

林强伟,朱永建,罗亚飞,等. 煤岩裂隙网络水气运移特性数值模拟研究[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(1): 125-136, 150. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024935

LIN Qiangwei, ZHU Yongjian, LUO Yafei, et al. Numerical simulation study on the migration characteristics of water and gas in coal rock fracture networks[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(1): 125-136, 150. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2024935

煤岩裂隙网络水气运移特性数值模拟研究

林强伟¹, 朱永建^{1,2,3}, 罗亚飞^{1,2,3}, 李鹏¹, 王平^{1,2,3}, 李豹¹

1. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南湘潭 411201;

2. 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南湘潭 411201;

3. 湖南科技大学煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南湘潭 411201

摘要:为了研究煤岩真实裂隙网络中水驱气的运移特性,采用体视显微镜提取现场煤样的二维裂隙结构,二值化后导入COMSOL软件中进行水驱气数值模拟,采用相场法对水气两相界面进行追踪,探讨水驱气过程中封闭气形成原因,分析不同裂隙数量与裂隙开度对驱替效果的影响。结果表明:当裂隙延伸方向与驱替方向一致时,驱替速度更快,易形成优势通道,经过狭窄喉道时速度和压力增加;在驱替平衡时,易形成盲端封闭气、“H”型封闭气、变径封闭气和绕流封闭气4种封闭气类型,其形成主要受裂隙形态、毛细管力及润湿性影响;裂隙数量减少时,水气两相平均速率增大,平均压力与剩余瓦斯量减小;裂隙开度较小时,平均速率和压力升高,剩余瓦斯量增加。

关键词:裂隙网络;煤层注水;数值模拟;剩余气;运移特性

中图分类号:TD 712

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2025)01-0125-13

Numerical simulation study on the migration characteristics of water and gas in coal rock fracture networks

LIN Qiangwei¹, ZHU Yongjian^{1,2,3}, LUO Yafei^{1,2,3}, LI Peng¹, WANG Ping^{1,2,3}, LI Bao¹

1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan, 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China

Abstract: To investigate the transport dynamics of water-driven gas displacement within the intrinsic fracture network of coal, this study extracted the two-dimensional fracture structure of in-situ coal samples using a stereomicroscope. Following binarization, the fracture images were imported into COMSOL software for numerical simulation of water-driven gas displacement. We employed the phase field method to track the water-gas two-phase interface, allowing for a detailed examination of the mechanisms behind trapped gas formation. Additionally, we analyzed the impact of varying fracture densities and apertures on displacement effectiveness. The findings indicate that when the fracture extension direction aligns with the displacement direction, displacement velocity is enhanced, facilitating the formation of

收稿日期:2024-06-15 修回日期:2024-11-10

基金项目:国家自然科学基金(52274119, 52304214);湖南省自然科学基金青年基金(2023JJ40287)

作者简介:林强伟(2001—),男,湖南宁乡人,硕士研究生,主要从事非常规资源开发等方面的研究工作。E-mail: alinalin0223@163.com

通信作者:朱永建(1973—),男,安徽安庆人,博士,教授,主要从事岩石力学与岩层控制等方面的研究工作。E-mail: yjzhu@hust.edu.cn

preferential flow channels; in narrow throat sections, both velocity and pressure increase. At displacement equilibrium, four types of trapped gas structures—blind-end, “H”-type, variable-diameter, and bypass trapped gas—tend to form, influenced primarily by fracture morphology, capillary forces, and wettability. With fewer fractures, the average water-gas flow rate increases, reducing both average pressure and residual gas content; in contrast, narrower apertures elevate both flow rate and pressure, resulting in higher residual gas levels. This micro-scale study of water-driven gas displacement within real coal fracture networks offers insights for improving gas displacement efficiency at the macro scale.

Key words: fracture network; coal seam water injection; numerical simulation; residual gas; migration characteristics

煤层气作为一种高效的清洁能源大量赋存于煤矿中,合理开采利用煤层气对实现“碳达峰”和“碳中和”目标具有重要意义^[1-2]。随着煤矿开发逐步转到深部地下空间,煤层的渗透率降低,增大了瓦斯治理与开发的难度。为了降低煤层的瓦斯压力与瓦斯含量,采取注水驱气是局部煤层气快速驱替的主要措施^[3]。因此,揭示水气两相流动特征,对煤层稳定性控制、瓦斯动态预测等具有重要现实意义^[4-6]。

许多地下流体领域的学者针对裂隙网络中的流体流动及赋存特征开展了大量研究,主要手段包括理论分析、室内试验以及数值模拟。部分学者针对渗透率模型进行了研究^[7-9]。李文睿等^[10]运用高精度 CT 技术获取孔隙、裂隙的结构参数,对比分析了单一气路渗透率模型与双重气路结构渗透率模型的相对差异。董川龙等^[11]结合平均几何与分形几何对孔隙截面、大小和迂曲度进行表征,建立了毛细管吸水模型。LUO 等^[12]建立了同时考虑孔隙和裂隙迂曲度的分形渗透率模型,基于真实裂隙图像模拟分析了裂隙结构参数对煤岩渗透率的影响。夏彬伟等^[13]建立真三轴应力作用下的裂隙煤岩体渗透率模型,通过气体渗流试验探讨了真三轴应力条件下裂隙结构对渗透率的影响。在准确建立渗透率模型的基础上,部分学者通过室内试验研究了裂隙几何特征与残余流体特征^[14-16]。于海洋等^[17]通过不同驱替方式下的岩芯驱替试验,验证了碳化水驱提高致密油藏采收率的可行性,明确了其在致密油藏中的增油潜力。李天等^[18]结合核磁共振与 CT 扫描技术研究煤岩孔隙特征,并分析了孔隙结构参数对可动流体的影响。葛兆龙等^[19]采用核磁共振技术观测不同围压条件下煤岩饱和水与氮气驱水的过程,结合分形理论分析了煤岩气驱水的微观流动特征。郑司建等^[20]基于低场核磁共振装置,探讨了不同注入压力与不同温度条件下煤岩注 CO₂ 吸附置换瓦斯的动态化相变过程。

然而,室内岩芯驱替试验与核磁共振试验均无法直接观察岩石内部水气两相的动态运移特征,因此部分学者采取微流控可视化试验对水气两相界面进行研究。魏鹤举等^[21]基于微流控可视化试验平台建立真实砂岩微观孔隙结构模型,研究了不同流速与润湿性对水气两相流动规律及其驱替效率的影响。陈绍杰等^[22]通过激光刻蚀技术重建煤岩孔隙通道,实时观测了不同注水速度与接触角对煤岩段塞流动的影响。此外,国内外学者还通过数值模拟软件对多孔介质中残余气的形成机理进行研究^[23-27]。吴克柳等^[28]采用随机生成非均匀多孔介质进行水驱气模拟研究,探讨了残余气的分布与驱替效率的影响因素。张涛等^[29]基于多松弛颜色梯度格子玻尔兹曼模型,分析了碳酸盐岩在不同孔-缝-洞组合通道下油藏成藏过程和水侵过程的流动规律。

当前,对于煤岩裂隙网络的研究主要集中在碳酸盐岩气藏和多孔介质的水驱气特性,而在水气运移研究方面存在较大局限性。室内试验虽然可以分析水气界面与孔隙结构的相互作用,但难以直接量化表达煤岩裂隙内部水气两相的动态运移特征。此外,现有的数值模拟多基于规则模型,难以有效地模拟煤岩裂隙网络中复杂的渗流行为和残余气的多样化分布。为此,本文基于真实煤体的裂隙网络图片,采用相场法研究煤岩裂隙网络中水气两相的流动特性与剩余气的分布状态,为煤层注水驱气的研究提供参考。

1 水气两相流控制方程

1.1 基本假设

煤岩中水驱替瓦斯是一个复杂的过程,为提高计算效率、突出主要物理机制,在建立数学模型之前进行以下假设:

(1) 瓦斯为理想气体,水和瓦斯在裂隙中的流动均为层流,服从达西定律。

(2) 瓦斯与水之间的溶解度忽略不计,水气两相流为不混溶体系。

(3) 驱替过程中温度恒定,煤岩中水与瓦斯处于热平衡。

(4) 不考虑煤岩裂隙在驱替过程中的弹塑性变形,只模拟渗流场。

(5) 忽略重力对水气两相的影响,煤岩中不包含其他气体或者液体。

1.2 控制方程

模拟煤岩裂隙中水驱替瓦斯的过程满足 Navier-Stokes 方程,表达式如下:

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right] = \nabla [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + F_{st} \quad (1)$$

$$\rho(\nabla \cdot \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

式中, ρ 为流体密度,kg/m³; μ 为动力黏度,Pa·s; \mathbf{u} 为流体速度,m/s; ∇ 为梯度算子; \mathbf{I} 为单位向量; p 为流体压力,Pa; F_{st} 为水气两相界面的表面张力,N/m³。

由于双重孔隙介质的流体流动主要发生在裂隙结构中,而真实煤岩裂隙往往结构复杂,考虑到数值模拟的准确性,采用相场法建立多孔介质两相流数学模型。在相场法中,水气界面处的流体流动模型可以表示为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \left(\frac{\gamma \lambda}{\varepsilon^2} \nabla \psi \right) \quad (3)$$

$$\psi = -\nabla \cdot \varepsilon^2 \nabla \phi + (\phi^2 - 1) \phi \quad (4)$$

$$\gamma = \chi \varepsilon^2 \quad (5)$$

式中, ϕ 为相场参数; γ 为迁移率,m³·s/kg; χ 为迁移率参数,决定了 Cahn-Hilliard 扩散的时间尺度; ε 为水气两相界面厚度,mm; λ 为混合能量密度,N; ψ 为相场辅助变量。

在式(3)、式(4)中, ϕ 取值范围-1< ϕ <1,将两相界面描述为具有一定厚度的扩散界面层,当 $\phi = -1$ 和 $\phi = 1$ 时分别表示气相和水相。 ε 的值与几何网格大小有关,若 ε 设置过小,模拟计算的流体速度误差会增大;若 ε 设置过大,则无法对两相流界面进行定义。因此, ε 一般设置为最大网格尺寸的二分之一。相场法模型如图 1 所示。

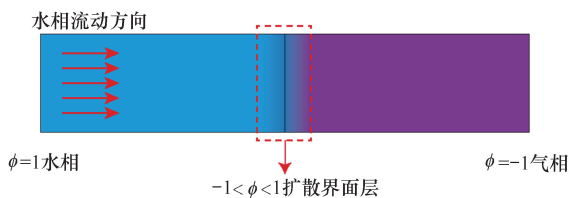


图 1 模型示意图

Fig. 1 Model Schematic Diagram

在相场法中,界面张力系数 σ 为单位表面积的额外自由能,可以表示为^[30]

$$\sigma = \frac{2\sqrt{2}\lambda}{3\varepsilon} \quad (6)$$

表面张力作用项的计算表达式如下:

$$F_{st} = \lambda \left[-\nabla^2 \phi + \frac{\phi(\phi^2 - 1)}{\varepsilon^2} \right] = \frac{\lambda}{\varepsilon^2} \psi \nabla \phi \quad (7)$$

裂隙内水气两相界面流体的密度与黏度为水气两相对应物理量的平均值,可表示为^[31]

$$\begin{cases} \rho = \frac{1+\phi}{2}\rho_w + \frac{1-\phi}{2}\rho_g \\ \mu = \frac{1+\phi}{2}\mu_w + \frac{1-\phi}{2}\mu_g \end{cases} \quad (8)$$

式中, ρ_g 、 ρ_w 分别为气相和水相的流体密度,kg/m³; μ_g 、 μ_w 分别为气相和水相的黏度,Pa·s。

裂隙壁面为无滑移边界,且相变量不穿越裂隙边界^[28]

$$\begin{cases} u_n = 0 \\ \mathbf{n} \cdot \frac{\gamma \lambda}{\varepsilon^2} \nabla \psi = 0 \\ \mathbf{n} \cdot \varepsilon^2 \nabla \phi = \varepsilon^2 \cos \theta_w | \nabla \phi | \end{cases} \quad (9)$$

式中, u_n 为壁面的流体流速,m/s; \mathbf{n} 为壁面单位法向量; θ_w 为接触角,(°)。

2 裂隙网络水气两相数值模型

2.1 裂隙网络几何模型

为了更准确研究实际工程情况中水驱气的运移特性,选取真实煤层裂隙网络作为模拟对象,取现场煤样进行切割处理,煤样剖面尺寸为 30 mm×30 mm,处理后的煤样实物如图 2(a)所示。现场驱替过程是在三维空间上实现的,但为了方便模拟计算,将现场煤样用体视显微镜进行处理得出煤样剖面的二维图像,能较为直观地观察到煤样裂隙网络结构与形态分布特征,如图 2(b)所示。运用 ImageJ 对二维图像进行二值化处理,得出煤样裂隙与基质的轮廓线,其中白色区域表示煤层基质,黑色区域表示煤层裂隙,未连通孔隙面积为 21.22 mm²,最大洞室尺寸为 4.54 mm,最小喉道开度为 0.18 mm,裂隙通道分形维数为 1.616,裂隙通道如图 2(c)所示。

2.2 网格划分及边界条件

将提取的煤层裂隙轮廓图导入 COMSOL 软件中,煤样二维模型几何尺寸为 30 mm×30 mm。利用 COMSOL 内置的“图像到曲线”插件,将裂隙轮廓图提取成为几何曲线,并用内置布尔操作将裂隙

区域与基质区域进行划分;然后采用自由三角网格划分方式对裂隙区域进行网格划分,得到 169 944 个域单元和 18 288 个边界单元,其中裂隙最大单

元大小为 0.39 mm,最小单元大小为 0.004 5 mm,平均网格质量为 0.858 1,求解自由度数为 376 384 个,如图 3 所示。

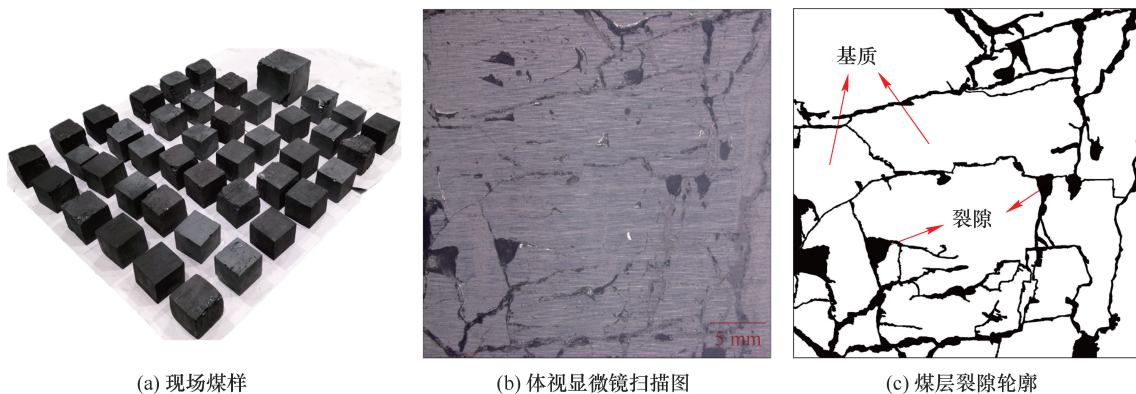


图 2 煤岩裂隙提取

Fig. 2 Coal rock fracture extraction

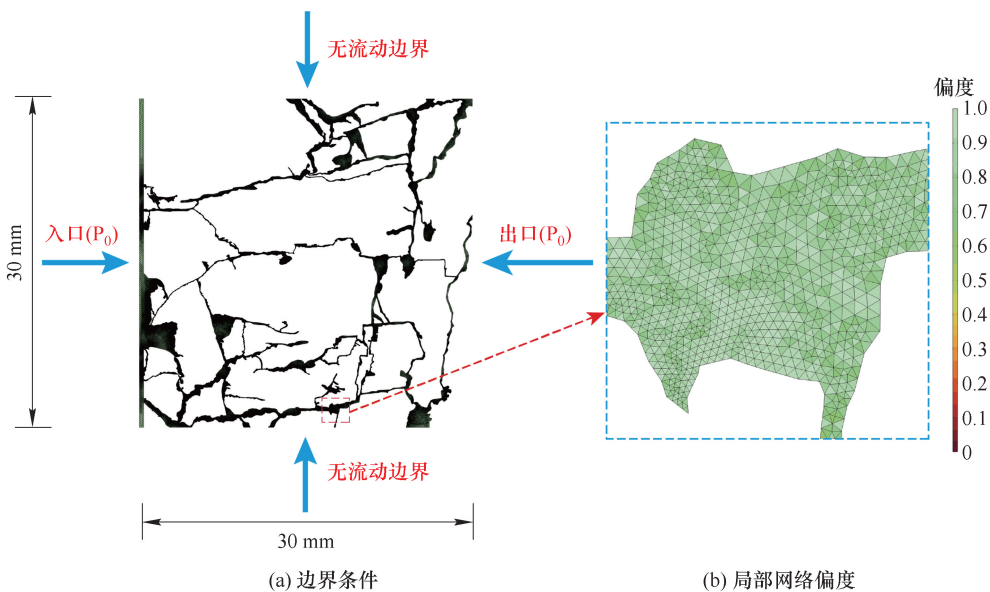


图 3 裂隙网格建立

Fig. 3 Fracture network establishment

模型边界条件如图 3(a)所示。初始状态下,裂隙模型中含有饱和瓦斯,气体流动由注水动力驱动,在左侧入口处设置注水速度 v 为 5 mm/s,

右侧压力出口处设置压力为 0 Pa,模型上下边界为无流动界面。模型计算所需的物性参数见表 1。

表 1 模型计算所需的物性参数

Table1 Physical property parameters required for model calculations

水密度 $\rho_w / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水动力黏度 $\mu_w / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	瓦斯密度 $\rho_g / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	瓦斯动力黏度 $\mu_g / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	驱替环境 温度 T/K	裂隙孔隙 率 ϵ_p	裂隙渗透 率 κ/m^2	润湿角 $\theta / (^\circ)$	水气界面张力 $\sigma / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
1 000	0.001	0.716	1.084×10^{-5}	303.15	0.8	2.84×10^{-7}	60	5×10^{-4}

3 模拟结果

3.1 流速与压力分布特征

驱替时间为 1 s 时,经过模拟计算得到裂隙内

流速云图如图 4 所示。由图 4(a)可知,裂隙中最大流速为 2.019 m/s,最小流速为 0,平均流速为 0.067 m/s;水气两相的速度方向完全受裂隙的延伸方向控制,与注水方向一致的裂隙是驱替的主要

通道,其内流体流速明显高于其他方向裂缝内的流体流速。在裂隙过水截面均匀取 5 个监测点,监测点位置如图 4(b) 所示。当水相经过裂隙盲端时,残余气并非静止不动,而是在裂隙盲端内受水相流动影响形成漩涡,如图 4(c) 所示。当水气两相从裂隙经过较窄喉道时,由于水相流动压力集中,流线密集,流动速度明显加快。

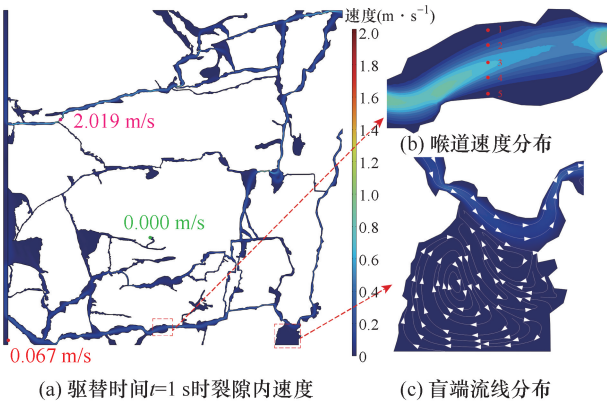


图 4 裂隙内流速分析

Fig. 4 Analysis of flow velocity within fractures

提取驱替过程中各点的速度变化,如图 5 所示。可知,裂隙截面中心位置 3 号点的流速最大值为 0.33 m/s,是 2、4 号点流速最大值的 1.5 倍,是 1、5 号点流速最大值的 16.2 倍。这是因为水驱气过程中主要受到的阻力有黏滞力和表面张力,在靠近壁面的两侧,水相受到壁面的黏滞力增大,减缓了水相流动速度。

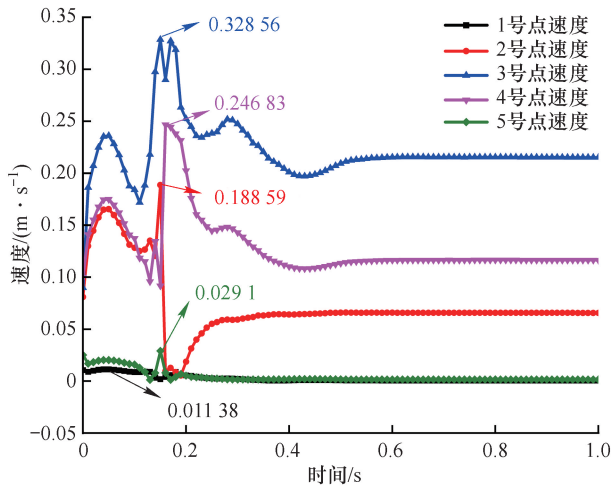


图 5 裂隙过水截面速度变化

Fig. 5 Velocity changes across the cross-section of water flow in fractures

驱替时间为 1 s 时,经过模拟计算得到裂隙内压力云图如图 6 所示。由图 6(a) 可知,裂隙中最大压力为 7.09 kPa,最小压力为-0.02 kPa,平均压

力为 4.42 kPa。注水驱气初始时裂隙内的相对压力为 0 Pa,水驱气过程中裂隙内压力发生增大或减小,这说明水驱替瓦斯的过程使得裂隙内压力的重新分布。在压力变化区域内,水相传递形成的优势通道内驱替速度较快,这是因为水相沿着驱替方向延伸时,优势通道中存在的阻力比其他通道的阻力更小,水相优先驱替优势通道内的瓦斯。

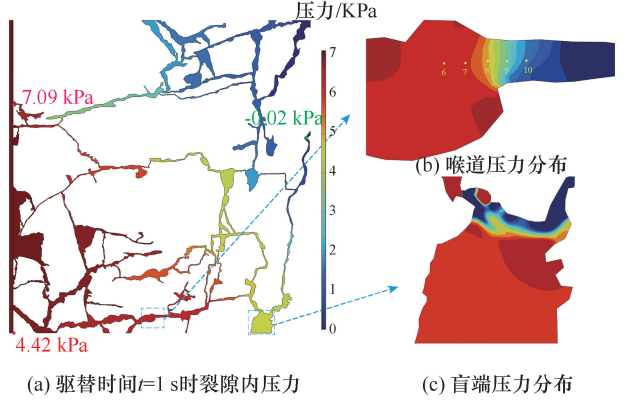


图 6 裂隙内压力分析

Fig. 6 Analysis of pressure within fractures

由图 6(b) 可知,在裂隙狭窄喉道处形成压力集中区域。对进入喉道前后取 5 个监测点,提取驱替过程中各点的压力变化,结果如图 7 所示。由图 7 可知,随着驱替时间变化,6 号点压力始终大于其余点压力,在驱替时间 1 s 时压力为 6 458.7 Pa,比进入喉道后(10 号点)的压力高出 55 Pa 左右,这说明喉道结构会导致流体局部压力增大,可能对驱替效率和流动特性产生重要影响。

由图 6(c) 可知,盲端入口处压力低于盲端内部压力,这是因为水相的流动受到裂隙结构的限制,流体无法继续向前流动,在盲端与狭窄喉道处聚集,最终压力增大。

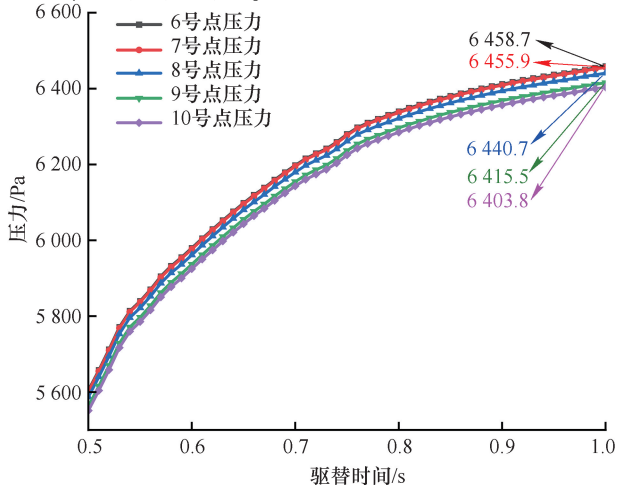


图 7 喉道局部压力变化

Fig. 7 Local pressure changes in the throat area

3.2 水气两相运移规律

不同驱替时间内瓦斯体积分数分布如图8所示。图8(a)中,红色为气相瓦斯,蓝色为水相。注入水相时,裂隙中驱替前缘基本均匀前进,当接触到裂隙狭窄区域会加速通过,该现象与微观可视化试验中观察到的现象一致,这是由于在窄小裂隙内,驱替压差和毛细管力更容易克服壁面的黏滞阻力。

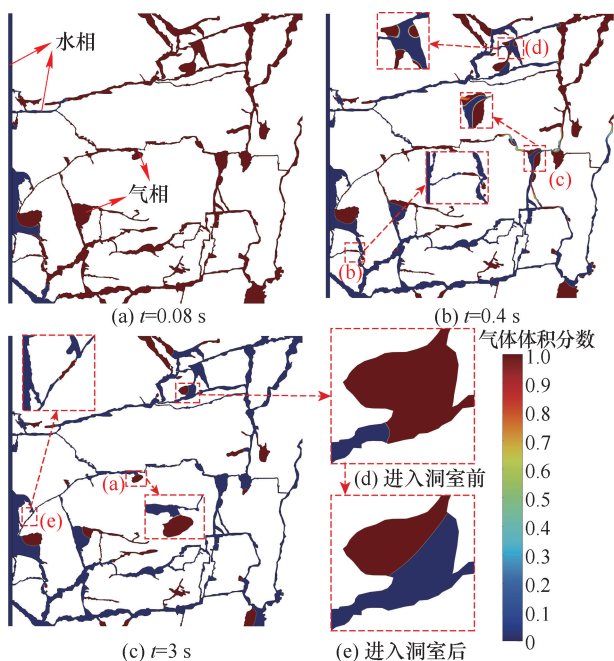


图8 不同驱替时间内瓦斯体积分数

Fig. 8 Gas volume fraction at different displacement times

由图8(b)可知,随着注水量增多,水相沿着一条或多条由宽度较大、洞室较少和迂曲度较小的连续裂隙组成的通道向出口运移,并率先到达出口形成水流通路,基于形成的优势通道,水相向不同连通裂隙进行扩散,提高水驱气的驱替效率。

由图8(d)(e)可知,当水相从裂隙中进入洞室时,相界面形态在洞室入口发生转变,靠近裂隙壁面的界面落后于中心界面,毛细管力由动力转变为阻力。这种阻力滞后现象减缓了裂隙中水相快速突破造成的毛管指进,一定程度促进了水相在裂隙中的均衡传递,提高驱气效率^[32]。

3.3 封闭气形成原因

从图8(a)(b)(c)中框选的封闭气可以清晰地观察到,气体在煤层裂隙网络中的流动往往受到裂隙形态、毛细管力以及湿润性等因素的影响,主要以气团和气柱两种形态赋存,最终可以观察到4种类型的封闭气:盲端封闭气、“H”型封闭气、变径封闭气、绕流封闭气^[33],如图9所示。每种封闭气的形成机理和分布特征不同,但共同表现为气体被困在裂隙网络的局部区域,难以继续流动前进。

由图9(a)可知,当裂隙内水气两相交界面经过盲端区域时,受壁面吸附力的影响,水相会沿壁面流入盲端,此时两相交界面发生变形,曲率半径增大。当界面与盲端入口顶点相切时,两相界面被截成两段,其中盲端裂隙内的交界面在毛细管力的作用下迅速形成稳定的新交界面,束缚住盲端裂隙的内部瓦斯。

由图9(b)可知,当裂隙数量逐渐增多时容易形成“H”型通道,在水驱气过程中,水相会从2个入口进入不同通道。该类型通道容易形成封闭气的主要原因有2个方面:一方面是水相在裂隙中的流动优先选择阻力较小的通道,即“H”型通道的两条边路;另一方面是受边路水相压力与壁面润湿性影响,水相会逐渐进入两条边路之间的连接通道,压缩其内部气体形成封闭气。

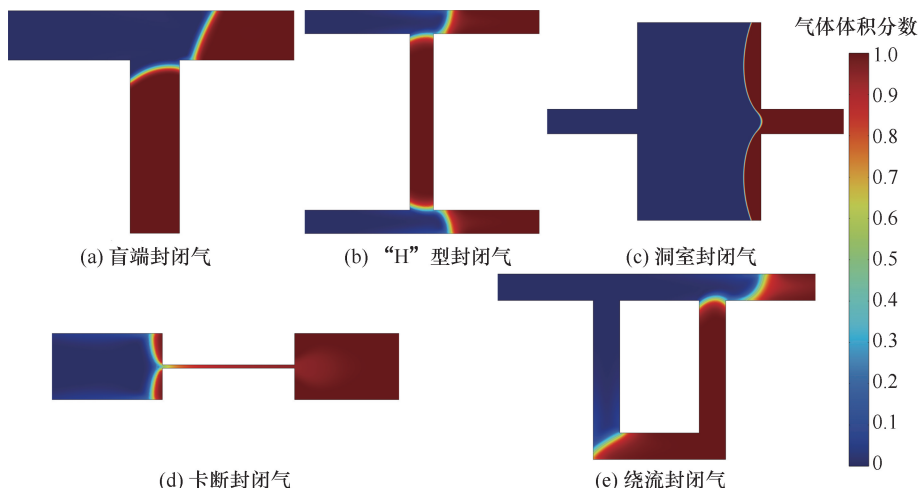


图9 不同封闭气类型

Fig. 9 Different types of trapped gas

由图 9(c)(d)可知,当气相经过裂隙变径位置时,洞室或喉道的半径差使得入口处的两端弧面毛细管力由动力转变成阻力,因此水相压力容易突破气相界面进行分割,在壁面润湿性的影响下形成变径封闭气。

由图 9(e)可知,当裂隙宽度均匀时,由于裂隙分支的长度存在差异,随着水相从入口注入,相界面在裂隙分叉处被顶点截断,水相从两个分支流入。短裂隙分支气体体积较小,且裂隙方向与驱替方向一致,水的渗流速度较快,气体很快被水相驱替到长裂隙分支的出口端,在水动力与壁面润湿性的作用下,形成压力梯度将长裂隙分支中还未来得及驱替的气体封闭起来,形成封闭气。

4 裂隙结构特征影响因素

煤样中的驱替过程是一个多因素作用下的传

质过程,其中裂隙开度与裂隙数量对煤层中水驱气的效果有显著影响。通过对现场同一煤层不同区域的裂隙煤样进行分析,总结不同区域裂隙特征的差异性,并选取裂隙轮廓清晰的图像进行对比,研究不同裂隙结构下水驱替瓦斯的效果。

4.1 裂隙数量的影响

裂隙数量反映了裂隙的发育程度,与煤层中裂隙渗流特征密切相关,不同裂隙数量的煤样如图 10 所示。在实际应用中,通常使用表面密度对裂隙数量进行定量化表示:

$$\rho_s = \frac{N}{A} \quad (10)$$

式中, N 为煤样表面裂隙总段数; A 为煤样表面积,本文中 $A=9\text{ cm}^2$ 。

计算得到图 10 各煤样的表面密度见表 2。

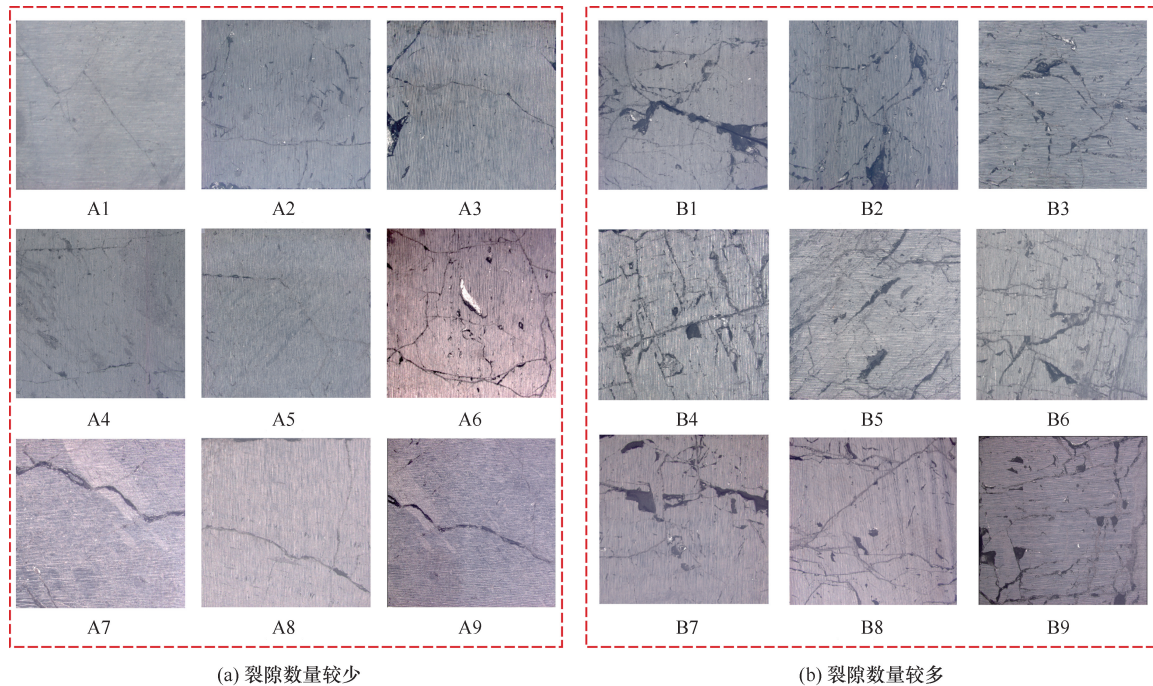


图 10 不同裂隙数量的煤样

Fig. 10 Coal samples with different numbers of fractures

表 2 不同煤样的表面密度

Table 2 Surface density of different coal samples

煤样编号	表面密度 ρ_s / (条· cm^2)	煤样编号	表面密度 ρ_s / (条· cm^2)
A1	0.44	B1	3.33
A2	0.78	B2	3.89
A3	0.44	B3	3.56
A4	0.56	B4	4.44
A5	0.44	B5	4.00
A6	0.67	B6	3.78
A7	0.44	B7	3.44
A8	0.33	B8	3.78
A9	0.33	B9	4.22

从表 2 可以看出,裂隙数量较多区域的煤样剖面图平均表面密度为 3.823 条/ cm^2 ,而裂隙数量较少时的平均表面密度为 0.492 条/ cm^2 。选取 A6、B9 进行对比,分析不同的裂隙数量对煤层水驱气效果的影响,结果如图 11、图 12 所示。

由图 11 可知,B9 裂隙网络中的平均流速为 0.067 m/s,A6 的为 0.12 m/s,是 B9 的 1.8 倍;B9 裂隙网络中最高流速为 2.02 m/s,是 A6 中最高流速 1.54 m/s 的 1.3 倍。究其原因,多个裂隙通道的存在导致水相在分叉裂隙中的流动形成不同程

度的扰流,减缓了水相在裂隙中的流动速度,为基质中孔隙的渗吸提供了条件。A6裂隙网络中的平均压力为 3.62 kPa, B9 为 4.42 kPa,是 A6 的 1.2 倍; B9 裂隙网络中最高压力为 7.09 kPa,是 A6 中最高压力 6.70 kPa 的 1.1 倍。可以看出,裂隙数量的多少对裂隙网络平均压力分布的影响不大,但裂隙数量较少时,裂隙内压力梯度更加均匀,裂隙内水驱气的过程优势通道形成不明显。这是因为,裂隙数量减少导致裂隙垂直于驱替方向的分支减少,降低了水相分散,因此水相与气相在裂隙内传递更加集中。

对比图 8 与图 12(c) 可知, A6 煤样裂隙网络中可以形成封闭气的裂隙结构明显减少。由图 12(d) 可知,驱替 3 s 后, A6 煤样裂隙网络中的残余

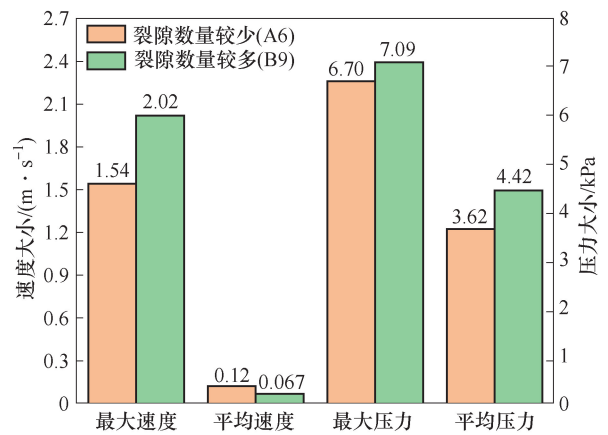


图 11 煤样 A6、B9 驱替过程中参数对比柱状图

Fig. 11 Bar chart comparing parameters during the displacement process of coal samples A6 and B9

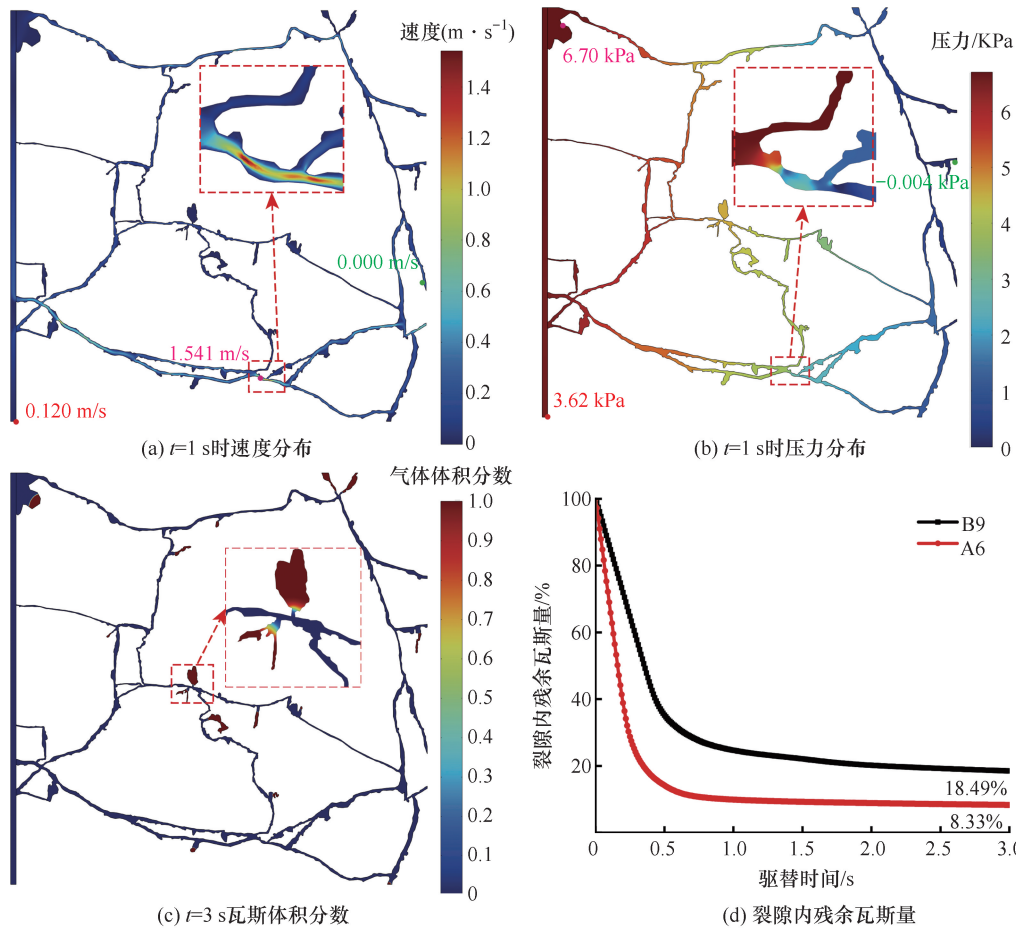


图 12 煤样 A6 的速度、压力和体积分数分布及与煤样 B9 驱替效率的对比

Fig. 12 Velocity, Pressure, and Volume Fraction Distributions of Coal Sample A6 and Comparison with the Repulsion Efficiency of Coal Sample B9

瓦斯量为 8.33%, B9 煤样裂隙网络中残余瓦斯量为 18.49%, 是 A6 的 2.2 倍。这是因为裂隙数量的增加使得煤层更容易形成连贯的渗流路径, 提供多样化的排气通道, 可以加速瓦斯气体的排除。但是, 裂隙数量的增多使裂隙网络的形态更加复杂

化, 在一定程度上会提供更多残余气形成的条件, 更容易形成“H”型封闭气或者绕流封闭气。裂隙数量增多也会引起流速的局部变化, 水相流动路径更加分散, 导致部分路径的流量减小, 瓦斯在这些路径中难以被完全驱替, 最终导致残余气体的增加。

4.2 裂隙开度的影响

裂隙开度反映了裂隙的有效过水截面,与煤层注水驱气时水相与气相流量密切相关,在实际应用中,通常使用煤样平均裂隙开度(\bar{w})进行定量化表示:

$$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{n} \quad (11)$$

式中, w_i 为单次测量裂隙开度,mm; n 为测量次数。

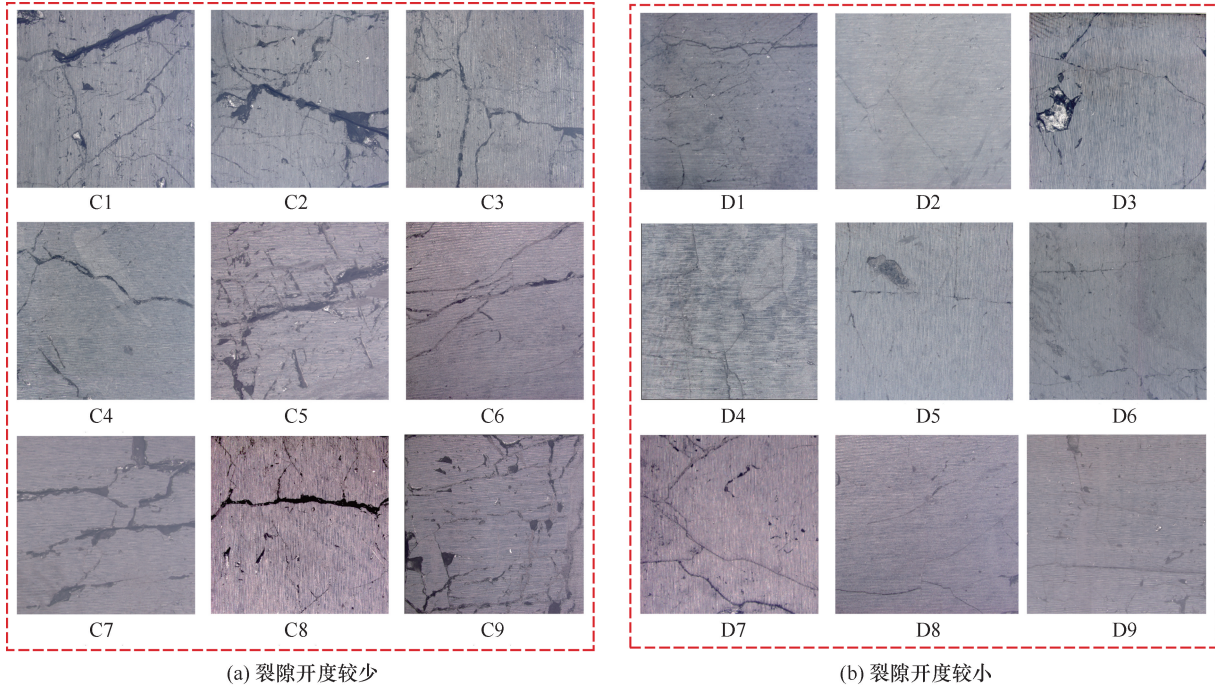


图 13 不同裂隙开度的煤样
Fig. 13 Coal samples with different fracture apertures

选取不同裂隙开度的煤样,如图 13 所示,对每张图片选取 30 个裂隙位置点,测量其裂隙开度并计算裂隙开度平均值,计算结果见表 3。

表 3 不同煤样的平均裂隙开度

Table 3 Average fracture aperture of different coal samples

煤样编号	平均裂隙开度 \bar{w} /mm	煤样编号	平均裂隙开度 \bar{w} /mm
C1	0.556	D1	0.218
C2	0.458	D2	0.158
C3	0.544	D3	0.166
C4	0.470	D4	0.154
C5	0.731	D5	0.193
C6	0.481	D6	0.171
C7	0.802	D7	0.249
C8	0.561	D8	0.137
C9	0.583	D9	0.153

从表 3 可以看出,C 组煤样和 D 组煤样的平均裂隙开度分别为 0.576 mm 和 0.178 mm。选取 C9、D4 煤样进行对比,分析不同的裂隙开度对煤层水驱气效果的影响,如图 14、图 15 所示。

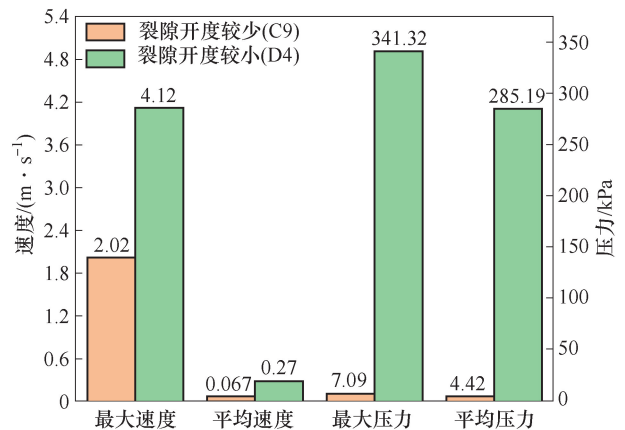


图 14 煤样 C9、D4 驱替过程中参数对比柱状图
Fig. 14 Bar chart comparing parameters during the displacement process of coal samples C9 and D4

由图 14 可知,C9 裂隙网络中平均流速为 0.067 m/s,D4 裂隙网络中平均流速为 0.27 m/s,是 C9 的 4 倍;D4 裂隙网络中最高流速为 4.12 m/s,是 C9 中最高流速 2.02 m/s 的 2 倍。究其原因,裂隙开度较小时,裂隙更像一个细小的毛细管,流体行为会受到毛细现象的显著影响。水具有较高的毛细管压力与润湿性,能够更

有效地将气体驱赶出去,因此小裂隙中水驱气的速度会更快。

C9 裂隙网络中的平均压力为 4.42 kPa, D4 的为 285.19 kPa, 是 C9 的 64.6 倍; D4 裂隙网络中最高压力为 341.32 kPa, 是 C9 中最高压力 7.09 kPa

的 48.1 倍。这是因为在较小的裂隙开度中, 由于流动路径狭窄, 导致流体动能增加、整体压力梯度增大, 形成压力集中效应, 使得单位长度上的压力变化更显著。

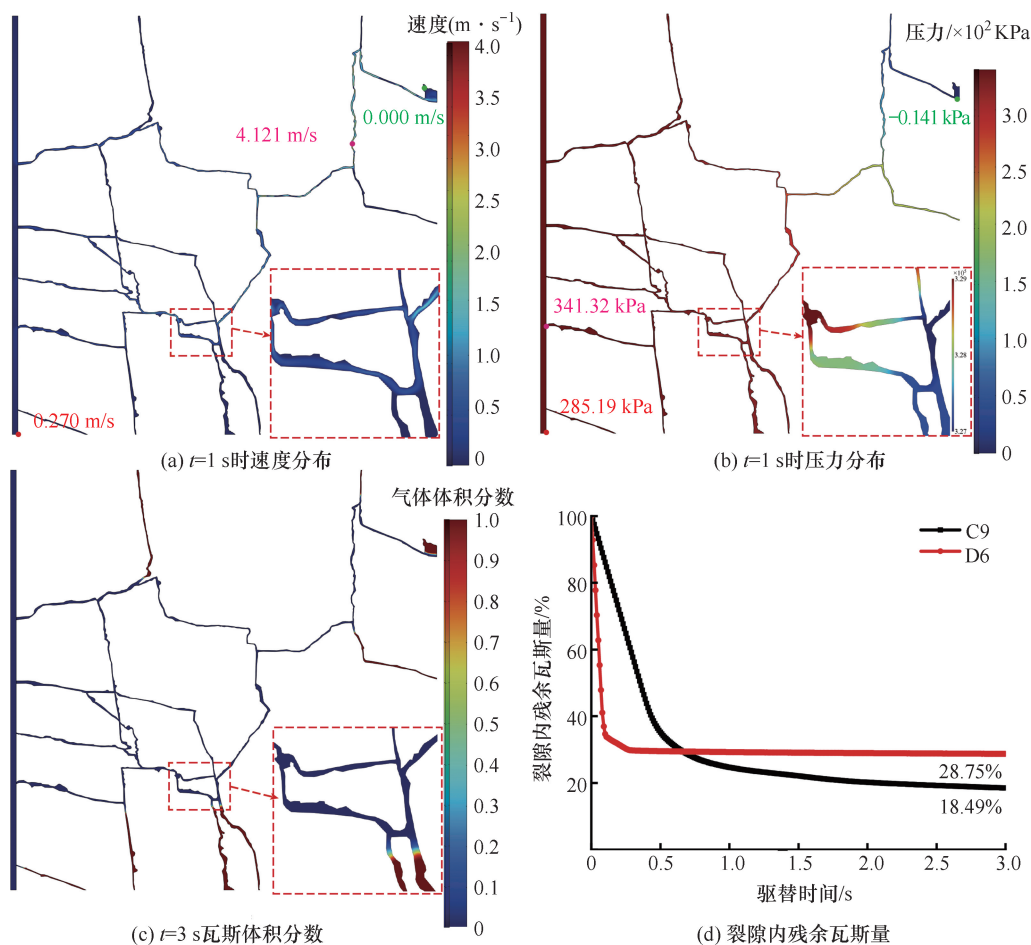


图 15 煤样 D4 的速度、压力和体积分数分布及与煤样 C9 驱替效率的对比

Fig. 15 Distribution of velocity, pressure, and volumetric fraction for coal sample D4 and comparison with the displacement efficiency of coal sample C9

图 8 与图 15(c) 对比可知, 盲端封闭气的产生不受裂隙宽窄的影响, 但 D4 裂隙网络中封闭气存在的类型减少, 缝洞型卡断封闭气无法形成。由图 15(c) 可知, 驱替初始时 D4 裂隙网络驱替速率明显高于 C9 裂隙网络, 但当驱替达到平衡状态时, C9 裂隙网络中残余瓦斯量为 18.49%, 而 D4 裂隙网络中残余瓦斯量为 28.75%, 是 C9 裂隙网络的 1.6 倍。根据达西定律, 较大的渗透率和较大的横截面积有助于更高的流量, 在相同的驱替时间内, 水能够覆盖更大体积的裂隙, 驱赶更多裂隙分支内的瓦斯。较小的裂隙开度增加了流动阻力, 使水在裂隙中的流动路径受限, 局部流速较高, 整体渗透效果不如大开度裂隙。

5 结论

通过数值模拟分析了煤层裂隙网络中水气转移特性, 研究了驱替过程中封闭气的形成机制、裂隙结构对渗流的影响及水气两相界面的变化。得到主要结论如下:

(1) 当裂隙延伸方向与驱替方向一致时驱替速率更快, 在裂隙内部截面中水相流速从中心向壁面逐渐减小。水相沿优势通道率先到达出口, 形成水流通道。裂隙内压力沿驱替方向逐渐降低, 形成连续压力梯度, 盲端和狭窄喉道处存在压力集中现象。

(2) 驱替过程中, 裂隙内主要形成有盲端封闭

气、“H”型封闭气、变径封闭气和绕流封闭气4种类型。封闭气的形成主要受裂隙形态、流动阻力、毛细管力、压力梯度及壁面润湿性等因素的影响。封闭气周围会形成涡流,影响水相的流动速度与方向,使裂隙局部压力分布不均匀。

(3) 裂隙数量较少时,裂隙内平均流速增大,平均压力降低,剩余瓦斯量减少。裂隙开度较小时,裂隙内平均流速增大,平均压力升高,剩余瓦斯量更多。

参考文献

- [1] 谢和平,任世华,谢亚辰,等. 碳中和目标下煤炭行业发展机遇[J]. 煤炭学报,2021,46(7): 2197-2211.
XIE Heping, REN Shihua, XIE Yachen, et al. Development opportunities of the coal industry towards the goal of carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2021,46(7): 2197-2211.
- [2] 刘峰,郭林峰,赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报,2022,47(1): 1-15.
LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(1): 1-15.
- [3] 王恩元,张国锐,张超林,等. 我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报,2022,47(1): 297-322.
WANG Enyuan, ZHANG Guorui, ZHANG Chaolin, et al. Research progress and prospect on theory and technology for coal and gas outburst control and protection in China[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(1): 297-322.
- [4] 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[J]. 中国矿业大学学报,2020,49(3): 428-444.
QIN Yujin, SU Weiwei, TIAN Fuchao, et al. Research status and development direction of microcosmic effect under coal seam water injection[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2020,49(3): 428-444.
- [5] 蔡益栋,杨超,李倩,等. 煤层气储层相对渗透率试验及数值模拟技术研究进展[J]. 煤炭科学技术,2023,51(S1): 192-205.
CAI Yidong, YANG Chao, LI Qian, et al. Research progress of relative permeability test and numerical simulation technology of coalbed methane reservoir[J]. Coal Science and Technology,2023,51(S1): 192-205.
- [6] 朱永建,任恒,王平,等. 倾斜厚层坚硬顶板条件下沿空留巷稳定性控制[J]. 中南大学学报:自然科学版,2023,54(3): 956-966.
ZHU Yongjian, REN Heng, WANG Ping, et al. Stability control of gob-side entry retention under the condition of inclined thick layer and hard roof[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2023, 54(3): 956-966.
- [7] MIAO T J, YANG S S, LONG Z C, et al. Fractal analysis of permeability of dual-porosity media embedded with random fractures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2015,88: 814-821.
- [8] 张晓梅,宋维源. 煤岩双重介质注水驱气渗流的理论研究[J]. 煤炭学报,2006,31(2): 187-190.
ZHANG Xiaomei, SONG Weiyuan. The theoretical study on water's driving gas displacement as for double medium of coal petrography[J]. Journal of China Coal Society,2006,31(2): 187-190.
- [9] 薛东杰,赵艾博,刘奎昌,等. 多孔介质渗透迂曲度理论推导与实验验证[J]. 矿业科学学报,2021,6(5): 615-622.
XUE Dongjie, ZHAO Aibo, LIU Kuichang, et al. On the theoretical calculation of tortuosity in porous media and its experimental validation[J]. Journal of Mining Science and Technology,2021,6(5): 615-622.
- [10] 李文睿,赵耀耀,王登科,等. 煤中CH₄渗透率估算方法研究[J]. 矿业科学学报,2022,7(2): 185-192.
LI Wenrui, ZHAO Yaoyao, WANG Dengke, et al. Study on estimation method of methane permeability in coal[J]. Journal of Mining Science and Technology,2022,7(2): 185-192.
- [11] 董川龙,滕腾,李志虎,等. 考虑微观孔隙几何的砂岩自发渗吸理论模型[J]. 矿业科学学报,2021,6(4): 418-428.
DONG Chuanlong, TENG Teng, LI Zhihu, et al. Theoretical model of water spontaneous imbibition of sandstone considering microscopic pore geometry[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(4): 418-428.
- [12] LUO Y F, XIA B W, LI H L, et al. Fractal permeability model for dual-porosity media embedded with natural tortuous fractures[J]. Fuel,2021,295: 120610.
- [13] 夏彬伟,廖传斌,罗亚飞,等. 基于分形理论的煤岩裂隙网络渗透率模型[J]. 煤田地质与勘探,2023,51(8): 107-115.
XIA Binwei, LIAO Chuanbin, LUO Yafei, et al. Fractal theory-based permeability model of fracture networks in

- coals[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(8): 107-115.
- [14] 朱永建,李鹏,王平,等. 深部高应力煤巷围岩径向梯度损伤特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(11): 2643-2654.
ZHU Yongjian, LI Peng, WANG Ping, et al. Experimental study on radial gradient damage characteristics of surrounding rock in deep high stress coal roadway [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(11): 2643-2654.
- [15] 王兆丰,苏伟伟,陈向军,等. 含瓦斯煤自然吸水渗吸试验研究及机理探析[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(8): 72-76, 96.
WANG Zhaofeng, SU Weiwei, CHEN Xiangjun, et al. Experimental study and mechanism analysis on natural water absorption and imbibition test of gas-bearing coal [J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(8): 72-76, 96.
- [16] SHI T W, WANG A W, DAI L P, et al. Experimental study on the gas desorption law in coal affected by dynamic water injection[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 22407.
- [17] 于海洋,杨中林,刘俊辉,等. 致密油藏碳化水驱提高采收率方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2019, 38(2): 166-174.
YU Haiyang, YANG Zhonglin, LIU Junhui, et al. EOR method by the carbonated water injection (CWI) for tight oil reservoirs [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2019, 38(2): 166-174.
- [18] 李天,任大忠,甯波,等. 煤层孔隙结构多尺度联合表征及其对可动流体的影响[J]. *矿业科学学报*, 2023, 8(4): 569-582.
LI Tian, REN Dazhong, NING Bo, et al. Multi-scale joint characterization of coal seam pore structure and its influence on movable fluid [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2023, 8(4): 569-582.
- [19] 葛兆龙,王浩明,周哲,等. 基于实时核磁共振的煤岩气驱水流动特性试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2023, 40(1): 194-203.
GE Zhaolong, WANG Haoming, ZHOU Zhe, et al. Experimental study on flow characteristics of gas flooding water in coal by real-time nuclear magnetic resonance [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(1): 194-203.
- [20] 郑司建,桑树勋,姚艳斌,等. 基于核磁共振的煤岩注 CO₂ 吸附置换 CH₄ 试验研究[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(10): 3738-3745.
ZHENG Sijian, SANG Shuxun, YAO Yanbin, et al. Experimental study on CO₂ adsorption and displacement of methane in coals; an NMR relaxation method [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3738-3745.
- [21] 魏鹤举,胡冉,廖震,等. 湿润性对孔隙介质两相渗流驱替效率的影响[J]. *力学学报*, 2021, 53(4): 1008-1017.
WEI Guanju, HU Ran, LIAO Zhen, et al. Effects of wettability on displacement efficiency of two-phase flow in porous media [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(4): 1008-1017.
- [22] 陈绍杰,张继成, ZAKIMM, 等. 煤层气-水微尺度段塞流动规律相似试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(7): 1338-1346.
CHEN Shaojie, ZHANG Jicheng, ZAKIMM, et al. Similarity experimental study on the law of CBM-water microscale slug flow [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(7): 1338-1346.
- [23] 李俊键,苏航,姜汉桥,等. 微流控模型在油气田开发中的应用[J]. *石油科学通报*, 2018, 3(3): 284-301.
LI Junjian, SU Hang, JIANG Hanqiao, et al. Application of microfluidic models in oil and gas field development [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2018, 3(3): 284-301.
- [24] 吴丰,姚聪,丛林林,等. 岩石气水两相渗流的玻璃刻蚀驱替实验与有限元数值模拟对比[J]. *岩性油气藏*, 2019, 31(4): 121-132.
WU Feng, YAO Cong, CONG Linlin, et al. Comparison of glass etching displacement experiment and finite element numerical simulation for gas-water two-phase seepage in rocks [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2019, 31(4): 121-132.
- [25] ZHU Z W, LIU J J, LIU H J, et al. Numerical investigation of single- and two-phase flow in porous media with a bifurcated fracture [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(5): 052117.
- [26] ZHU Z W, SONG Z L, SHAO Z L, et al. Simulation of imbibition in porous media with a tree-shaped fracture following the level-set method [J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(8): 082109.
- [27] 张林峰,杨艳国,穆永亮,等. 基于气-水两相流的注热 CO₂ 增产 CH₄ 数值模拟研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(3): 115-128.
ZHANG Linfeng, YANG Yanguo, MU Yongliang, et al. Numerical study of heat injection CO₂ to increase CH₄ production based on gas-water two-phase flow [J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(3): 115-128.