



移动扫码阅读

段淑蕾, 李波波, 成巧耘, 等. 应力作用下含水煤岩渗透率及水膜动态演化机制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 91-100.

DUAN Shulei, LI Bobo, CHENG Qiaoyun, *et al.* Dynamic evolution mechanism of water-bearing coal permeability and water film under stress[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 91-100.

应力作用下含水煤岩渗透率及水膜动态演化机制

段淑蕾¹, 李波波^{1,2,3}, 成巧耘¹, 宋浩晟¹

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 喀斯特地区优势矿产资源高效利用国家地方联合工程实验室, 贵州 贵阳 550025;

3. 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为探究应力-吸附-水与滑脱效应多因素综合作用下煤岩渗透率演化机制, 考虑应力-吸附诱导煤岩变形的影响, 修正水膜厚度表达式, 并分析煤岩孔隙的动态变化。基于此, 进一步量化含水煤岩气体滑脱效应的强度, 建立考虑应力-吸附-水与滑脱效应多因素综合作用的煤岩渗透率模型。此外, 结合煤岩渗透率试验研究, 通过试验数据验证渗透率模型的可靠性, 以揭示应力-吸附-水多因素综合作用下煤岩渗透率、动态水膜及滑脱因子的演化机制。研究表明: 同一含水饱和度条件下, 煤岩渗透率随有效应力增大先急剧减小后趋于平缓; 同一有效应力条件下, 煤岩渗透率随含水饱和度增大逐渐减小。水膜厚度在应力-吸附-水作用下动态变化, 水膜厚度与应力、吸附呈负相关趋势, 而与含水饱和度呈正相关趋势; 随含水饱和度增大, 滑脱因子逐渐增大, 但在低应力条件下, 增大趋势平缓, 高应力条件下增大趋势急剧。此外, 基于气-液-固表面分离压, 推导应力-吸附作用下正方形、正三角形内动态水膜表达式, 并分析不同几何形态孔隙的煤岩渗透率、动态水膜及滑脱因子演化机制的差异。其中, 因角孔存在, 不同几何形态孔隙内水膜厚度从大至小排序为圆形、正方形、正三角形, 煤岩渗透率排序与其相反; 圆形孔隙内滑脱因子较含角孔隙更大, 而正方形与正三角形孔隙内滑脱因子差异较小。

关键词:煤岩; 动态水膜; 渗透率模型; 滑脱效应; 孔隙几何形态

中图分类号: TD713; TE37 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2023)06-0091-10

Dynamic evolution mechanism of water-bearing coal permeability and water film under stress

DUAN Shulei¹, LI Bobo^{1,2,3}, CHENG Qiaoyun¹, SONG Haosheng¹

(1. College of Mining, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. National & Local Joint Laboratory of Engineering for Effective Utilization of Regional Mineral Resources from Karst Area, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Non-metallic Mineral Resources, Guiyang 550025, China)

Abstract: To explore coal permeability evolution mechanism under the comprehensive action of multiple factors including stress - adsorption - water and slippage effect, considering the coal deformation induced by stress - adsorption, the expression of water film thickness was corrected to quantitatively characterize the effective pore size, and based on this, the intensity of gas slippage effect of water-bearing coal was further quantified and the permeability model was established under the comprehensive action of multiple factors. Combined with experimental research to verify the reliability of permeability model, and then the evolution mechanism of coal permeability, water film and slippage factors under the comprehensive action of multiple factors was further revealed. The results show that under different water saturation conditions, the permeability decreases sharply first and then tends to flat with the increase of effective stress; under the same effective stress condition, the permeability decreases with the increase of water saturation. The water film thickness changes dynamically under

收稿日期: 2022-06-08 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0493

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52064007); 贵州省科技厅-贵州大学科技合作计划资助项目(黔科合基础-ZK[2021]重点 052)

作者简介: 段淑蕾(1997—), 女, 河南濮阳人, 硕士研究生。E-mail: dsl199707@163.com

通讯作者: 李波波(1985—), 男, 贵州修文人, 教授, 博士。E-mail: bbli@gzu.edu.cn

the action of stress - adsorption - water, the water film thickness has a negative correlation with stress and adsorption, but a positive correlation with water saturation; the slippage factor increases gradually with the increase of water saturation, but the increase trend is gentle under low stress condition, and more sharply under high stress condition. In addition, based on the disjoining pressure of gas-liquid-solid surface, the expressions of dynamic water film in square and equilateral triangle under the effect of stress-adsorption were deduced, and the evolution mechanisms of gas permeability, water film and slip coefficient of pores with different geometric shapes are compared and analyzed. Due to the presence of corner holes, the order of water film thickness in pores of different geometric forms is circle > square > equilateral triangle from large to small, the order of permeability is opposite; the slippage factor in circular is larger than that in angular pore, while the slippage factor in square and equilateral triangle pore has little difference.

Key words: coal; dynamic water film; permeability model; slippage effect; pore geometry

0 引言

基于“30·60”双碳目标,我国清洁能源(煤层气)的供需关系发生转变^[1]。由于煤岩的低渗特性,可通过水力压裂技术提高气体抽采率,而返排过程中部分水滞留在孔喉处,气体解吸困难,造成“断气”现象。此外,抽采过程中的应力扰动使煤岩孔隙被压密,抑制气体渗流。为保证气体连续抽采,需探究应力-吸附-水多因素综合作用下气体运移规律,以期为提高煤层气抽采率提供理论价值。

原位煤层赋存环境复杂多变,为探究煤岩渗透率演化规律/机制,国内外学者针对不同因素展开多方位研究。煤岩长期受应力作用,导致孔裂隙压缩变形,对煤岩渗透率造成不可逆的伤害。赵岩龙等^[2]通过不同应力下煤岩渗流试验,发现煤岩渗透率随有效应力增大呈负指数降低。而ADHIKARY等^[3]发现应力变化的同时诱发煤-气间相互作用,气体出现吸附/解吸现象,煤基质产生膨胀/收缩变形。因此,外部应力与吸附作业均通过诱导煤岩变形降低煤岩渗透率。此外,在煤化过程中,煤岩内部赋存大量水分。而煤岩内水分在毛细管力作用下形成水膜,在低渗致密煤岩内水膜与孔隙有效渗流通道处于同一量级^[4],显著影响煤岩渗流特性。LI等^[4]认为水膜对煤岩渗透率的抑制作用分为2方面:①水分多以束缚水膜形式赋存于孔隙壁面,降低煤岩内气体有效渗流通道;②水膜以毛管水形式堵塞微小孔,降低煤岩内孔隙率。由此可知,应力、吸附变形改变孔隙有效孔径,同时影响水分在煤岩孔隙内的赋存形式。

随着浅部煤炭资源的逐渐枯竭,深部开采将成为我国煤炭资源开发的常态^[5]。深部煤岩孔隙结构复杂多样且微纳米孔占比较大。而微纳米孔内滑脱效应显著,并用滑脱因子量化其作用效果。GHANIZADEH等^[6]通过试验对比发现,含水煤岩的滑脱因子较干燥煤岩更高。经典Klinkenberg模型的建立基于多孔介质为圆形横截面的毛细血管束的假

设^[7],而对于以微/纳米孔隙为主的煤岩,其内部孔隙形状多样^[8],使用经典Klinkenberg模型无法准确描述不同孔隙几何形态对滑脱因子的作用。同时,WANG等^[9]发现煤岩内含有圆柱孔、狭缝孔、墨瓶形孔等各种几何形态的孔隙。而气体分子碰撞频率与孔隙横截面几何形态相关,需进一步拓展不同几何形态孔隙内滑脱因子及煤岩渗透率的研究。

综上所述,水膜在应力/吸附影响下的动态演化机制尚不清楚,含水煤岩渗透率演化机制有待进一步完善。鉴于此,将修正的水膜理论与毛细管模型相结合,建立考虑应力-吸附-水与滑脱效应多因素综合作用的煤岩渗透率模型,揭示应力-吸附作用下水膜动态演化机制,并进一步阐明煤岩渗透率及滑脱因子演化机制。笔者前期探究狭缝型煤岩渗透特性^[10],但未分析不同几何形态孔隙内水分对滑脱因子及渗透特性的影响,现基于气-液-固表面分离压,建立应力-吸附作用下正方形及正三角形孔隙内动态水膜表达式,拟开展不同几何形态孔隙的煤岩渗透率、滑脱因子演化机制差异性的研究,以期对深部煤层气抽采提供理论指导。

1 考虑应力-吸附-水及滑脱效应多因素综合作用的煤岩渗透率模型

由于煤岩结构复杂,建立理论模型基于如下假设:①煤岩为均匀且各向同性的弹性体;②煤岩孔隙均匀分布且孔径大小相等、长度一致;③孔隙内水膜连续并忽略水的重力影响。煤岩孔隙半径变化受多种因素共同影响,进一步改变煤岩渗透特性,图1为应力-吸附-水综合作用下煤岩孔隙有效孔径的动态变化过程。

煤岩受应力作用时,孔隙被压缩变形。同时,煤岩孔隙内赋存大量吸附气体使其产生膨胀变形,进一步减小煤岩孔隙的有效孔径。应力和气体吸附膨胀效应共同作用诱导煤岩变形,进一步改变孔隙体积,煤岩孔隙体积应变(设定压缩变形为正)可表

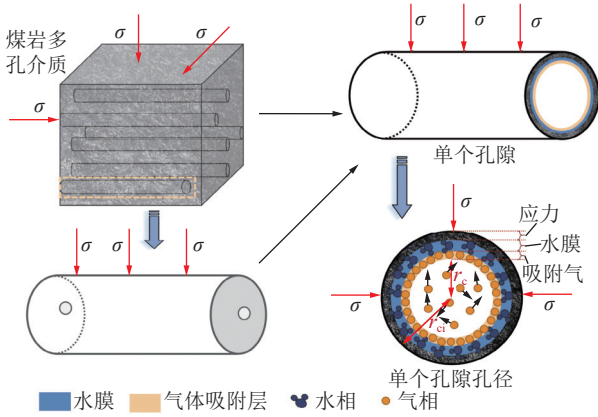


图1 圆形孔隙有效孔径变化示意(根据文献 [11] 修改)
Fig.1 Schematic diagram of effective aperture change of circular pores (Modified according to Reference [11])

述^[12]为

$$\frac{V_{Pe}}{V_0} = \frac{V_0 - \Delta V}{V_0} = 1 - \frac{\Delta V}{V_0} = 1 - \Delta \varepsilon_v = 1 - \frac{1}{K_p} (\Delta \sigma - \beta \Delta p) - \Delta \varepsilon_a \quad (1)$$

式中: V_{Pe} 为应力、气体吸附膨胀效应共同作用下孔隙体积, nm^3 ; ΔV 为应力、气体吸附膨胀效应共同作用下孔隙体积变化量, nm^3 ; V_0 为初始孔隙体积, nm^3 ; K_p 为孔隙体积模量, MPa ; $\Delta \sigma$ 为平均应力变化量, MPa ; β 为应力敏感系数, 在 $0 \sim 1$ 范围取值; Δp 为平均孔隙压力变化量, MPa ; $\Delta \varepsilon_v$ 为应力、气体吸附膨胀效应共同作用下煤岩体积应变变化量; $\Delta \varepsilon_a$ 为吸附膨胀效应诱导的体积应变变化量。

基于煤岩为均匀且各向同性的弹性体的假设, 各个方向上的有效应力变化诱导煤岩产生应变。同时, 基于 $1/K_p = C_p$ ^[13], 考虑应力作用下煤岩压缩性将逐渐发生变化, 故在此取平均压缩性系数 C_p , 则应力诱导煤岩体积应变变化量为

$$\Delta \varepsilon_c = C_p \Delta \sigma_c \quad (2)$$

式中: $\Delta \varepsilon_c$ 为应力诱导煤岩体积应变变化量; $\Delta \sigma_c$ 为有效应力变化量, MPa ; C_p 为孔隙平均可压缩性系数, 可表述^[14]为

$$C_p = C_0 \left(\frac{1 - e^{-\xi \Delta \sigma_c}}{\xi \Delta \sigma_c} \right) \quad (3)$$

式中: C_0 为孔隙初始压缩性系数, MPa^{-1} ; ξ 为无量纲系数。

煤层原位赋存环境富含地下水、倾入地表水及水力压裂后的滞留水, 而水分将抑制煤岩吸附气体的能力, 故引入随含水率变化的煤岩吸附能力折减系数 λ 对吸附变形量^[15]进行修正:

$$\Delta \varepsilon_a = \frac{3\rho_c RT V_L}{V_a E_A} \ln(1 + bp) \exp(-\lambda m) \quad (4)$$

式中: ρ_c 为煤岩体密度, g/cm^3 ; R 为理想气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, 取 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为温度, K ; V_L 为 Langmuir 体积, cm^3/g ; V_a 为理想气体摩尔体积, 取 $22.4 \text{ L}/\text{mol}$; E_A 为吸附模量, MPa ; b 为吸附常数, MPa^{-1} ; λ 为水分对煤岩吸附能力的折减系数; m 为含水率, %。

联立式 (2)—式 (4) 可得受应力和气体吸附膨胀效应共同作用下的煤岩体积应变变量:

$$C_0 \left(\frac{1 - e^{-\xi \Delta \sigma_c}}{\xi} \right) + \frac{3\rho_c RT V_L}{V_a E_A} \ln(1 + bp) \exp(-\lambda m) \quad (5)$$

由于孔径变化对多孔介质长度影响较小, 可忽略不计。基于煤岩孔隙的孔径大小相等、长度一致的假设, 煤岩孔隙体积的变化与多孔介质中孔隙横截面面积变化呈同比例关系:

$$\frac{V_{Pe}}{V_0} = \frac{r_{ce}^2}{r_{ci}^2} \quad (6)$$

式中: r_{ce} 为受应力和气体吸附膨胀效应共同作用下的煤岩孔隙孔径, nm ; r_{ci} 为孔隙初始孔径, nm 。

联立式 (1)、(5)、(6) 可得受应力和气体吸附膨胀效应共同作用下的煤岩孔隙孔径为

$$r_{ce} = r_{ci} \sqrt{1 - \Delta \varepsilon_v} = r_{ci} \sqrt{1 - C_0 \left(\frac{1 - e^{-\xi \Delta \sigma_c}}{\xi} \right) - \frac{3\rho_c RT V_L}{V_a E_A} \ln(1 + bp) \exp(-\lambda m)} \quad (7)$$

基于煤岩孔隙率定义, 联立式 (5)—式 (7) 可得应力和气体吸附膨胀效应共同作用下的煤岩孔隙率:

$$\varphi_{ce} = \varphi_{ci} \left(\frac{r_{ce}}{r_{ci}} \right)^2 = \varphi_{ci} (1 - \Delta \varepsilon_v) = \varphi_{ci} \left[1 - C_0 \left(\frac{1 - e^{-\xi \Delta \sigma_c}}{\xi} \right) - \frac{3\rho_c RT V_L}{V_a E_A} \ln(1 + bp) \exp(-\lambda m) \right] \quad (8)$$

式中: φ_{ce} 为应力和气体吸附膨胀效应共同作用下的煤岩孔隙率, %; φ_{ci} 为煤岩初始孔隙率, %。

原位煤储层条件下, 煤岩内部固有水分显著影响气体渗透特性。在多流体系统中, 水分较气体优先占据孔隙壁面有限的吸附位并形成水膜, 进一步减小孔隙孔径。基于孔隙均匀分布且孔隙内水膜连续的假设, 单个孔隙内的含水饱和度即为煤岩含水饱和度, 不同含水饱和度 S_w 与水膜厚度 h_{wc} 存在以下关系^[4]:

$$S_w = 1 - \left(1 - \frac{h_{wc}}{r_{ce}}\right)^2 \quad (9)$$

式中: h_{wc} 为含水饱和度 S_w 下受应力和气体吸附膨胀效应共同作用下孔隙内水膜厚度, nm。结合式 (7)、(9) 可将水膜厚度进一步表述为

$$h_{wc} = r_{ce} \left(1 - \sqrt{1 - S_w}\right) = r_{ci} \left(1 - \sqrt{1 - S_w}\right) \times \sqrt{1 - C_0 \left(\frac{1 - e^{-\xi \Delta \sigma_c}}{\xi}\right) - \frac{3\rho_c RT V_L}{V_a E_A} \ln(1 + bp) \exp(-\lambda m)} \quad (10)$$

因此, 应力、吸附和动态水膜共同作用下孔隙有效孔径可表述为

$$r_c = r_{ce} - h_{wc} = r_{ci} \sqrt{1 - S_w} \times \sqrt{1 - C_0 \left(\frac{1 - e^{-\xi \Delta \sigma_c}}{\xi}\right) - \frac{3\rho_c RT V_L}{V_a E_A} \ln(1 + bp) \exp(-\lambda m)} \quad (11)$$

式中: r_c 为应力、吸附和动态水膜共同作用下孔隙有效孔径, nm。

类比式 (8), 由式 (11) 孔隙半径的关系可进一步推导煤岩有效孔隙率:

$$\varphi_c = \varphi_{ci} (1 - \Delta \varepsilon_v) (1 - S_w) = \varphi_{ci} (1 - S_w) \left[\left[1 - C_0 \left(\frac{1 - e^{-\xi \Delta \sigma_c}}{\xi}\right) - \frac{3\rho_c RT V_L}{V_a E_A} \ln(1 + bp) \exp(-\lambda m) \right] \right] \quad (12)$$

式中: φ_c 为应力、吸附和动态水膜共同作用下煤岩有效孔隙率, %。

$$k_{app-cir} = \frac{\varphi_c r_c^2}{8\tau} \left(1 + \frac{4\eta\mu}{pr_c} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}}\right) =$$

$$\frac{\varphi_{ci} r_{ci}^2}{8\tau} \left[1 - C_0 \left(\frac{1 - e^{-\xi \Delta \sigma_c}}{\xi}\right) - \frac{3\rho_c RT V_L}{V_a E_A} \ln(1 + bp) \exp(-\lambda m) \right]^2 (1 - S_w)^2 \times \left\{ 1 + \frac{4\eta\mu}{r_{ci} p} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M(1 - S_w) \left[1 - C_0 \left(\frac{1 - e^{-\xi \Delta \sigma_c}}{\xi}\right) - \frac{3\rho_c RT V_L}{V_a E_A} \ln(1 + bp) \exp(-\lambda m) \right]}} \right\} \quad (16)$$

2 模型验证与分析

2.1 煤岩渗透率模型验证及演化机制分析

为验证模型的准确性, 选取山西沁水盆地榆社-武乡区块煤岩, 试验在同一入口孔隙压力(1.0、1.5、2.0 MPa)下, 改变应力(即轴压和围压), 含水煤岩渗透率试验数据如图 2 所示^[19]。其中, 由含水饱和度与含水率的转换关系^[20] 可得:

$$m = \frac{S_w \varphi_{ci} \rho_w}{\rho_c} \quad (17)$$

Kozeny-Carman(K-C) 方程普遍用于阐述圆形孔隙有效孔径、孔隙率与煤岩绝对渗透率的关系^[16], 基于此, 将考虑应力-吸附-水综合作用下的煤岩绝对渗透率表述为

$$k_{\infty-cir} = \frac{\varphi_c r_c^2}{8\tau} \quad (13)$$

式中: τ 为迂曲度, 基于孔隙为均匀的直管的假设, τ 取值 1。

在低渗煤层中, 气体滑移现象的存在有利于提高气体渗透率, 使大规模开发低渗透煤层成为可能, 从而研究气体滑移对低渗煤层渗透率的影响。考虑滑脱效应对煤岩绝对渗透率进行修正^[7], 即煤岩渗透率可表述为

$$k_{app-cir} = \frac{\varphi_c r_c^2}{8\tau} \left(1 + \frac{B_{cir}}{p}\right) \quad (14)$$

式中: 滑脱因子 B_{cir} 为量化滑脱效应程度的重要指标, 考虑应力-吸附-水综合作用下的煤岩动态滑脱因子 B_{cir} 可表述^[17] 为

$$B_{cir} = \frac{4\eta\mu}{r_c} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}} = \frac{4\eta\mu}{r_{ci}} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M(1 - S_w)(1 - \Delta \varepsilon_v)}} \quad (15)$$

式中: η 为无量纲比例系数, 通常称为 Adzumi 系数, 取 0.9^[18], μ 为气体动力黏度系数, 10^{-5} Pa·s; M 为气体分子量, g/mol。

联立式 (11)—式 (12)、式 (14)—式 (15) 可得煤岩渗透率为

$$k_{app-cir} = \frac{\varphi_c r_c^2}{8\tau} \left(1 + \frac{4\eta\mu}{pr_c} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}}\right) =$$

$$\frac{\varphi_{ci} r_{ci}^2}{8\tau} \left[1 - C_0 \left(\frac{1 - e^{-\xi \Delta \sigma_c}}{\xi}\right) - \frac{3\rho_c RT V_L}{V_a E_A} \ln(1 + bp) \exp(-\lambda m) \right]^2 (1 - S_w)^2 \times \left\{ 1 + \frac{4\eta\mu}{r_{ci} p} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M(1 - S_w) \left[1 - C_0 \left(\frac{1 - e^{-\xi \Delta \sigma_c}}{\xi}\right) - \frac{3\rho_c RT V_L}{V_a E_A} \ln(1 + bp) \exp(-\lambda m) \right]}} \right\} \quad (16)$$

式中: m 为含水率, %; ρ_w 为水的密度, g/cm³。

为验证模型可靠性, 将表 1 模型输入参数代入拟合方程, 运用 MATLAB 软件管理数据, 最终可得模型曲线如图 2 所示。其中, 表 1 为榆社-武乡区块煤样参数取值, 关于煤样性质的参数均根据该区块煤样的实际情况进行取值。

由图 2 可知, 煤岩渗透率变化存在应力敏感现象, 即同一含水饱和度条件下, 随有效应力增大呈指数减小, 先急剧减小后趋于平缓。究其原因: 应力加

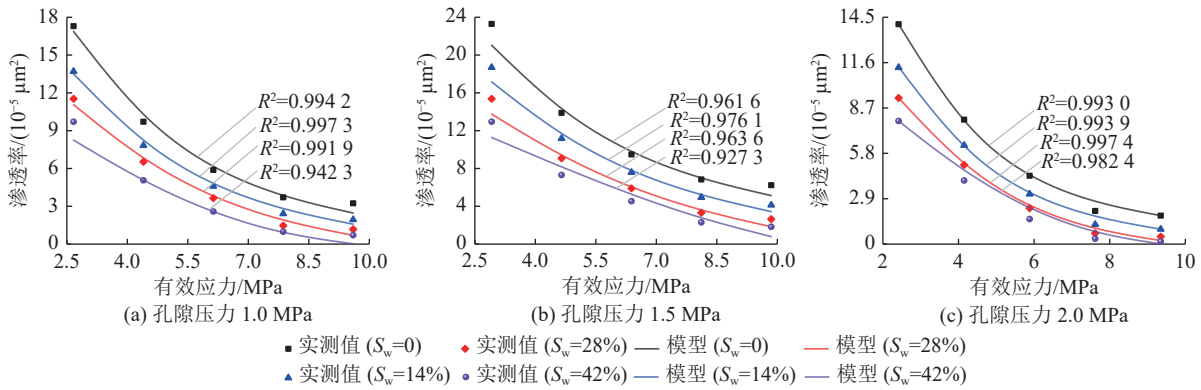


图 2 不同含水饱和度条件下煤岩渗透率随有效应力演化规律
Fig.2 Evolution of coal permeability with effective stress under different water saturation conditions

表 1 榆社-武乡区块煤样模型输入参数
Table 1 Model input parameters of coal samples in Yushe-Wuxiang Block

参数	取值	参数来源
T/K	293	[19]
$\mu/(10^{-5}Pa \cdot s)$	1.758	—
$R/(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$	8.314	—
$M/(g \cdot mol^{-1})$	14	—
$V_g/(L \cdot mol^{-1})$	22.4	—
E_d/MPa	1 900	[21]
b/MPa^{-1}	0.285 7	[22]
$V_L/(cm^3 \cdot g^{-1})$	26.62	[22]
λ	0.244	[15]
$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	1.46	[23]
φ_{ci}	0.123 4	[23-24]
$r_{cf}/\mu m$	0.144 93	[23, 25]

载前期,煤岩孔隙被压密,孔隙压缩性减小,气体有效渗流通道减小,导致渗透率急剧减小。应力加载后期煤岩孔隙压缩性趋于极限,此时,应力诱导煤岩体积变形造成渗透率减小趋势放缓。当煤岩孔隙压力恒定时,同一有效应力下煤岩渗透率的变化主要受含水饱和度的影响。以图 2a 为例,同一有效应力条件下,煤岩渗透率随含水饱和度增大逐渐减小。分析其原因可能是强极性水分子与煤岩内极性含氧官能团、无机质的结合力远高于气体与煤岩内有机质的结合力,分子间作用力的强弱决定孔隙壁面的吸附位更易被水分子占据,煤岩表面形成一定厚度的水膜。水膜占据气体有效渗流通道,煤岩渗透率随含水饱和度增大而减小。

2.2 应力和气体吸附综合作用下煤岩水膜厚度的动态演化机制

为探究应力-吸附共同影响下水膜的动态演化

机制,将孔隙压力 1.0 MPa 条件下的试验数据代入式 (10) 得到水膜厚度,如图 3 所示。

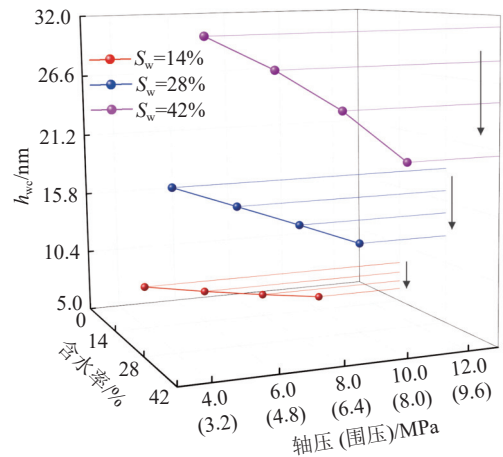


图 3 应力-水作用下动态水膜演化规律
Fig.3 Evolution of water film under stress - water action

由图 3 可知,在某一含水饱和度下,水膜厚度随应力增大而减小。究其原因:煤岩内水分赋存形式以吸附状态的水膜和游离水为主,且在边界条件稳定时两者达到动态平衡。而应力加载后,煤岩孔隙被压密,部分气体夹带游离水被排出^[26]。为达到新的动态平衡,吸附状态的水膜部分转化为游离水,导致水膜在应力作用下减小。同时,当含水饱和度从 14% 增大至 28%、42% 时,水膜厚度平均增大 1 倍、4 倍。由于水分子占据煤岩孔隙表面大量吸附位并形成水膜。在煤岩未达到含水饱和状态时,随煤岩内含水饱和度增大,孔隙空间内水分子富集,水膜厚度在分子间作用力影响下逐渐增大。在围压较小时,水膜厚度随含水饱和度增大的变化幅度较大。主要由于相同含水饱和度下,围压较小时对孔隙压密作用不明显,气体流动携带水分含量较少,此时含水饱和度和对水膜厚度的影响占主导地位。

2.3 应力作用下含水煤岩滑脱因子演化机制

笔者研究对象为沁水盆地榆社-武乡区块煤岩, 该区块煤岩发育稳定且埋藏较深。随埋深增大, 含水煤岩赋存的应力环境复杂且煤岩较为致密, 气体与孔隙壁面碰撞频率增加, 导致滑脱效应加剧^[27]。为进一步探究含水煤岩滑脱因子的演化机制, 基于动态水膜表达式(式(10)), 结合式(15)计算不同含水饱和度及应力条件下煤岩滑脱因子, 如图4、图5所示。

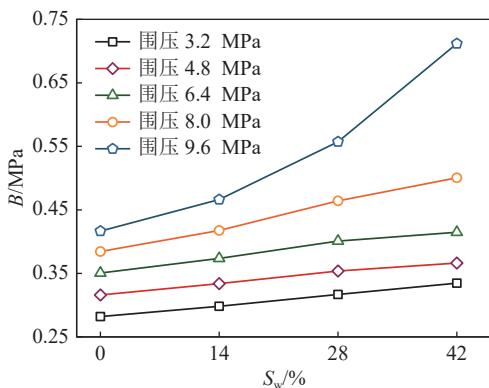


图4 不同应力条件下滑脱因子随含水饱和度演化规律

Fig.4 Evolution of slippage factor with water saturation under different stress conditions

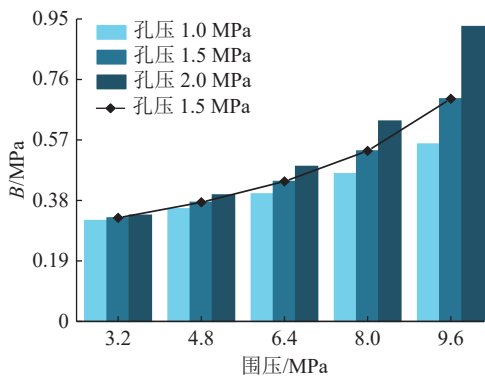


图5 不同孔隙压力条件下滑脱因子随应力演化规律

Fig.5 Evolution of slippage factor with stress under different pore pressure conditions

图4为孔隙压力1.0 MPa、不同应力条件下滑脱因子随含水饱和度演化规律, 着重从水膜角度揭示煤岩滑脱因子演化机制。由图4可知: 煤岩滑脱因子在低应力条件下随含水饱和度增大平缓增大, 而高应力条件下随含水饱和度增大急剧增大。究其原因: 滑脱因子是量化煤岩滑脱效应的重要指标, 而滑脱因子与孔隙有效孔径呈负相关关系^[27]。由2.2节可知, 水膜厚度随含水饱和度增大而增大, 水膜占据煤岩孔隙空间, 气体与孔隙壁面碰撞加剧, 煤岩滑脱效应显著即滑脱因子增大。而高应力条件下, 水膜

部分转化为游离水使其厚度减小, 孔隙有效孔径增大。同时, 水分降低煤岩强度, 高应力条件下孔隙被压缩变形, 孔隙有效孔径大幅度减小。因此, 在水膜和应力综合作用下, 有效孔径大幅度减小, 滑脱因子急剧增大。

图5为在含水饱和度为28%条件下, 滑脱因子随应力演化规律, 着重从孔隙压力、外应力角度揭示煤岩滑脱因子演化机制。由图5可知: 在孔隙压力1.5 MPa、含水饱和度28%条件下, 即孔隙压力、水分对煤岩滑脱因子的贡献相同, 此时滑脱因子仅随外应力增大而增大。究其原因: 外应力加载时, 煤岩孔隙被压密, 煤岩孔隙率、孔隙有效孔径均减小, 滑脱因子增大。而由图5柱状图可知: 每簇柱状图反映同一规律, 即同一外应力条件下, 滑脱因子随孔隙压力增大而增大。同时应注意, 随外应力增大, 滑脱因子随孔隙压力变化幅度增大, 即孔隙压力对滑脱效应的贡献增大。究其原因: 由式(4)可得随孔隙压力增大, 气体吸附膨胀效应诱导的变形量增大, 孔隙有效孔径减小, 滑脱因子增大。高应力条件下孔隙有效孔径较小, 孔隙压力增大过程中, 气体吸附膨胀效应对削减有效孔径的贡献相对增大, 导致滑脱因子在不同孔隙压力下产生巨大差异。

3 讨论

3.1 不同几何形态下煤岩渗透率模型及演化机制

煤岩内部孔隙几何形态复杂多样, 而圆形、正方形、正三角形孔隙属于其中三种较为典型的孔隙形状^[9]。与LI等研究类似^[28], 考虑气-液-固表面分离压, 但同时考虑应力-吸附作用下正方形、正三角形孔隙内水膜的动态变化, 初步探究不同几何形态孔隙的煤岩渗透率的差异。正方形及正三角形的孔隙有效孔径用其内切圆的有效孔径进行量化, 如图6所示。因此, 类比图1中呈现的 r_c , 将应力、吸附和动态水膜共同作用下正方形、正三角形孔隙有效孔

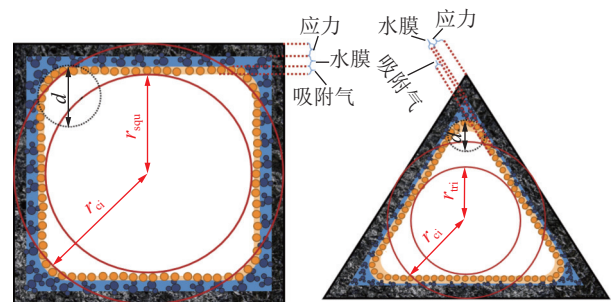


图6 正方形及正三角形孔隙有效孔径示意

Fig.6 Schematic diagram of effective pore radius of square and equilateral triangle

径分别定义为 r_{squ} 及 r_{tri} ，可由式(21)、(22)求解获取。类比图 1 中的圆形与图 6 中正方形了解，“应力”“水膜”“吸附气”分别代表不同因素对孔隙有效孔径的衰减量，即“应力压缩变形量”“水膜厚度”及“吸附变形量”。同时，结合不同公式可求解不同形态内孔隙各因素对孔隙有效孔径的衰减量。

基于煤岩为均匀且各向同性的弹性体的假设，同时理想化处理角孔处可能存在的应力集中现象，故正方形、正三角形的有效孔径与圆形类似，受应力和吸附膨胀效应整体均匀减小，此时干燥煤岩孔隙孔径同为 r_{ce} 。现定义正方形及正三角形孔隙的特征长度 (L) 均为干燥煤岩孔隙受应力和气体吸附膨胀效应共同作用后的有效直径，即 $L=2r_{\text{ce}}$ 。由于角孔处水-孔隙壁间表面张力与圆形孔隙有所差异，角孔处圆角滞留水导致含水饱和度与水膜 h 的关系发生变化。为描述含水角孔的截面形状，引入角孔气-水界面的无量纲参数 χ ，并将其定义为角孔气-水界面圆弧曲率半径 d 与 $L-2h$ 的比值，即 $\chi=d/(L-2h)$ 。当 χ 为 1 时，孔隙为圆形。

现基于含水饱和度定义，正方形及正三角形含水煤岩孔隙内含水饱和度与水膜的关系可表述为

$$S_w = 1 - \frac{\left(1 - \chi^2 + \frac{\pi}{4}\chi^2\right)(L - 2h_{\text{wsqu}})^2}{L^2} \quad (18)$$

$$S_w = 1 - \frac{\left(1 - \chi^2 + \frac{\pi}{3\sqrt{3}}\chi^2\right)(L - 2h_{\text{wtri}})^2}{L^2} \quad (19)$$

式中： h_{wsqu} 、 h_{wtri} 分别为含水饱和度 S_w 时，正方形孔隙、三角形孔隙内孔隙壁面水膜厚度，nm。

角孔内赋存滞留水，气相和体相之间的压差等于分离压 $\Delta P_{\text{flat}}(h)$ ^[28]。同时，因角孔处圆角滞留水比孔隙壁面处的水膜厚，故角处的表面力可以忽略不计。因此， $\Delta P_{\text{flat}}(h)$ 可表述^[28] 为

$$\Delta P_{\text{flat}}(h) = p_g - p_w = \frac{A_{\text{gws}}}{6\pi h_{\text{angular}}^3} = \frac{2\gamma_{\text{gw}}}{d} = \frac{2\gamma_{\text{gw}}}{\chi(L - 2h_{\text{angular}})} \quad (20)$$

式中： h_{angular} 为含角孔隙内的水膜厚度，对应正方形及正三角形孔隙内的水膜厚度，nm； A_{gws} 为气-液-固相的 Hamaker 常数，取 1.0×10^{-20} J； γ_{gw} 为气-水表面张力，取 72.5 N/m。

水膜作用后正方形及正三角形孔隙有效孔径可分别表述为

$$r_{\text{squ}} = r_{\text{ce}} - h_{\text{wsqu}} \quad (21)$$

$$r_{\text{tri}} = r_{\text{ce}} - h_{\text{wtri}} \quad (22)$$

故正方形及正三角形孔隙有效孔隙率表述为

$$\varphi_{\text{squ}} = \varphi_{\text{ce}} \left(r_{\text{squ}} / r_{\text{ce}} \right)^2 \quad (23)$$

$$\varphi_{\text{tri}} = \varphi_{\text{ce}} \left(r_{\text{tri}} / r_{\text{ce}} \right)^2 \quad (24)$$

因此，针对正方形及正三角形孔隙，考虑应力-吸附-水多因素综合作用的煤岩绝对渗透率表述为

$$k_{\infty\text{-squ}} = \frac{\varphi_{\text{squ}} r_{\text{squ}}^2}{7.113\tau} f_{\text{squ}}(\chi) \quad (25)$$

$$k_{\infty\text{-tri}} = \frac{\varphi_{\text{tri}} r_{\text{tri}}^2}{6.6665\tau} f_{\text{tri}}(\chi) \quad (26)$$

式中： $f(\chi)$ 描述角孔处形成的圆角滞留水对固有渗透率的影响，正方形孔及正三角形孔的系数 $f(\chi)$ 分别表述^[29] 为

$$f_{\text{squ}} = \left(\frac{4 - 4\chi^2 + \pi\chi^2}{4 - 4\chi + \pi\chi} \right)^2 \left[1 + \sum_{i=1}^5 (A_i \chi^i) \right]^{-1} \quad (27)$$

$$f_{\text{tri}} = \left(\frac{3\sqrt{3} - 3\sqrt{3}\chi^2 + \pi\chi^2}{3\sqrt{3} - 3\sqrt{3}\chi + \pi\chi} \right)^2 \left[1 + \sum_{i=1}^5 \left(B_i \left(\frac{\chi}{\sqrt{3}} \right)^i \right) \right]^{-1} \quad (28)$$

式中： A_i 、 B_i 为常数。

基于式(16)，正方形及正三角形孔隙内考虑滑脱效应的煤岩渗透率为

$$k_{\text{app-squ}} = \frac{\varphi_{\text{squ}} r_{\text{squ}}^2}{7.113\tau} f_{\text{squ}}(\chi) \left(1 + \frac{4c\mu}{pr_{\text{squ}}} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}} \right) \quad (29)$$

$$k_{\text{app-tri}} = \frac{\varphi_{\text{tri}} r_{\text{tri}}^2}{6.6665\tau} f_{\text{tri}}(\chi) \left(1 + \frac{4c\mu}{pr_{\text{tri}}} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}} \right) \quad (30)$$

其中，正方形及正三角形孔隙内滑脱因子可表述为

$$B_{\text{squ}} = \frac{4c\mu}{r_{\text{squ}}} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}} \quad (31)$$

$$B_{\text{tri}} = \frac{4c\mu}{r_{\text{tri}}} \sqrt{\frac{\pi RT}{2M}} \quad (32)$$

为探究不同几何形态下含水煤岩渗透率的差异，在单一变量条件下，即仅存在不同几何形态孔隙有效孔径的差异，对比不同几何形态孔隙的煤岩渗透率。将验证孔隙压力为 1.0 MPa 条件下，圆形孔隙煤岩渗透率模型的相关参数代入式(16)、(29)、(30)，进一步计算圆形、正方形及正三角形孔隙的煤岩渗透率模型，如图 7 所示。

由图 7 可知：在水分、应力综合作用下， $k_{\text{app-squ}}$ 、 $k_{\text{app-tri}}$ (正方形及正三角形孔隙的煤岩渗透率) 均比 $k_{\text{app-cir}}$ (圆形孔隙的煤岩渗透率) 大，且 $k_{\text{app-tri}}$ 最大。究其原因：由于正方形、正三角形存在角孔，在分离压与表面张力共同作用下，水分滞留角隅处，形成圆角滞留水，且圆角滞留水较孔隙壁面水膜更厚。因此，同一含水饱和度条件下，水膜对含角孔隙有效孔径

的削减程度较圆形孔更弱。此外,由于不同几何形态孔隙的可压缩性不同,正三角形稳定性较强,同一应力条件下,圆形及正方形较正三角形更易被压缩。同时角孔拐角分担应力,导致含角孔的压缩变形较小,故正方形及正三角形孔隙有效孔径较大,煤岩渗透能力较强。

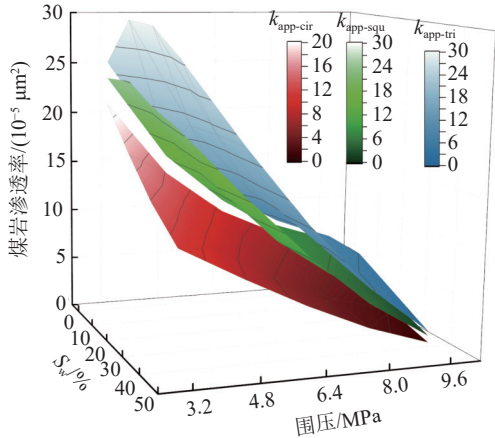


图7 不同几何形态孔隙的煤岩渗透率随应力-水演化规律
Fig.7 Evolution of coal permeability with stress- water in pore of different geometry

3.2 不同几何形态孔隙内水膜动态演化机制

不同几何形态孔隙有效孔径的差异源于孔隙内水分赋存形式不同,进一步导致煤岩渗透率及孔隙内滑脱因子的差异。因此,将相关参数代入式(10)、式(18)一式(20),计算结果如图8所示。

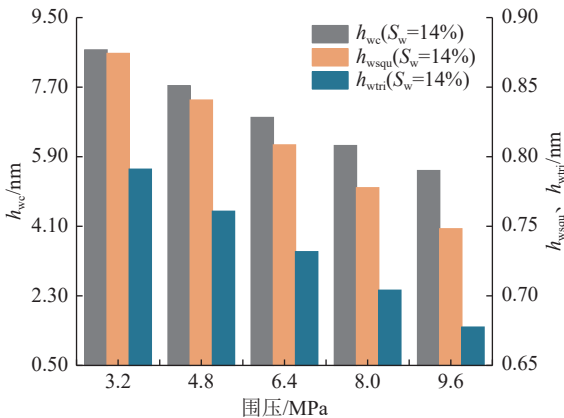


图8 不同几何形态孔隙内水膜厚度随应力-水演化规律
Fig.8 Evolution of water film thickness with stress- water in pore of different geometry

由图8可知:以孔隙压力1.0 MPa、含水饱和度为14%条件为例,不同几何形态孔隙内水膜厚度随应力、含水饱和度的演化规律一致,即圆形、正方形及正三角形孔隙内水膜厚度随含水饱和度增加而增加,随应力增加而减小。而值得注意的是,正方形、

三角形孔隙内水膜厚度较小,且与圆形差异较大,该规律与LI等^[28]研究结果保持一致。究其原因:一方面由于角孔的存在,水分子部分滞留角隅处,部分以水膜形式吸附在孔隙壁面,导致同一含水饱和度下,含角孔隙内水膜较小,有效孔径较大。因此,不同几何形态孔隙有效孔径从大至小顺序为三角形、正方形、圆形,而孔径大小直接决定煤岩渗透性强弱。由水膜厚度倒推煤岩渗透特性强弱排序为三角形、正方形、圆形,该结果与图7结论保持一致。另一方面,煤岩渗透率越小,微孔隙占比越大,煤岩孔隙表面对水分子束缚作用越强,导致水膜厚度越大。因此,由图7不同几何形态渗透特性强弱排序验证不同几何形态孔隙内水膜厚度排序的正确性。综上所述,不同几何形态孔隙的煤岩渗透特性与水膜演化规律可相互验证。

3.3 不同几何形态孔隙的煤岩滑脱因子演化机制

为探究不同几何形态孔隙内滑脱因子的演化机制,在孔隙压力为1.0 MPa、含水饱和度为28%条件下,滑脱因子随应力变化规律如图9所示。

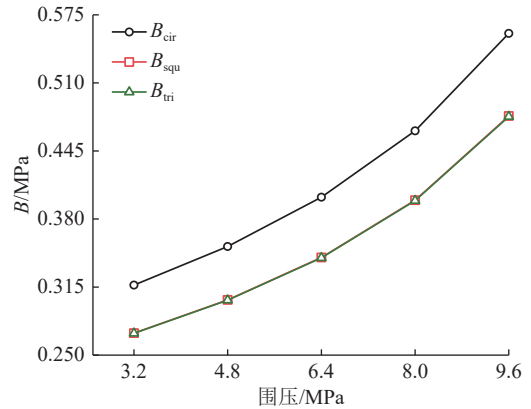


图9 不同几何形态孔隙内滑脱因子随应力演化规律
Fig.9 Evolution of slippage factor with stress in pore of different geometry

由图9可知:圆形孔隙与含角孔隙内滑脱因子均随应力增大而增大,两者差异显著,但正方形与正三角形孔隙内滑脱因子差异较小。究其原因:随应力加载,煤岩孔隙被压密,孔隙有效孔径减小,导致气体与孔隙壁面碰撞频率增加、滑脱因子增大^[27]。从水膜角度分析,由3.2节可知,含角孔隙与圆形孔隙内水膜厚度差异较大,而水膜进一步影响孔隙有效孔径,故圆形孔隙内有效孔径与含角孔隙有效孔径的差异进一步增大,导致圆形孔隙内滑脱因子较含角孔隙更大。同时,由3.1、3.2节可知,含角孔隙受应力作用机制相似,且含角孔隙内水膜厚度差异

不明显, 导致正方形与正三角形孔隙内滑脱因子间差异在 10^{-3} 量级左右, 可以忽略不计。

4 结 论

1) 同一含水饱和度条件下, 含水煤岩渗透率随有效应力增大先急剧减小后趋于平缓, 整体呈指数形式减小; 同一有效应力条件下, 含水煤岩渗透率随含水饱和度增大逐渐减小。

2) 水膜厚度随含水饱和度增大而增大; 随应力增大而减小, 同时气体吸附作用间接减小水膜厚度。随含水饱和度增大, 煤岩滑脱因子增大, 但在低应力条件下平缓增大, 在高应力条件下急剧增大。

3) 基于对角孔应力变形理想化处理, 不同几何形态孔隙内水膜厚度从大至小排序为: 圆形>正方形>正三角形。而不同几何形态孔隙内煤岩渗透率与水膜厚度排序相反, 同时圆形孔隙内滑脱因子较含角孔隙更大, 且两者差异明显, 而正方形与正三角形孔隙内滑脱因子间差异较小。

4) 基于水膜理论, 构建考虑应力-吸附-水及滑脱效应多因素综合作用的煤岩渗透率模型, 并运用试验数据验证其可靠性。基于此, 构建不同几何形态孔隙的煤岩渗透率模型, 为今后进一步探究孔隙几何形态相关理论奠定基础。

参考文献(References):

- [1] 王国法, 任世华, 庞义辉, 等. 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. 煤炭学报技术, 2021, 49(9): 1-8.
WANG Guofa, REN Shihua, PANG Yihui, *et al.* Development achievements of China's coal industry during 13 th Five-Year Plan period and future prospects[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 1-8.
- [2] 赵岩龙, 辛晓霖, 汪志明. 滇东黔西地区煤岩裂隙渗透率应力敏感性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 213-218.
ZHAO Yanlong, XIN Xiaolin, WANG Zhiming. Experimental study on stress sensitivity of coal and rock fracture permeability in eastern Yunnan and western Guizhou[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 213-218.
- [3] ADHIKARY D P, GUO H. Measurement of longwall mining induced strata permeability[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2014, 32(3): 617-626.
- [4] LI J, LI X F, WU K L, *et al.* Thickness and stability of water film confined inside nanoslits and nanocapillaries of shale and clay[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 179: 253-268.
- [5] 张建国, 王满, 张国川, 等. 平顶山矿区深部动力灾害防治与资源绿色开采[J]. 煤炭学报技术, 2023, 51(1): 295-303.
ZHANG Jianguo, WANG Man, ZHANG Guochuan, *et al.* Prevention and control of deep dynamic disasters and resources green exploitation in Pingdingshan Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 295-303.
- [6] GHANIZADEH A, GASPARIK M, AMANN H A, *et al.* Experimental study of fluid transport processes in the matrix system of the European organic-rich shales: II. Posidonia Shale(Lower Toarcian, northern Germany)[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 123: 20-33.
- [7] KLINKRNBERG L J. The permeability of porous media to liquids and gases[J]. *API Drilling and Production Practice*, 1941, 23(2): 200-213.
- [8] AFSHARPOOR A, JAVADPOUR F. Liquid slip flow in a network of shale noncircular nanopores[J]. *Fuel*, 2016, 180: 580-590.
- [9] WANG X L, PAN J N, WANG K, *et al.* Characterizing the shape, size, and distribution heterogeneity of pore-fractures in high rank coal based on X-ray CT image analysis and mercury intrusion porosimetry[J]. *Fuel*, 2020, 282: 118754.
- [10] 段淑蕾, 李波波, 李建华, 等. 含水煤岩渗透率演化规律及动态滑脱效应的作用机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(4): 798-808.
DUAN Shulei, LI Bobo, LI Jianhua, *et al.* Permeability evolution of water-bearing coal considering dynamic slippage effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(4): 798-808.
- [11] ZHU S Y, DU Z M, LI C L, *et al.* A semi-analytical model for pressure-dependent permeability of tight sandstone reservoirs[J]. *Transport in Porous Media*, 2018, 122(2): 235-252.
- [12] ROBERTSON E P, CHRISTIANSEN R L. A permeability model for coal and other fractured, sorptive-elastic media[C]//SPE Eastern Regional Meeting, OnePetro, 2006.
- [13] LIU S M, HARPALANI S. A new theoretical approach to model sorption-induced coal shrinkage or swelling[J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(7): 1033-1049.
- [14] HOU X, ZHU Y, WANG Y, *et al.* Experimental study of the interplay between pore system and permeability using pore compressibility for high rank coal reservoirs[J]. *Fuel*, 2019, 254: 115712.
- [15] CHEN D, PAN Z, LIU J, *et al.* Modeling and simulation of moisture effect on gas storage and transport in coal seams[J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(3): 1695-1706.
- [16] 尧春洪, 李波波, 高政, 等. 孔隙压力升降条件下煤岩双孔隙渗透率模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(11): 116-121.
YAO Chunhong, LI Bobo, GAO Zheng, *et al.* Study on dual pore permeability model of coal under the conditions of pore pressure increasing and decreasing[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 116-121.
- [17] CHAPMAN S, COWLING T G. The mathematical theory of non-uniform gases: an account of the kinetic theory of viscosity, thermal conduction and diffusion in gases[M]. Cambridge University Press, 1990.
- [18] ADZUMI H. Studies on the flow of gaseous mixtures through capillaries. III. The flow of gaseous mixtures at medium pressures[J]. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 1937, 12(6): 292-303.
- [19] 蒲钰昕, 赵东, 蔡婷婷, 等. 不同煤岩组合渗透率的影响因素

- 试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(12): 88-98.
- PU Yuxin, ZHAO Dong, CAI Tingting, *et al.* experimental research on influence factors of permeability of different coal-rock combinations[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(12): 88-98.
- [20] REN W, GUO J, ZENG F, *et al.* Modeling of high-pressure methane adsorption on wet shales[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(8): 7043-7051.
- [21] MAGGS F A P. The adsorption-swelling of several carbonaceous solids[J]. *Transactions of the Faraday Society*, 1946, 42: B284-B288.
- [22] MENG Y, LI Z. Triaxial experiments on adsorption deformation and permeability of different sorbing gases in anthracite coal[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 46: 59-70.
- [23] 郑贵强. 不同煤阶煤的吸附、扩散及渗流特征实验和模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- ZHENG Guiqiang. Experimental and simulation study on the sorption, diffusion and seepage characters in different-ranked coals[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [24] 屈晓荣, 朱炎铭, 张庆辉. 海陆过渡相煤系非常规天然气储层特征及其探共采浅析-以榆社-武乡区块为例[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(3): 1-8.
- QU Xiaorong, ZHU Yanming, ZHANG Qinghui. Reservoir characteristics and co-exploration and concurrent production analysis of unconventional natural gases in transitional facies coal measures: taking yushe-wuxiang block as an example[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2017, 32(3): 1-8.
- [25] 郭慧, 王延斌, 张崇崇, 等. 注CO₂对不同煤阶煤储层渗透率变化的影响[J]. 科技导报, 2016, 34(7): 129-133.
- GUO Hui, WANG Yanbin, ZHANG Chongchong, *et al.* Permeability of different rank coals by injecting carbon dioxide[J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34(7): 129-133.
- [26] TENG T, WANG J G, GAO F, *et al.* Impact of water film evaporation on gas transport property in fractured wet coal seams[J]. *Transport in Porous Media*, 2016, 113(2): 357-382.
- [27] 王环玲, 徐卫亚, 巢志明, 等. 致密岩石气体渗流滑脱效应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 777-785.
- WANG Huanling, XU Weiya, CHAO Zhiming, *et al.* Experimental study on slippage effects of gas flow in compact rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(5): 777-785.
- [28] LI J, CHEN Z, WU K L, *et al.* Effect of water saturation on gas slippage in circular and angular pores[J]. *AIChE Journal*, 2018, 64(9): 3529-3541.
- [29] RAY S, MISRA D. Laminar fully developed flow through square and equilateral triangular ducts with rounded corners subjected to H1 and H2 boundary conditions[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, 49(9): 1763-1775.