG Qiaoqiao, DONG Jiabin, et al. Characterization of the complexity assembly of fractal bed-packing porous media [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1160-1171.
- [31] 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.
- [32] 魏建平, 王洪磊, 王登科, 等. 考虑渗流-扩散的煤层瓦斯流动修正模型[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5):873-878.  
WEI Jianping, WANG Honglei, WANG Dengke, et al. An improved model of gas flow in coal based on the effect of penetration and diffusion [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(5):873-878.
- [33] 吴克柳, 李相方, 陈掌星. 页岩气有机质纳米孔气体传输微尺度效应[J]. 天然气工业, 2016, 36(11): 51-64.  
WU Keliu, LI Xiangfang, CHEN Zhangxing. Micro-scale effects of gas transport in organic nanopores of shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(11):51-64.
- [34] 王登科, 袁明羽, 李振, 等. 微纳米孔隙内气体流

- 动特性与 LBM 数值模拟研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2024, 43(2): 15-25.
- WANG Dengke, YUAN Mingyu, LI Zhen, et al. Gas flow characteristics in micro and nano pores and its LBM numerical simulation [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2024, 43(2): 15-25.
- [35] 魏建平, 吴松刚, 王登科, 等. 温度和轴向变形耦合作用下卸载含瓦斯煤渗流规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 168-174.
- WEI Jianping, WU Songgang, WANG Dengke, et al. Seepage rules of loaded coal containing gas under the coupling effect of temperature and axial deformation [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(1): 168-174.
- [36] 李 伟, 杨 康, 程远平. 煤层瓦斯解吸扩散过程中甲烷碳同位素分馏动力学模型[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 849-859.
- LI Wei, YANG Kang, CHENG Yuanping. Dynamics model for fractionation of carbon isotopes of methane in the process of desorption and diffusion for gas in coal seams [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 849-859.
- [37] 肖晓春, 潘一山. 低渗煤储层气体滑脱效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增 2): 3509-3515.
- XIAO Xiaochun, PAN Yishan. Experimental study on gas slippage effects in hypotonic coal reservoir [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup 2): 3509-3515.
- [38] 冯增朝, 郭红强, 李桂波, 等. 煤中吸附气体的渗流规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 2): 3601-3605.
- FENG Zengchao, GUO Hongqiang, LI Guibo, et al. Study of adsorbed gas seepage law in coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup 2): 3601-3605.

(责任编辑 沈春妮 全 腾)