



## 煤体注水渗流模型构建及微观主控影响规律

王恩茂 王刚 解树亮 魏宏钊 冯净 梁瀚丹

### Construction of water injection seepage model for coal body and microscopic dominant influence law

WANG Enmao, WANG Gang, XIE Shuliang, WEI Hongzhao, FENG Jing, LIANG Handan

引用本文:

王恩茂, 王刚, 解树亮, 魏宏钊, 冯净, 梁瀚丹. 煤体注水渗流模型构建及微观主控影响规律[J]. 北科大: 工程科学学报, 2025, 47(2): 271–281. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.04.28.002

WANG Enmao, WANG Gang, XIE Shuliang, WEI Hongzhao, FENG Jing, LIANG Handan. Construction of water injection seepage model for coal body and microscopic dominant influence law[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(2): 271–281. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.04.28.002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.04.28.002>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 硫化铜矿粒孔隙模型重构与溶液渗流模拟

Pore model reconstruction of copper sulfide ore agglomerate and simulation of solution seepage  
工程科学学报. 2021, 43(4): 495 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.02.27.002>

#### 剪切浓密床层孔隙网络模型与导水通道演化

Pore network model of tailings thickener bed and water drainage channel evolution under the shearing effect  
工程科学学报. 2019, 41(8): 987 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.08.004>

#### 三轴应力下颗粒流失对断层破碎带凝灰岩渗流特征的影响

Influence of particle loss on the seepage characteristics of tuff in the fault fracture zone under triaxial stress  
工程科学学报. 2022, 44(7): 1134 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.11.22.001>

#### 渗流作用下风化壳淋积型稀土矿细观孔隙结构演化特征

Evolution characteristics of mesoscopic pore structure of weathered crust elution–deposited rare earth ore under solution seepage  
工程科学学报. 2021, 43(10): 1283 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.02.24.003>

#### 多相混合渗流理论研究

Study on the theory of multiphase mixed seepage in porous media  
工程科学学报. 2023, 45(5): 833 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.03.16.002>

#### 煤层深孔聚能爆破有效致裂范围探讨

Effective fracture zone under deep–hole cumulative blasting in coal seam  
工程科学学报. 2019, 41(5): 582 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.05.004>

# 煤体注水渗流模型构建及微观主控影响规律

王恩茂<sup>1)</sup>, 王刚<sup>1,2)✉</sup>, 解树亮<sup>1)</sup>, 魏宏钊<sup>1)</sup>, 冯净<sup>1)</sup>, 梁瀚丹<sup>1)</sup>

1) 山东科技大学安全与环境工程学院, 青岛 266590 2) 山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 青岛 266590

✉通信作者, E-mail: [gang.wang@sdust.edu.cn](mailto:gang.wang@sdust.edu.cn)

**摘要** 煤层注水技术是目前矿井除尘的主要技术手段之一, 起到润湿煤体、源头减尘的作用. 但随着开采深度的增加, 煤体孔隙率相对较低, 极大影响煤层注水的润湿效果. 因此, 为了提高煤层注水的效果, 结合煤体固有属性、孔隙尺度等影响因素, 首先, 引入连通孔隙率, 建立了包含孔喉、等效孔径、有效孔隙率、毛细管束、迂曲度、流动路径在内的渗流模型; 其次, 采用高精度射线显微镜( $\mu$ -CT)对内蒙古煤矿、同富新煤矿、梅花井煤矿、大黄山煤矿以及磁窑沟煤矿 5 个煤矿的不同变质程度煤进行扫描, 三维重建可视化煤体微观有效孔隙结构, 运用分形理论, 提取煤体有效连通孔隙结构参数进行计算; 再次, 通过实验对 5 个煤矿不同变质程度的煤进行渗透率实测; 最后, 引入“敏感度”来表征每种影响因素对渗流量的影响程度, 运用 Morris 筛选法, 将数值分析法与渗流模型相耦合, 定量筛选了煤体坚固性系数、迂曲度分形维数、有效孔隙率、体积分形维数、孔喉半径等主控因素, 并分析了各主控因素对注水能力的影响规律. 本研究建立了一个综合煤体坚固性系数、迂曲度分形维数、有效孔隙率、体积分形维数和孔喉半径的渗流模型. 分析表明, 影响注水能力的主控因素依次为煤体坚固性系数、迂曲度分形维数、有效孔隙率、体积分形维数和孔喉半径. 注水能力与煤体坚固性系数呈正弦函数关系, 随着有效孔隙率的增加, 迂曲度分形维数和体积分形维数的减小, 注水能力增强. 研究结果可为进一步完善煤层注水渗流理论、增强煤层注水润湿效果, 防治矿井粉尘灾害提供理论依据.

**关键词** 煤层注水; 有效连通孔隙; 渗流模型; 主控因素; 计算机断层扫描

**分类号** X9366

## Construction of water injection seepage model for coal body and microscopic dominant influence law

WANG Enmao<sup>1)</sup>, WANG Gang<sup>1,2)✉</sup>, XIE Shuliang<sup>1)</sup>, WEI Hongzhao<sup>1)</sup>, FENG Jing<sup>1)</sup>, LIANG Handan<sup>1)</sup>

1) College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2) State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

✉Corresponding author, E-mail: [gang.wang@sdust.edu.cn](mailto:gang.wang@sdust.edu.cn)

**ABSTRACT** Coal seam water injection technology plays a vital role in diminishing dust formation in mining operations by humidifying coal masses, thereby minimizing the dispersion of airborne particulate matter. This technique is crucial for managing dust in underground operations. As mining operations reach greater depths and face diverse geological challenges, understanding the impact of various factors on coal seam water injection becomes crucial. These factors include the inherent properties of coal bodies and the sizes of pores and fractures. Without this knowledge, predicting the extent of moisture penetration is unfeasible, hindering moisturization. Consequently, to enhance the effectiveness of coal seam water injection, this research investigates the primary factors influencing the process. Initially, we developed a percolation model, incorporating elements such as pore throats, equivalent pore diameter, effective

收稿日期: 2024-04-28

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52174194)

porosity, capillary bundles, tortuosity, and flow paths. Furthermore, an online CT scanning loading percolation system was used to reconstruct three-dimensional visualizations of effective microfracture structures in coal bodies from five mines with varying metamorphic degrees: Inner Mongolia, Tongfuxin, Meihuajing, Dahuang Mountain, and Ciyaogou. The fractal theory was applied to extract parameters for calculating effective connected pores and fractures. In addition, experiments were conducted to measure coal permeability from these five mines, validating the model. Finally, the study introduced “sensitivity” to characterize the impact of various factors on seepage flow. By applying the Morris screening method, we combined numerical analysis with the percolation model to quantitatively screen main controlling factors such as coal body strength coefficient, tortuosity fractal dimension, effective porosity, volume fractal dimension, and pore throat radius. Their influence on water injection capacity was analyzed. The main conclusions were as follows: (1) A percolation model was established, incorporating factors such as coal body strength coefficient, tortuosity fractal dimension, effective porosity, volume fractal dimension, and pore throat radius. Through comparative calculations, this model measures the water injection capacity of coals across different regions such as Inner Mongolia, Tongfuxin, Meihuajing, Dahuang Mountain, and Ciyaogou. (2) The main factors affecting coal seam water injection capacity, ranked from most to least significant, include the coal body strength coefficient, tortuosity fractal dimension, effective porosity, volume fractal dimension, and pore throat radius. The coal body strength coefficient demonstrated the highest sensitivity at 16.765, whereas the pore throat radius had the lowest sensitivity at 0.00117. (3) The study thoroughly evaluated how these key factors affect water injection capacity. The relationship between water injection capacity and strength coefficient follows a sinusoidal function curve distribution. Water injection capacity increases with effective porosity and decreases with higher tortuosity fractal dimension and volume fractal dimensions. The research results provide a solid theoretical basis for further improving coal seam water injection percolation theory, enhancing wetting effects, and preventing mine dust.

**KEY WORDS** coal seam water injection; effectively connected pore cracks; seepage flow model; main controlling factors; computed tomography

中国是煤炭消费第一大国, 煤炭行业是国民经济重要的基础产业之一<sup>[1]</sup>, 据中国国家矿山安全监察局统计, 2023 年原煤的总产量达 47.1 亿吨. 但在煤炭开采过程中, 常伴随着煤矿粉尘灾害的威胁<sup>[2-4]</sup>. 煤层注水降尘技术是有效且实用的煤矿井下降低粉尘浓度的技术手段之一<sup>[5-6]</sup>, 利用钻孔向煤层注入压力水, 使其渗入煤体内部、润湿煤体, 从源头减少粉尘的产生<sup>[7]</sup>.

影响煤层注水效果的因素错综复杂, 除了与注水压力<sup>[8]</sup>、注水时间<sup>[9-10]</sup>、注水量<sup>[11-12]</sup>和温度<sup>[13]</sup>等外部因素有关, 还与煤体自身的物理性质<sup>[14-15]</sup>、润湿性<sup>[16-18]</sup>等煤体自身因素有关. 为了探究煤体自身理化特性对煤层注水效果的影响, 王亮等<sup>[19]</sup>采用主成分分析法系统探讨了影响松软煤体煤尘润湿的主控因素. 胡起晨<sup>[20]</sup>通过不同条件下的煤层注水试验, 对比得出煤的裂隙和孔隙发育程度对煤层注水的影响规律. 韩晋平等<sup>[21]</sup>对影响煤层注水的因素进行了总结分析, 认为煤层孔隙的发育程度、煤层上覆岩层压力及支撑压力、煤的坚固性、润湿性和煤层内的瓦斯压力是影响煤层注水的主要因素.

通过上述研究内容可以看出煤作为一种复杂的天然多孔介质, 含有大量不同尺度和形状的孔隙和裂缝, 其孔隙结构对注水能力有直接主导性的影响<sup>[22-23]</sup>. 因此, 掌握煤体孔隙结构是探究影响

煤层注水主控因素的前提. 相关研究表明<sup>[24-25]</sup>, 水被注入煤层后, 首先在较大的孔隙和裂隙中渗透, 其效果主要受微观孔隙连通特征影响, 随着孔隙的饱和度逐渐提升, 水逐渐开始在微小孔隙中做毛细扩散运动进行润湿. 在对煤体孔隙结构复杂程度研究的过程中, 许多学者引入分形维数对其进行定量分析, 并对其不断完善. Katz 和 Thompson<sup>[26]</sup>研究发现多孔介质孔隙结构具有分形特征, 并提出了运用分形维数来预测孔隙率的方法. Hildgen 等<sup>[27]</sup>进一步将分形维数应用到多孔介质孔隙率的测算, 并建立了分形维数与孔隙率的关系. Qin 等<sup>[28]</sup>应用核磁共振波谱法 (NMR) 和分形理论研究了低阶煤孔隙结构性质, 定量评估了煤体孔隙结构的复杂程度. Shi 等<sup>[29]</sup>应用分形理论分析了煤阶对微裂隙的影响, 并得出了分形特征与渗透率的关系. 王登科等<sup>[30]</sup>运用分形理论对含瓦斯煤内部裂隙结构进行了定性和定量分析. 如上所述, 相关学者对煤体孔隙结构的表征有了深入的研究, 但忽略了煤体内部有效连通孔隙特性, 导致在计算过程中渗流模型与煤体的实际结构存在一定的差异, 因此, 进一步表征连通孔隙特性对煤矿安全开采至关重要.

为此, 本文以中国 5 个煤矿的煤作为研究对象, 首先引入连通孔隙概念, 建立煤层注水渗流模型, 对注水能力进行多参量精准表征; 其次, 利用

计算机断层扫描 (CT 扫描) 三维重构可视化煤体微观有效连通孔隙结构及参数, 并将提取的有效连通孔隙结构参数带入模型进行计算; 再次, 利用多尺度实时在线 CT 扫描加载渗流系统进行煤层注水实验, 将 CT 扫描实验结果与渗流实验结果进行对比分析, 验证煤层注水渗流模型的准确性; 最后, 以建立的渗流模型为基础, 考虑煤样范围和数量限制的难题, 基于数值分析方法, 将 Morris 筛选法与模型进行耦合, 定量筛选影响注水能力的主控因素, 并量化分析主控因素对注水能力的作用规律。

## 1 渗流模型建立

煤体内部存在形状各异的复杂孔隙结构, 很难对各个孔隙的尺寸进行定量表征。为得到煤体孔隙的体积及孔径等参数, 引入等效孔径 (直径) 定义孔隙尺寸, 通过公式 (1) 计算孔径的大小。

$$D_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6 \times V_{pore}}{\pi}} \quad (1)$$

其中,  $D_{eq}$  为等效孔径,  $\mu\text{m}$ ;  $V_{pore}$  为单个孔隙体积,  $\mu\text{m}^3$ 。

煤体内的孔隙分为连通孔和孤立孔, 其中连通孔是煤体渗流的主要通道。因此需要计算连通孔隙的体积分数与总孔隙的体积分数的比值<sup>[31]</sup>, 其三维连通性可按公式 (2) 计算。其中, 连通孔隙的体积分数  $V'$  为连通孔体积与煤体体积的比值, 总孔隙的体积分数  $V$  为全部孔隙体积与煤体体积的比值。

$$F = \frac{V'}{V} \quad (2)$$

其中,  $F$  为煤体孔隙 3D 连通性,  $V'$  为连通孔隙的体积分数, %;  $V$  为总孔隙的体积分数, %。

进一步计算煤样的有效孔隙率, 有效孔隙率  $\varphi_e$  为:

$$\varphi_e = F\varphi = \frac{V'}{V}\varphi \quad (3)$$

其中,  $\varphi_e$  为有效孔隙率, %;  $\varphi$  为煤体总孔隙率, %。

由于岩石等多孔介质微观孔隙通道是弯曲的, 迂曲度能反映毛细管束的弯曲程度, Comiti 和 Renaud<sup>[32]</sup> 由实验得出平均迂曲度与孔隙率之间存在一定的关系, 因此, 结合上述有效孔隙率表达式, 得到修正后的迂曲度与有效孔隙率关系表达式:

$$T_{av} = 1 - 0.4 \ln \varphi_e \quad (4)$$

其中,  $T_{av}$  为平均迂曲度。

Tyler 和 Wheatcraft<sup>[33-34]</sup> 提出了当流体流经复

杂的孔隙结构时的分形标度关系:

$$L_T(r) = (2r)^{1-D'_T} L_0^{D'_T} \quad (5)$$

其中,  $L_T(r)$  代表流体路径的实际长度,  $\mu\text{m}$ ;  $L_0$  代表毛细管的特征长度,  $\mu\text{m}$ ;  $r$  代表毛细管半径,  $\mu\text{m}$ ;  $D'_T$  代表毛细管平均迂曲度分形维数。

其中:

$$L_0 = \left[ \frac{1 - \varphi \pi D'_f r_{max}^2}{\varphi (2 - D'_f)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中,  $r_{max}$  为最大孔喉半径,  $\mu\text{m}$ ;  $D'_f$  为煤样的体积分形维数。

由于毛细管内部孔隙结构复杂, 因此用平均毛管半径  $r_{av}$  表示毛细管半径。

$$r_{av} = \frac{D'_f r_{min}}{D'_f - 1} \quad (7)$$

其中,  $r_{min}$  为最小孔喉半径,  $\mu\text{m}$ 。

将公式 (6) 和公式 (7) 代入公式 (5) 中得:

$$L_T = \left( \frac{2D'_f r_{min}}{D'_f - 1} \right)^{1-D'_T} \left[ \frac{1 - \varphi \pi D'_f r_{max}^2}{\varphi (2 - D'_f)} \right]^{\frac{D'_T}{2}} \quad (8)$$

其中,  $L_T$  代表初次修正后流体路径的实际长度,  $\mu\text{m}$ 。

本研究用有效孔隙率  $\varphi_e$  来表示煤体内部连通孔隙结构, 对毛细管实际路径表达式进行修正, 得到修正后的流体路径的实际长度表达式为:

$$L_{TV} = \left( \frac{2(D_f + 1)r_{min}}{D_f} \right)^{1-D_T} \left[ \frac{1 - \varphi_e \pi (D_f + 1)r_{max}^2}{\varphi_e (3 - D_f)} \right]^{\frac{D_T}{2}} \quad (9)$$

其中,  $L_{TV}$  代表有效孔隙率修正后流体路径的实际长度,  $\mu\text{m}$ ;  $D_f$  为煤样的三维空间体积分形维数;  $D_T$  为煤样的三维空间迂曲度分形维数。

研究表明<sup>[35-36]</sup>, 煤体坚固性系数对注水能力有一定影响, 且坚固性系数与煤层注水渗透率存在着相对应的关系<sup>[37]</sup>, 结合达西定律和渗透系数表达式, 得到流体流量与渗透率关系表达式为:

$$q = \frac{\Delta P \pi r^2 \rho g k_1 e^{-9.82(f-0.71)^2 + 0.29}}{\mu' \mu L_{TV} T_{av}} \quad (10)$$

其中,  $f$  为煤体坚固性系数;  $\mu$  为流体黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ , 取  $2.98 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\mu'$  为动力黏度系数,  $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ , 取  $0.001 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ ;  $\rho$  为吸入液相密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 取  $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\Delta P$  为煤层注水两端压差, 取  $3 \text{ MPa}$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ , 取  $9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ;  $k_1$  为修正系数。

因此, 将修正后的  $L_{TV}$  代入公式 (10) 中, 结合毛细管孔径大小分布分形标度律<sup>[38]</sup> 对  $q$  进行积分, 并得到煤体渗流模型表达式:

$$Q = \frac{3.29 \times 10^6 \pi^{1-\frac{D_T}{2}} \Delta P \varphi_e^{D_T} r_{\min}^{1+D_T} r_{\max}^{-D_T} (1 - r_{\min}^{D_f} r_{\max}^{-D_f}) e^{-9.82(f-0.71)^2 + 0.29} D_f^{2+\frac{D_f}{2}} (3 - D_f)^{D_T}}{2^{1-D_T} (1 - 0.4 \ln \varphi_e) (1 - \varphi_e)^{\frac{D_T}{2}} (D_f - 1)^{1+D_T}} \quad (11)$$

其中,  $Q$  为煤体的渗流量,  $\text{mL} \cdot \text{s}^{-1}$ .

将固定参数代入, 并根据多孔介质分形理论中的规定, 若多孔介质满足分形结构, 则  $r_{\min}/r_{\max} \rightarrow 10^{-2[39]}$ , 因此, 对模型进一步简化得到最终表达式为:

$$Q = \frac{9.87 \times 10^6 \pi^{1-\frac{D_T}{2}} \varphi_e^{D_T} r_{\min}^{D_f} r_{\max}^{1-\frac{D_T}{2}} e^{-9.82(f-0.71)^2 + 0.29}}{2^{1-D_T} (1 - 0.4 \ln \varphi_e) (1 - \varphi_e)^{\frac{D_T}{2}} (D_f - 1)^{D_T}} \quad (12)$$

公式(12)即为煤层注水渗流模型, 影响注水能力的因素为有效孔隙率、坚固性系数、迂曲度分形维数、体积分形维数、最大孔喉半径、最小孔喉半径, 该模型多参定量表征了煤层注水能力与影响因素关系, 为后续揭示各影响因素对注水能力的作用规律提供了模型基础.

## 2 CT 扫描三维重构

### 2.1 实验煤样选取

为了使研究的煤体结构具有普适性和代表性, 本研究根据煤的变质程度, 选取了中国具有代表性的 5 个煤矿, 如表 1 所示.

将从工作面选取的完好的煤样进行密封, 然后送至实验室, 将其制成底面直径为 5 mm、高度为 10 mm 尺寸的圆柱形试样.

### 2.2 CT 扫描

如图 1 所示, 使用高精度射线显微镜分别对煤

样进行 CT 扫描, 得到分辨率为 8.5  $\mu\text{m}$  的 CT 图像, 各煤样分别选取煤样中部破坏较少的连续 300 张 CT 图像. 由于煤样加工过程使煤样周边区域产生很多微裂隙, 导致其存在最大表征区域<sup>[40]</sup>. 同时, 通过测试发现, 当图像尺寸大于 850  $\mu\text{m}$  时, 岩体的结构、组分、物理力学性质就可以趋于稳定, 此时煤体的渗流性质受到研究尺寸的影响较小<sup>[41]</sup>. 因此, 在取表征单元体时选取了图像中间部分的 2550  $\mu\text{m} \times 2550 \mu\text{m}$  的图像. 由于矿物组分的存在, 在图像处理中会出现环状伪影, 影响分析效果, 为此对各煤样 CT 图像进行中值滤波降噪处理<sup>[42-43]</sup>, 选取环状伪影少、噪点少的区域. 为了划分煤基质和裂隙, 采用 Song 等<sup>[44]</sup> 提出的阈值分割方法, 首先计算每个像素和 Sobel 算子的元素乘积的灰度梯度值, 然后在统计平均灰度梯度值的基础上获得灰度梯度分布, 通过分析灰度梯度分布直方图的形态, 获得图像分割的最佳阈值. 最后, 利用 AVIZO 提取三维重建后的煤体有效连通孔隙结构, 其计算原理是将三维重建孔隙结构中的每个孔隙进行单独的标记, 假设孔隙为一个球体, 如图 2 所示, 提取三维重建后的煤体有效的连通孔隙结构参数, 如表 2 所示.

为了获取煤体坚定性系数, 采用粉碎法快速

表 1 五大煤矿的煤样信息表

Table 1 Coal sample information on five coal bases

Serial number	Types of coal	Coal mine	Subordinate regions
1	Long-flame coal	Ciyaogou	Jinbei
2	Long-flame coal	Meihuajing	Ningdong
3	Anthracite	Tongfuxin	Jindong
4	Gas coal	Inner Mongolia	Eastern inner mongolia
5	Noncaking coal	Dahuang mountain	Xinjiang

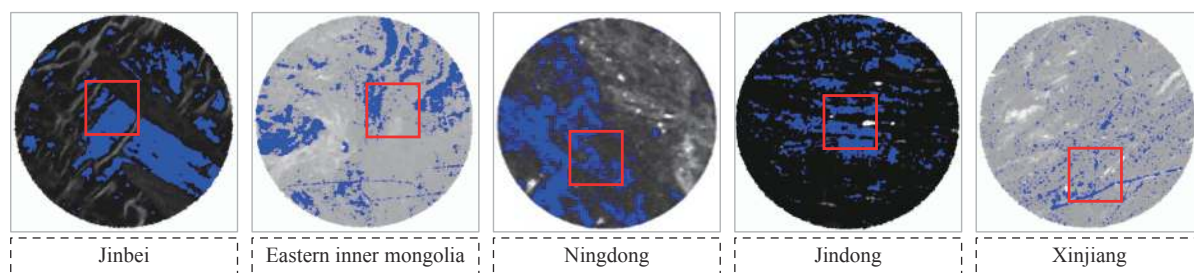


图 1 煤样采集地点分布及 CT 扫描孔隙结构图

Fig.1 Sample collection site distribution and CT scan hole fissure structure diagram

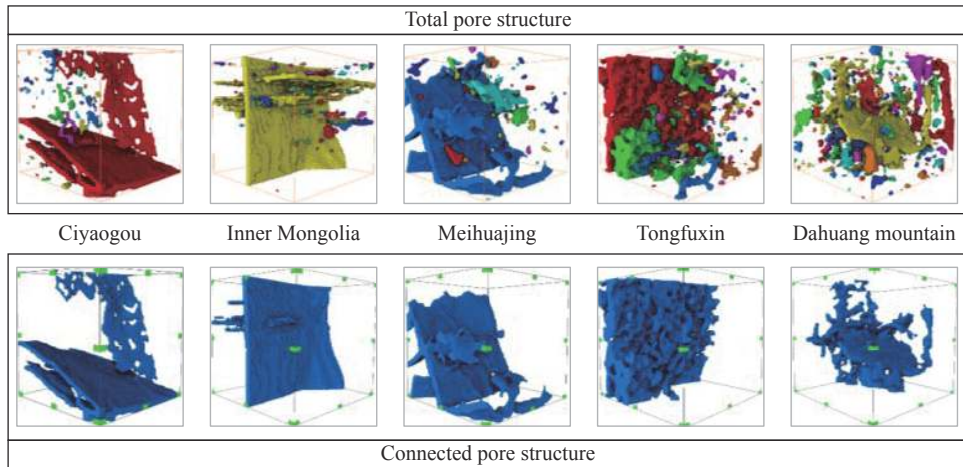


图2 三维总孔隙结构和连通孔隙结构

Fig.2 Three-dimensional total pore-fracture structure and connected pore-fracture structure

表2 影响煤层注水的微观结构参数

Table 2 Parameters affecting the microstructure of coal seam water injection

Coal samples	$\phi_e/\%$	$D_T$	$D_f$	$f$	$r_{max}/\mu m$
1	6.51	2.41	2.48	21.87	0.12
2	14.77	2.37	2.42	29.40	0.14
3	5.09	2.33	2.61	13.87	0.14
4	5.16	2.39	2.48	12.26	0.12
5	6.42	2.38	2.45	16.83	0.12

测定 5 个煤矿煤体坚固性系数. 由于实验过程中煤体坚固性系数受煤体破坏类型、水分、温度以及落锤冲击次数等多种外界因素的影响, 实验结果存在误差. 因此, 取 5 个煤矿不同变质程度煤的坚固性系数的平均值, 如表 3 所示.

表3 不同煤样的坚固性系数

Table 3 Firmness coefficient of different coal samples

Coal sample serial number	$f$
1	0.36
2	0.83
3	1.64
4	1.38
5	1.22

利用上述建立的煤层注水渗流模型公式(12), 将实测参数代入渗流量模型, 得到相对应渗流量值, 如图 3 所示.

### 3 煤层注水实验验证

#### 3.1 实验准备

渗流是煤层注水过程中的主要过程, 渗流量

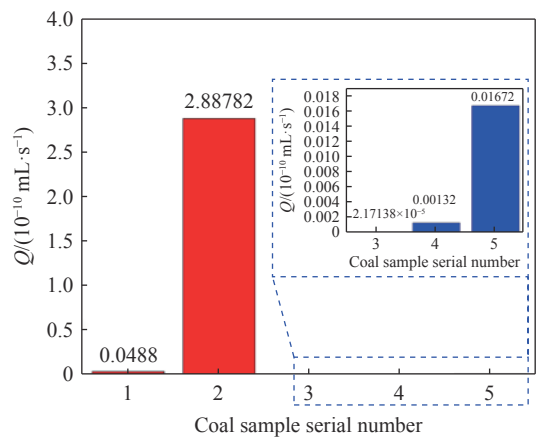


图3 不同煤样的渗流量计算值

Fig.3 Seepage flow calculation of different coal samples

是衡量煤层注水能力的关键参数, 实验利用自主研发的多尺度实时在线 CT 扫描加载渗流系统测量累积流量, 实验设备如图 4 所示.

首先取底面直径为 5 mm, 高度为 30 mm 的圆柱体煤芯, 拧开粗端口将煤芯装入, 并在煤芯上下放置定制辅助塞, 然后对其进行升压, 如图 4(a) 所示. 升压前先将水压泄压至 0 MPa, 所有压力的保护设定均要大于实验压力的设定, 泄压操作在控制屏幕及计算机系统内均可操作. 如图 4(b) 所示,

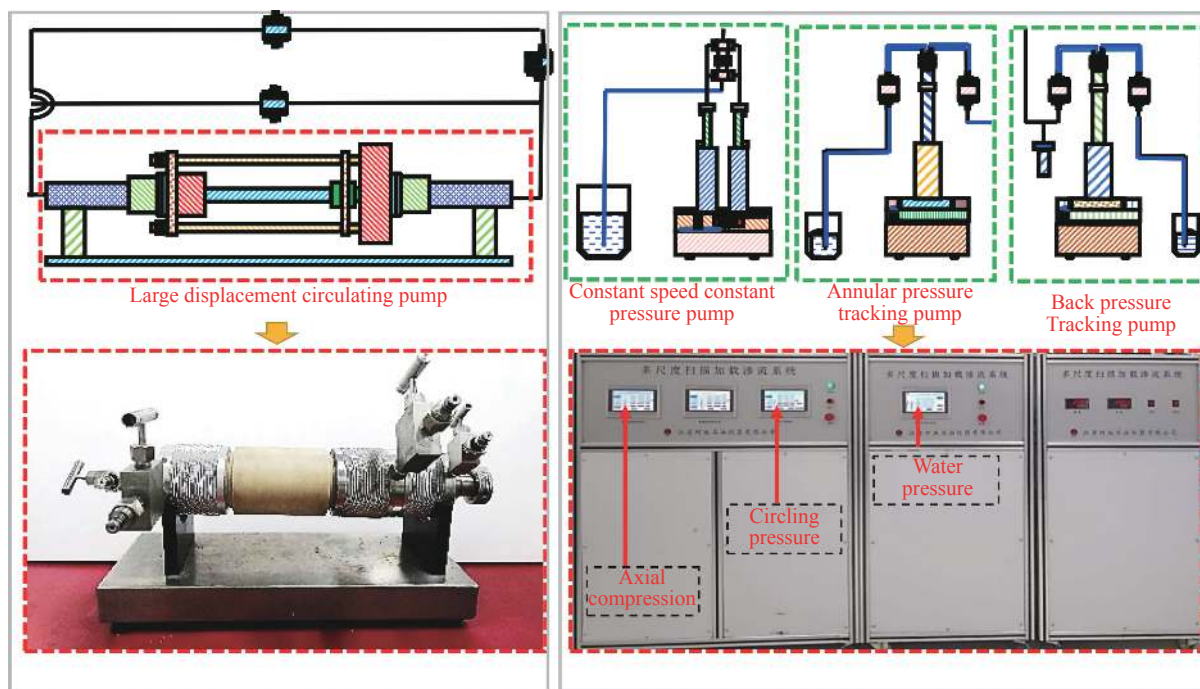


图 4 多尺度实时在线 CT 扫描加载渗流系统示意图。(a) 煤芯夹持器的结构操作;(b) 压力操作台

Fig.4 Multiscale real-time online CT scan loading seepage system: (a) Coal core humidifier structure operation; (b) Pressure operating table

先将轴压升至 1 MPa, 将环压升至 5 MPa, 防止环压过大导致煤体内部孔隙闭合, 再将第一个轴压升至 3 MPa, 将水压泄压至 0 MPa, 然后升至 3 MPa, 温度设置为 25 °C. 最后通过软件控制界面系统自动记录数据, 得到累积流量。

### 3.2 实验结果

通过多尺度实时在线 CT 扫描加载渗流系统对 5 个煤矿的煤样(每个煤矿 3 个煤样)进行实测, 将数据取平均值, 实验数据如表 4 所示。

表 4 不同煤样的渗流量实测值

Coal sample serial number	$Q_0/(10^{-10} \text{ mL}\cdot\text{s}^{-1})$
1	0.044
2	2.772
3	0.00001981
4	0.0001252
5	0.0185

通过试验结果可以看出, 5 个煤矿由于煤的变质程度不同、地质构造不同, 渗流量存在较大差异. 将实测值与理论计算值进行对比, 如图 5 所示, 渗流量实验值与计算值结果具有一致性, 经计算, 各煤样实验值与计算值误差大小分别为 10.86%、4.14%、9.55%、5.44% 和 9.83%, 在合理误差范围之内, 因此渗流模型具有较高的准确性。

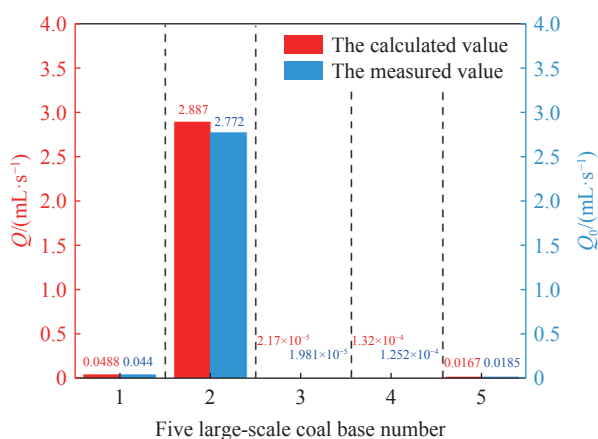


图 5 渗流量实测值与计算值对比图

Fig.5 Comparison of measured and calculated seepage flow

## 4 煤层注水主控因素分析

### 4.1 主控因素的确定

由于每种影响因素对注水能力的影响程度不同, 因此以建立的渗流模型为基础, 引入“敏感度”来表征每种影响因素对渗流量的影响程度, 运用 Morris 筛选法计算各个影响因素的敏感度. 该方法计算量适中, 既可以避免因计算过程复杂而引起的繁琐以及不具有实际操作性的问题, 又可以避免因操作过于简便而引起的误差大的问题。

为了避免煤样样本范围和数量的限制, 本文采用数值分析方法进行研究. 首先通过 CT 实验确定 6 个参数的实际范围, 在每个参数实际范围内

取一定数量的点, 保证其覆盖各参数的所有取值范围. 采用控制变量法, 将所探究影响因素之外的其他因素取平均值代入渗流量模型中, 得到各影响因素所对应的渗流量值, 所取数据范围和平均值如表 5 所示.

表 5 影响因素实际范围

Table 5 Actual scope of influencing factors

$\varphi_e/\%$	$D_T$	$D_f$	$f$	$r_{\max}/\mu\text{m}$	$r_{\min}/\mu\text{m}$
1-20	1-3	1-3	0-2	3-300	0.12-1.5
10	2	2	1	151.5	0.81

在数值计算的基础上, 运用 Morris 筛选法, 以固定步长变化为自变量, 分别计算影响参数的灵敏度判别因子  $S$ . 首先将各个影响因素进行 min-max 标准化处理, 将标准化处理的数据压缩在区间  $[0, 1]$  内, 使其改变任意一个参数后的渗流量的变化范围一致. 其具体方法为: 首先求出各参数的最大值  $X_{\max}$  和最小值  $X_{\min}$ , 假设标准化前的原始数据为  $X_i$ , 得到数据标准化的公式为:

$$P_i = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (13)$$

其中,  $P_i$  为影响因素标准化后的所求值.

然后分别计算影响因素对渗流量的敏感度函数  $M(x)$ , 敏感度判别因子  $M(x)$  取多个样本的平均值:

$$M(x) = \left[ \sum_{n=0}^{n-1} \frac{(Q_{i+1} - Q_i)/Q_0}{(P_{i+1} - P_i)/P_0} \right] / (n-1) \quad (14)$$

其中,  $Q_i$  为模型第  $i$  次运行输出值;  $Q_0$  为渗流量确定的平均值;  $P_0$  为各项影响因素标准化所求值的平均值;  $n$  为样本数量.

由式 (14) 计算得出的影响因素敏感度如表 6 所示.

表 6 注水影响因素敏感度函数值

Table 6 Sensitivity function value of water injection influencing factors

Sensitivity of influencing factors	Sensitivity classification
$M(\varphi_e)$	3.420
$M(D_T)$	-5.077
$M(D_f)$	-3.172
$M(f)$	16.765
$M(r_{\max})$	0.0545
$M(r_{\min})$	0.00117

由表 6 可知, 由于  $D_T$ 、 $D_f$  和  $f$  的敏感度与注水能力呈负相关,  $D_T$  和  $D_f$  越大, 越不利于煤层注水, 比较时对其敏感度取相反数, 各影响因素敏感

度从大到小依次为:  $M(f) > -M(D_T) > M(\varphi_e) > -M(D_f) > M(r_{\max}) > M(r_{\min})$ .

根据表 7<sup>[45]</sup> 可知,  $f$ 、 $D_T$ 、 $\varphi_e$  和  $D_f$  的灵敏度判别因子值均介于  $|S| \geq 1.00$  区间, 属于高灵敏因子; 而  $r_{\max}$  和  $r_{\min}$  分别属于中灵敏因子和不灵敏因子, 因此,  $f$ 、 $D_T$ 、 $\varphi_e$  和  $D_f$  对注水能力的敏感性最强.

表 7 注水影响因素灵敏度分类<sup>[45]</sup>

Table 7 Sensitivity classification of water injection influencing factors<sup>[45]</sup>

Absolute value of sensitivity discriminant factor	Sensitivity classification
$0.00 \leq  S  \leq 0.05$	Insensitivity
$0.05 \leq  S  \leq 0.20$	Moderately sensitive
$0.20 \leq  S  \leq 1.00$	Sensitive
$ S  \geq 1.00$	Highly sensitive

根据表 7 中的敏感度, 取各个影响因素的敏感度占敏感度总和的比值, 对各影响因素敏感度所占比例进行计算, 结果如图 6 所示,  $f$ 、 $D_T$ 、 $\varphi_e$  和  $D_f$  的敏感度分别占总敏感度的 58.846%、17.820%、12.004% 和 11.134%,  $r_{\max}$  和  $r_{\min}$  对注水影响较小, 其敏感度分别占敏感度的 0.191% 和 0.004%, 因此, 影响煤体注水能力的主控因素为:  $f$ 、 $D_T$ 、 $\varphi_e$  和  $D_f$ .

#### 4.2 主控因素对注水能力的作用规律

为了进一步探究主控因素变化对注水能力的作用规律, 结合上述渗流模型, 运用数值分析手段, 探究渗流量随主控因素的变化规律, 并对渗流量  $Q$  进行求导得到  $Q'$ , 进一步探究渗流量的变化率随主控因素的变化规律.

首先对各主控因素进行实际范围内均匀取值, 基于控制变量法, 固定一个主控因素取值, 其他主控因素取平均值, 分别代入渗流模型和求导后的模型进行数值解算取值, 得到相应数据结果, 综合探究主控因素的变化对注水能力的作用规律.

##### 4.2.1 坚固性系数对注水能力的影响

分别固定坚固性系数以外的其他主控因素, 研究坚固性系数对注水能力的影响, 坚固性系数的数值分析结果如图 7 所示. 渗流量和坚固性系数的关系基本呈正弦函数曲线分布, 存在一个临界坚固性系数 0.7 使得渗流量最大, 当  $f < 0.7$  时, 渗流量与坚固性系数呈正相关趋势, 且渗流量的变化率随坚固性系数增加呈先增大后减小的趋势, 表明煤层注水能力呈先迅速增强后缓慢增强的趋势; 当  $f = 0.7$  时, 渗流量达到最大值, 注水效果达到最佳; 当  $f > 0.7$  时, 渗流量与坚固性系数呈负相关趋势, 且渗流量的变化率随坚固性系数增加呈先

增加后减小的趋势, 并逐渐趋近于 0, 表明煤层注水能力呈先迅速降低后缓慢降低的趋势.

#### 4.2.2 迂曲度分形维数对注水能力的影响

将迂曲度分形维数以外的主控因素选取固定

值, 改变媒体迂曲度分形维数来研究注水能力变化趋势, 注水能力随迂曲度分形维数的变化趋势如图 8 所示. 渗流量随着迂曲度分形维数增加呈现明显的非线性减小趋势, 且渗流量的变化率呈

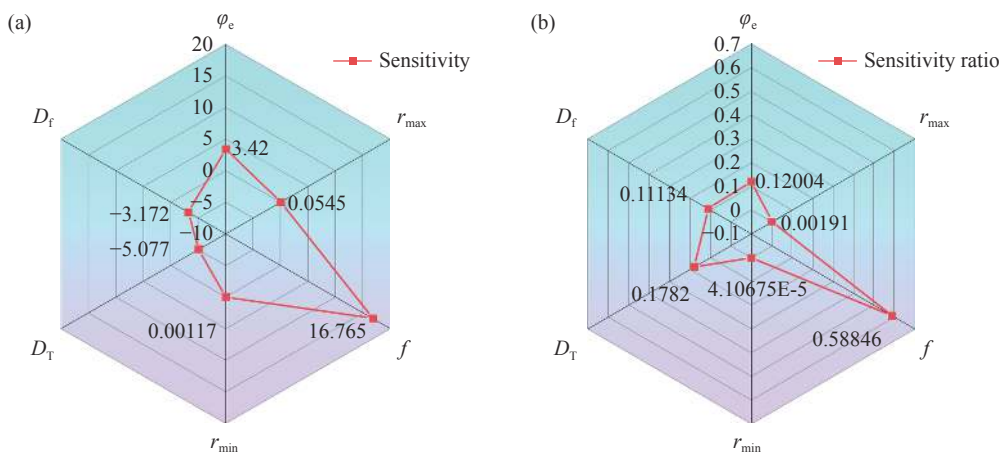


图 6 影响因素敏感度所占比例示意图. (a) 各敏感度对注水的影响; (b) 敏感度占比图

Fig.6 Proportion of sensitivity of influencing factors: (a) impact of water injection on each sensitivity; (b) chart of sensitivity proportions

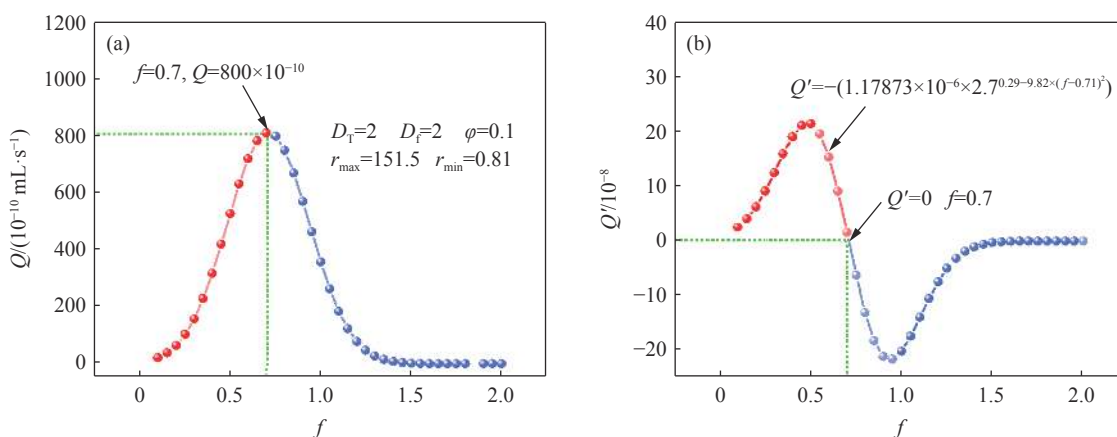


图 7 注水能力随  $f$  的变化图. (a) 渗流量随  $f$  的变化图; (b) 渗流量的变化率随  $f$  的变化图

Fig.7 Variation in water injection capacity with  $f$ : (a) plot of flow rate versus  $f$ ; (b) plot of the rate of change of flow rate versus  $f$

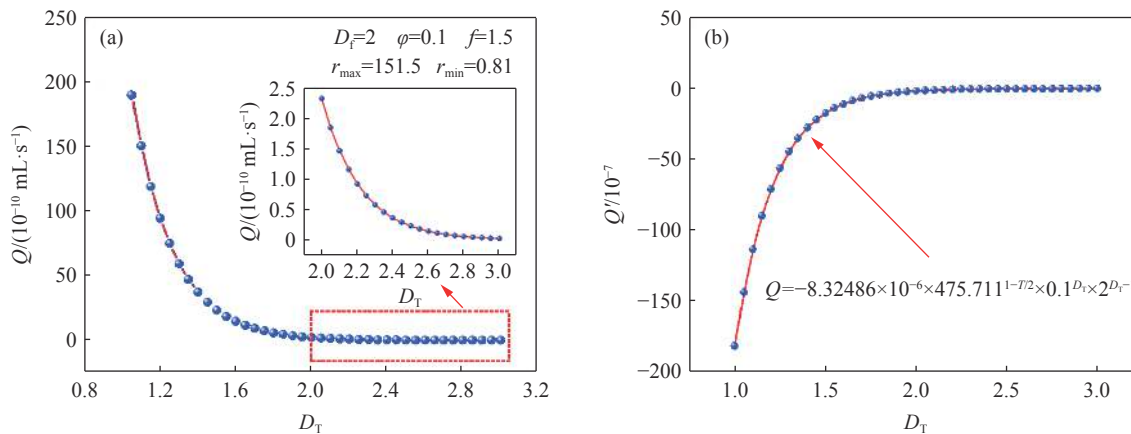


图 8 注水能力随  $D_T$  的变化图. (a) 渗流量随  $D_T$  的变化图; (b) 渗流量的变化率随  $D_T$  的变化图

Fig.8 Variation in water injection capacity with  $D_T$ : (a) graph of seepage volume change with  $D_T$ ; (b) graph of the rate of change in seepage volume with  $D_T$

逐渐减小趋势, 渗流量减小幅度逐渐降低, 注水能力先迅速降低后缓慢降低; 随迂曲度分形维数逐渐增大, 接近 3 时, 渗流量到达最小值, 趋近于 0, 水很难从孔隙中通过, 渗流路径极度曲折, 阻碍了更多水分在煤体中渗流, 因此注水效果逐渐减弱.

#### 4.2.3 有效孔隙率对注水能力的影响

将有效孔隙率以外的主控因素选取平均值, 改变有效孔隙率研究注水能力的变化趋势. 如图 9 所示, 渗流量随着有效孔隙率的增加呈现明显的非线性增加趋势, 且渗流量的变化率呈逐渐增大趋势, 表明注水效果逐渐增强, 有效孔隙率增加到一定程度, 更多水分从孔隙中通过, 打开孔隙通道, 渗流路径更畅通, 从而增大了渗流量, 注水效果显著增强.

#### 4.2.4 体积分形维数对注水能力的影响

为探究体积分形维数对注水效果的影响规律, 分别固定体积分形维数以外其他主控因素, 对其进行数值分析, 结果如图 10 所示. 渗流量随体

积分形维数改变而变化的趋势与随迂曲度分形维数改变而变化的趋势相同, 注水能力均呈现先迅速降低后缓慢降低趋势, 但渗流量随体积分形维数的增大而急剧下降幅度早于随迂曲度分形维数的增大而急剧下降的幅度; 当体积分形维数接近于 1.4 时, 注水能力随体积分形维数增大趋近于 0, 注水能力缓慢降低, 基本没有水分在煤体孔隙中渗流通过.

### 5 结论

(1) 建立了包含煤体坚固性系数、迂曲度分形维数、有效孔隙率、体积分形维数、孔喉半径在内的渗流模型.

(2) 运用 Morris 筛选法计算了各个影响因素对煤层注水的敏感度, 其中影响煤层注水能力的主控因素从大到小依次为煤体坚固性系数、迂曲度分形维数、有效孔隙率、体积分形维数和孔喉半径.

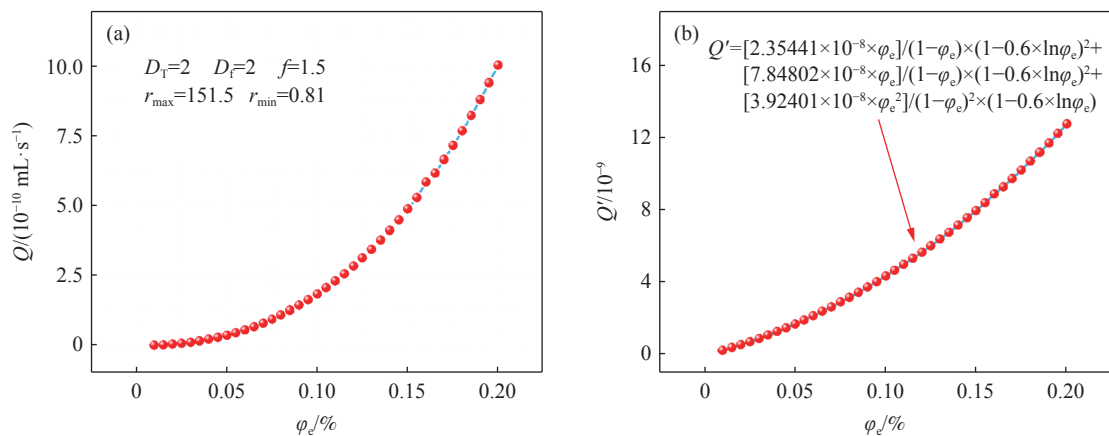


图 9 注水能力随  $\varphi_e$  的变化图. (a) 渗流量随  $\varphi_e$  的变化图; (b) 渗流量的变化率随  $\varphi_e$  的变化图

Fig.9 Variation in water injection capacity with  $\varphi_e$ : (a) graph of seepage flow rate changes with  $\varphi_e$ ; (b) graph of the rate of change in seepage flow rate with  $\varphi_e$

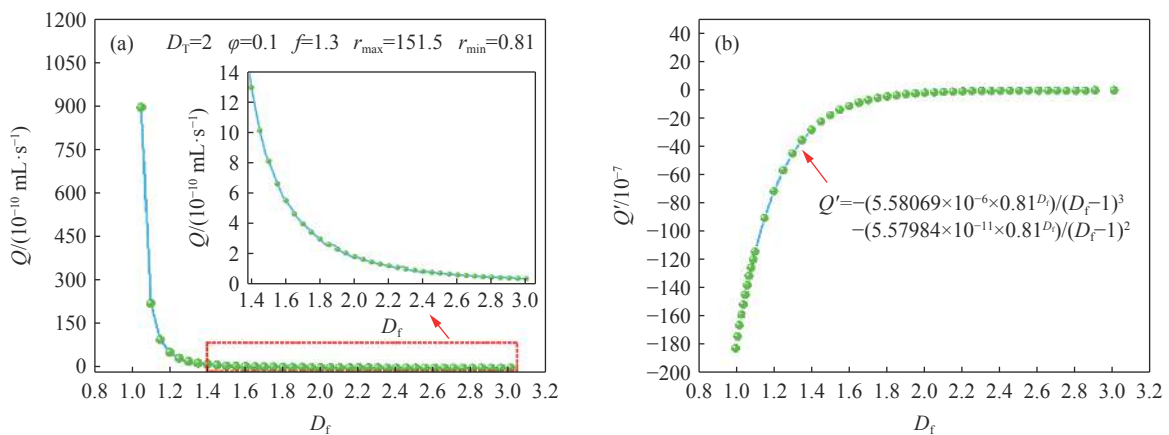


图 10 注水能力随  $D_f$  的变化图. (a) 渗流量随  $D_f$  的变化图; (b) 渗流量的变化率随  $D_f$  的变化图

Fig.10 Variation in water injection capacity with  $D_f$ : (a) graph of seepage volume versus  $D_f$ ; (b) graph of the rate of change in seepage volume versus  $D_f$

(3) 注水能力和坚固性系数 ( $f$ )、迂曲度分形维数、有效孔隙率、体积分形维数分别呈现正弦函数、非线性减小、非线性增加、相同的演化规律。其中当体积分形维数在接近 3 和 1.4 时注水能力基本不再变化。

## 参 考 文 献

- [1] Yuan L, Lin B Q, Yang W. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine. *Coal Sci Technol*, 2015, 43(1): 45  
(袁亮, 林柏泉, 杨威. 我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向. 煤炭科学技术, 2015, 43(1): 45)
- [2] Cheng W M, Zhou G, Chen L J, et al. Research progress and prospect of dust control theory and technology in China's coal mines in the past 20 years. *Coal Sci Technol*, 2020, 48(2): 1  
(程卫民, 周刚, 陈连军, 等. 我国煤矿粉尘防治理论与技术 20 年研究进展及展望. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 1)
- [3] Gao N, Zhou T Q, Jin L Z, et al. Research on the optimization formula performance and dust reduction effect of mine dust suppressant based on response surface method. *Adv Geo-Energy Res*, 2024, 11(2): 115
- [4] Gu D Z, Li Q S. Theoretical framework and key technologies of underground ecological protection based on coal mine occupational health prevention. *J China Coal Soc*, 2021, 46(3): 950  
(顾大钊, 李全生. 基于井下生态保护的煤矿职业健康防护理论与技术体系. 煤炭学报, 2021, 46(3): 950)
- [5] Ma H F, Song Y Q, Chen S J, et al. Experimental investigation on the mechanical behavior and damage evolution mechanism of water-immersed gypsum rock. *Rock Mech Rock Eng*, 2021, 54(9): 4929
- [6] He S Q, Zhao D, Gao N, et al. Progress and prospects of mining disaster prevention techniques and equipment. *Adv Geo-Energy Res*, 2024, 13(3): 166
- [7] Qin Y J, Su W W, Tian F C, et al. Research status and development direction of microcosmic effect under coal seam water injection. *J China Univ Min Technol*, 2020, 49(3): 428  
(秦玉金, 苏伟伟, 田富超, 等. 煤层注水微观效应研究现状及发展方向. 中国矿业大学学报, 2020, 49(3): 428)
- [8] Yu Y B, Jiang Y J, Cheng W M, et al. Experimental study on permeability properties of coal seam under high pressure water injection. *J Min Saf Eng*, 2015, 32(1): 144  
(于岩斌, 蒋宇静, 程卫民, 等. 煤层高压注水渗透特性试验研究. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 144)
- [9] Yang H, Cheng W M, Liu Z, et al. Fractal characteristics of effective seepage channel structure of water infusion coal based on NMR experiment. *Rock Soil Mech*, 2020, 41(4): 1279  
(杨赫, 程卫民, 刘震, 等. 注水煤体有效渗流通道结构分形特征核磁共振试验研究. 岩土力学, 2020, 41(4): 1279)
- [10] Wang W R, Liu Z X, Wang G, et al. Study on water injection model considering fractal dimension and water injection time. *J Min Saf Eng*, 2018, 35(4): 817  
(汪文瑞, 刘兆霞, 王刚, 等. 考虑分形维数的注水模型及注水时间研究. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 817)
- [11] Liu Z, Wang W D, Xu W B, et al. Permeability model of coal seam water injection and numerical simulation study of hydraulic coupling influencing factors. *J Min Saf Eng*, 2021, 38(6): 1250  
(刘震, 王文迪, 许文彪, 等. 煤层注水渗透率模型及水力耦合影响因素数值模拟研究. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(6): 1250)
- [12] Li Z X, Sun G Y, Wang J B. Numerical simulation of water injection into coal seam throughlong drill hole and determination of its reasonable parameters. *J China Coal Soc*, 2001, 26(4): 389  
(李宗翔, 孙广义, 王继波. 煤层长钻孔注水过程的数值模拟与参数的合理确定. 煤炭学报, 2001, 26(4): 389)
- [13] Li B B, Gao Z, Yang K, et al. Study on coal adsorption-permeability model under the coupling of temperature and pore pressure. *Chin J Rock Mech Eng*, 2020, 39(4): 668  
(李波波, 高政, 杨康, 等. 温度与孔隙压力耦合作用下煤岩吸附-渗透率模型研究. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(4): 668)
- [14] Cheng G Y, Hou J Y, Si J H, et al. Research on influence law of key parameters of coal seam water injection for dust reduction. *Saf Coal Mines*, 2021, 52(8): 188  
(程根银, 侯佳音, 司俊鸿, 等. 煤层注水降尘关键参数影响规律研究. 煤矿安全, 2021, 52(8): 188)
- [15] Wang L, Zhu C Q, Yin Z Q, et al. Research on soft coal mechanics characteristic test for moisture content effect. *J Min Saf Eng*, 2016, 33(6): 1145  
(王磊, 朱传奇, 殷志强, 等. 松软煤体力学特征的含水率效应试验研究. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(6): 1145)
- [16] Dong P, Shan Z J, Li Z. Study on the surface wet characteristic of ultrafine coal powder. *J China Coal Soc*, 2004, 29(3): 346  
(董平, 单忠健, 李哲. 超细煤粉表面润湿性的研究. 煤炭学报, 2004, 29(3): 346)
- [17] Nie B S, He X Q, Wang E Y, et al. Micro-mechanism of coal adsorbing water. *J China Univ Min Technol*, 2004, 33(4): 379  
(聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 煤吸附水的微观机理. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4): 379)
- [18] Wang Q S, Jin L Z, Sun J H. A research on coal seam water infusion course and coal body wetness mechanism. *J Saf Environ*, 2004, 4(1): 70  
(王青松, 金龙哲, 孙金华. 煤层注水过程分析和煤体润湿机理研究. 安全与环境学报, 2004, 4(1): 70)
- [19] Wang L, Liao X X, Zha M X, et al. Study on wetting characteristics of coal dust in soft coal based on principal component analysis. *Coal Sci Technol*, 2020, 48(2): 104  
(王亮, 廖晓雪, 查梦霞, 等. 基于主成分分析法的松软煤体煤尘润湿特性研究. 煤炭科学技术, 2020, 48(2): 104)
- [20] Hu Q C. Analysis on effective influenced elements of coal seam watering. *Coal Chem Ind*, 2013, 36(5): 15  
(胡起晨. 煤层注水效果的有效影响因素. 煤炭与化工, 2013, 36(5): 15)
- [21] Han J P, Wang Y, Zhao (C/S), et al. Research status and

- influencing factors of coal seam water injection. *Sci Technol Innov Her*, 2010, 7(3): 73  
(韩晋平, 王洋, 赵偲, 等. 煤层注水研究现状及影响因素分析. *科技创新导报*, 2010, 7(3): 73)
- [22] Qin W G, Zhang Y S. Relation of pore distribution of coal with water infusion increment in seams. *J China Coal Soc*, 2000, 25(5): 514  
(秦文贵, 张延松. 煤孔隙分布与煤层注水增量的关系. *煤炭学报*, 2000, 25(5): 514)
- [23] Wang G, Chen X C, Wang S B, et al. Influence of fracture connectivity and shape on water seepage of low-rank coal based on CT 3D reconstruction. *J Nat Gas Sci Eng*, 2022, 102: 104584
- [24] Zhou H W, Liu Z L, Sun X T, et al. Evolution characteristics of seepage channel during water infusion in deep coal samples. *J China Coal Soc*, 2021, 46(3): 867  
(周宏伟, 刘泽霖, 孙晓彤, 等. 深部煤体注水过程中渗流通道演化特征. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 867)
- [25] Fan C, Xu H, Wang G, et al. Determination of roof horizontal long drilling hole layout layer by dynamic porosity evolution law of coal and rock. *Powder Technol*, 2021, 394: 970
- [26] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: Implications for conductivity and pore formation. *Phys Rev Lett*, 1985, 54(12): 1325
- [27] Hildgen P, Nekka F, Hildgen F, et al. Macroporosity measurement by fractal analysis. *Phys A Stati Mech Appl*, 1997, 234(3-4): 593
- [28] Qin L, Zhai C, Liu S M, et al. Fractal dimensions of low rank coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw based on nuclear magnetic resonance applied for coalbed methane recovery. *Powder Technol*, 2018, 325: 11
- [29] Shi X H, Pan J N, Hou Q L, et al. Micrometer-scale fractures in coal related to coal rank based on micro-CT scanning and fractal theory. *Fuel*, 2018, 212: 162
- [30] Wang D K, Zhang H, Wei J P, et al. Dynamic evolution characteristics of fractures in gas-bearing coal under the influence of gas pressure using industrial CT scanning technology. *J China Coal Soc*, 2021, 46(11): 3550  
(王登科, 张航, 魏建平, 等. 基于工业 CT 扫描的瓦斯压力影响下含瓦斯煤裂隙动态演化特征. *煤炭学报*, 2021, 46(11): 3550)
- [31] Wang G, Shen J N, Liu S M, et al. Three-dimensional modeling and analysis of macro-pore structure of coal using combined X-ray CT imaging and fractal theory. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2019, 123: 104082
- [32] Comiti J, Renaud M. A new model for determining mean structure parameters of fixed beds from pressure drop measurements: Application to beds packed with parallelepipedal particles. *Chem Eng Sci*, 1989, 44(7): 1539
- [33] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Science Soc Amer J*, 1989, 53(4): 987
- [34] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distribution: Analysis and limitations. *Soil Science Soc Amer J*, 1992, 56(2): 362
- [35] Wu A J, Zhao W B, Jiang C L. Experimental research about the influence of temperature on the coal sturdiness coefficient. *J Saf Environ*, 2015, 15(4): 103  
(吴爱军, 赵文斌, 蒋承林. 温度对煤体坚固性系数的影响试验. *安全与环境学报*, 2015, 15(4): 103)
- [36] Li H T, Zhang R L. Influence of firmness coefficient on gas permeability of different types of structure coal. *Saf Coal Mines*, 2015, 46(8): 19  
(李红涛, 张瑞林. 坚固性系数对不同类型结构煤瓦斯渗透特性的影响. *煤矿安全*, 2015, 46(8): 19)
- [37] Xu G, Jin H W, Li S G, et al. Distribution characteristics of coal seam permeability with different solidity coefficient  $f$  and applicability analysis of hydraulic fracturing of underground coal mine. *J Xi'an Univ Sci Technol*, 2019, 39(3): 443  
(徐刚, 金洪伟, 李树刚, 等. 不同坚固性系数  $f$  值煤渗透率分布特征及其井下水力压裂适用性分析. *西安科技大学学报*, 2019, 39(3): 443)
- [38] Yu B M, Cheng P. A fractal permeability model for bi-dispersed porous media. *Int J Heat Mass Transf*, 2002, 45(14): 2983
- [39] Yang H. *Study on Fractal Characteristics and Permeability Characteristics of Meso-structure of Water-injected Coal Samples* [Dissertation]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018:  
(杨赫. 注水煤样微观结构分形特征及渗透特性研究[学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2018)
- [40] Zhang C, Jia S, Huang X, et al. Accurate characterization method of pores and various minerals in coal based on CT scanning. *Fuel*, 2024, 358: 130128
- [41] Wang G, Han D Y, Jiang C H, et al. Seepage characteristics of fracture and dead-end pore structure in coal at micro- and meso-scales. *Fuel*, 2020, 266: 117058
- [42] Huang J B, Wen J W, Wang B, et al. Parameter sensitivity analysis for a physically based distributed hydrological model based on Morris' screening method. *J Flood Risk Manag*, 2020, 13(1): e12589
- [43] Wang G, Shen J N, Chu X Y, et al. Characterization and analysis of pores and fissures of high-rank coal based on CT three-dimensional reconstruction. *J China Coal Soc*, 2017, 42(8): 2074  
(王刚, 沈俊男, 褚翔宇, 等. 基于 CT 三维重建的高阶煤孔隙裂隙结构综合表征和分析. *煤炭学报*, 2017, 42(8): 2074)
- [44] Song S B, Liu J F, Ni H Y, et al. A new automatic thresholding algorithm for unimodal gray-level distribution images by using the gray gradient information. *J Petrol Sci Eng*, 2020, 190: 107074
- [45] Xiao X, Li C Q, Zhang Y W, et al. Local sensitivity analysis on parameter of accidental pump-stop water hammer model. *Yangtze River*, 2019, 50(4): 208  
(肖学, 李传奇, 张焱炜, 等. 事故停泵水锤计算模型参数局部敏感性分析. *人民长江*, 2019, 50(4): 208)