

基于体积应变的煤体渗透率模型及影响参数分析

王伟¹, 余金昊¹, 方志明², 李小春², 李琦², 陈向军³, 王亮⁴

(1. 河南大学 土木建筑学院, 河南 开封 475004; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 河南理工大学 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室—省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454000; 4. 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为研究瓦斯压力变化过程中渗透率演化规律, 基于煤体代表性单元体 (REV) 细观尺度参数与体积应变关联特征推导了4种不同形式渗透率模型。利用实验数据对模型进行了可靠性验证, 分析了有效应力引起的应变和吸附应变的变化规律, 并与经典渗透率模型 (P-M 模型、S-D 模型、CONNELL 模型) 进行对比验证。讨论了模型参数的敏感性, 明确了 REV 细观尺度参数与裂隙率、渗透率的相关关系, 并分析了吸附应变系数影响机理, 进而对国内主要矿井渗透率极值压力进行了研究。结果表明: 基于 REV 体积应变与 REV 裂隙体积应变的4种渗透率模型, 其 REV 体积应变与 REV 裂隙体积应变线性相关, 相关系数为初始裂隙率; 体积模量与吸附应变系数分别控制有效应力和吸附应变对渗透率的影响; 恒定围压、恒定孔压、恒定差压3种实验条件下, 相比经典渗透率模型, 4种渗透率模型对实验数据都有较好的匹配效果, 但双参数拟合 (体积模量与吸附应变系数) 相比单参数拟合 (吸附应变系数), 参数的拟合误差较大, 由参数敏感性分析可知, 当参数变化时 (<10%) 渗透率预测结果相比真实值也有较大偏差; 以沁水盆地为例, 计算的煤体 REV 细观尺度参数 a_0 、 b_0 范围分别为 $1.73 \sim 46.31 \mu\text{m}$ 和 $0.06 \sim 0.49 \mu\text{m}$; 恒定围压与恒定差压条件下, 吸附应变系数与差压大小、气体类型及初始裂隙率有关; 国内主要矿井 CO_2 极值压力在 $0.94 \sim 5.33 \text{ MPa}$, CH_4 极值压力在 $1.06 \sim 6.94 \text{ MPa}$ 。

关键词: 渗透率; 表征单元体; 多实验条件模型; 参数敏感性; 吸附应变系数

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)06-2741-16

Analysis of coal permeability model and influencing parameters based on volume strain

WANG Wei¹, YU Jinhao¹, FANG Zhiming², LI Xiaochun², LI Qi², CHEN Xiangjun³, WANG Liang⁴

(1. School of Civil Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 4. Key Laboratory of Gas and Fire Control for Coal Mines (China University of Mining and Technology), Ministry of Education, Xuzhou 221116, China)

Abstract: To investigate the evolution of coal permeability during the process of gas pressure change, four different forms of permeability models were derived based on the correlation between mesoscale parameters of coal representative elementary volume (REV) and strain-related characteristics. The reliability of the models was verified using experimental

收稿日期: 2023-05-26 修回日期: 2023-11-06 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0652

基金项目: 内蒙古自治区科技厅中央引导地方科技发展资金资助项目 (2022ZY0018); 河南省青年基金资助项目 (242300420594)

作者简介: 王伟 (1989—), 男, 河南信阳人, 讲师, 硕士生导师。E-mail: wangwei581@sina.cn

通讯作者: 王亮 (1982—), 男, 江苏连云港人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: liangw1982@126.com

引用格式: 王伟, 余金昊, 方志明, 等. 基于体积应变的煤体渗透率模型及影响参数分析[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2741-2756.

WANG Wei, YU Jinhao, FANG Zhiming, et al. Analysis of coal permeability model and influencing parameters based on volume strain[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2741-2756.



移动阅读

data, and the variation law of strain caused by effective stress and adsorption strain was analyzed and compared with classical permeability models (P-M model, S-D model, Connell model). The sensitivity of model parameters was discussed, the relationship between REV mesoscale parameters and fracture porosity and permeability was clarified, and the influence mechanism of adsorption strain coefficient was analyzed. Furthermore, the extreme values of permeability of major coal mines in China were studied. Results show that for the four permeability models derived in this paper, the REV volume strain satisfies a linear relationship with its fracture volume strain, and the correlation coefficient is the initial fracture porosity. The bulk modulus and adsorption strain coefficient control the influence of effective stress and adsorption strain on permeability, respectively. Under three different experimental conditions of constant confining pressure, constant pore pressure, and constant differential pressure, the four permeability models have shown a better matching effect on the experimental data compared with the classical permeability models. However, compared with single-parameter fitting, the parameter error in the double-parameter fitting (bulk modulus and adsorption strain coefficient) is larger. From the sensitivity analysis of parameters, it is observed that when the parameters change within 10%, the predicted permeability deviates significantly from the true value. Therefore, for the double or multiple-parameter fitting of permeability models, the parameter fitting errors could lead to serious distortion of the predicted permeability results. Taking the experimental data of coal samples from the Qinshui Basin as an example, the mesoscopic scale parameters a_0 and b_0 of REV were calculated to range from 1.73 to 46.31 μm and from 0.06 to 0.49 μm , respectively. Under constant confining pressure and constant differential pressure conditions, the adsorption strain coefficient was related to differential pressure, gas types, and initial fracture porosity. Furthermore, the extreme values of CO_2 gas and CH_4 gas in major coal mines in China are within the ranges of 0.94–5.33 MPa and 1.06–6.94 MPa, respectively.

Key words: permeability; REV; multi-experimental condition model; parameter sensitivity; adsorption strain coefficient

煤炭是我国的主导能源, 瓦斯作为煤的伴生产物, 是一种宝贵的不可再生资源^[1-2]。我国煤层瓦斯含量丰富, 据国土资源部报告, 我国 2 000 m 以浅的煤层瓦斯储量超过 30 万亿 m^3 , 技术可采量超过 10 万亿 m^3 ^[3]。煤层气开采兼具煤矿安全、能源利用、环境友好三大属性^[4], 然而, 我国复杂的地质环境和资源储藏情况使得煤层瓦斯抽采面临“抽采效率低、抽采难度大、抽采集中度差”等困难^[5]。渗透率是影响瓦斯抽采的核心要素, 因此研究煤体渗透率、预测渗透率演化规律具有重要意义, 还可为提高煤层气抽采率提供理论指导。

煤体渗流特性直接影响瓦斯抽采效率, 其演化规律依靠有效应力和吸附应变来表征^[6]。在有效应力对渗透率的影响方面, MENG^[7]、马如英^[8]、WANG^[9]等发现随有效应力增加, 煤体渗透率以负指数规律减小; 刘帅帅等^[10]探究有效应力对煤储层不同方向渗透率的影响, 发现渗透率随有效应力增加均呈现幂指数降低的趋势。在吸附应变对渗透率的影响方面, LEVINE^[11]通过吸附实验首次发现孔隙压力与煤吸附甲烷后基质膨胀体积满足 Langmuir 方程, 孟雅^[12]、祝捷^[13]等的研究进一步验证这一观点。现有很多渗透率模型在考虑基质收缩效应对渗透率影响时, 通常认为煤体吸附引起的变形完全等同于裂隙变形, 这就使得研究吸附应变对渗透率的影响时, 结果可能不够准确。LIU^[14]、GUO^[15]等认为只有部分吸附应变会对裂隙宽

度造成影响, 并引入内膨胀因子的概念描述吸附对裂隙变形的影响, 但渗透率模型系数关系不明确, 且系数的影响机制未深入讨论。在渗透率模型的研究方面, 荣腾龙等^[16]基于 D-P 损伤本构关系得到指数型和立方型渗透率模型; 赵家巍等^[17]借助分数阶导数, 基于现有应力-渗透率模型提出双参数分数阶模型; WANG 等^[18]基于有效应力原理和双应变弹簧模型建立了一种可变裂隙宽度和 Klinkenberg 系数的渗透率模型; 贾荔丹等^[19]考虑温度对渗透率的影响, 建立了一个包含有效应力、吸附应变、热裂和热膨胀 4 种影响因素的渗透率模型。目前的渗透率模型较多且推导过程过于复杂, 基质与裂隙几何尺度关系也不清晰。在恒定孔压与恒定差压条件下的实验研究方面, 王伟等^[20]对恒定孔压和恒定差压 2 种条件下的煤样渗透率变化规律进行研究; FANG 等^[21]应用瞬态法测定了 CH_4 、 CO_2 和 N_2 在恒定差压条件下的渗透率, 发现渗透率均随气体压力的增加而减小; LIU 等^[22]推导适用于恒定孔压和恒定差压条件下的渗透率模型, 并将其与实验数据匹配, 得出拟合参数。开展不同实验条件下模型和渗透率实验数据的拟合工作, 对模型的关键参数和适用性进行全面分析具有重要意义。在渗透率极值的研究方面, 最早 SHI 和 DURUCAN^[23]把渗透率在降压过程中回弹的点对应的气体压力称之为反弹压力; CONNELL^[24]、TANG 等^[25]对恒定外应力条

件下气体压力对应的渗透率极值进行研究;祝捷等^[26]对渗透率极值点进行研究,发现渗透率变化趋势取决于实验气体压力和反弹气体压力之间的关系。综上所述,对于现有渗透率模型的研究,一是煤体细观尺度参数与煤体体积应变相关关系不清晰;二是渗透率模型的系数关系不明确,且系数的影响机制未深入讨论,此外对国内主要矿井渗透率极值研究也较少。

笔者以煤表征单元体 (REV) 概念模型为基础,依据煤体的 REV 细观尺度参数的几何关系推导不同形式的煤体渗透率模型。首先,结合实验数据和经典渗透率模型进行对比分析,验证其准确性。其次,在定孔压和恒定差压条件下开展所提模型和 CONNELL 模型对比验证,证明其适用性。最后,分析渗透率模型参数的敏感性,研究 REV 细观尺度参数与裂隙率、渗透率相关关系,探究吸附应变系数影响机制,并确定国内主要矿井渗透率极值,相关研究可为煤矿瓦斯防治工作提供理论指导。

1 煤体渗透率模型

1.1 煤体 REV 几何模型

煤体是由蕴含大量微孔的基质和裂隙所组成的双重孔隙结构,根据煤的“立方体”模型^[27],孔隙系统由基质体和基质体内的孔隙构成,基质体由裂隙包裹。图1为煤的立方体概念模型,其中图1(a)为立方体几何模型,图1(b)为 REV 截面,其基质长 a_m ,裂隙宽度为 b_f 。

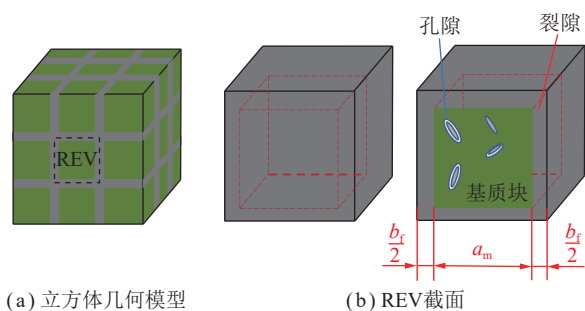


图1 煤的立方体概念模型

Fig.1 Cubic concept model of coal

基于煤立方体几何模型,煤体渗透率与裂隙率满足立方定律^[18,22,24,27-29]

$$\frac{k_f}{k_{f0}} = \left(\frac{\phi_f}{\phi_{f0}} \right)^3 \quad (1)$$

$$\frac{k_f}{k_{f0}} = \left(\frac{b_f}{b_{f0}} \right)^3 \quad (2)$$

式中, k_f 为煤体渗透率; ϕ_f 为裂隙率; 下标 0 表示初始状态。

1.2 基于 REV 体积应变的渗透率模型

依据 REV 几何模型,煤体裂隙率可表示为

$$\phi_f = 1 - \frac{a_m^3}{(a_m + b_f)^3} \quad (3)$$

进而可确定基质与裂隙宽度随裂隙率变化的相关关系

$$\frac{b_f}{a_m} = \frac{1}{\sqrt[3]{1 - \phi_f}} - 1 \quad (4)$$

煤体 REV 体积应变可表示为

$$\varepsilon_V = \frac{(a_m + b_f)^3}{(a_{m0} + b_{f0})^3} - 1 \quad (5)$$

结合式 (4) 与式 (5) 得到 REV 体积应变 2 种表达达式:

$$\varepsilon_V = \frac{1 - \phi_{f0}}{1 - \phi_f} \left(\frac{a_m}{a_{m0}} \right)^3 - 1 \quad (6)$$

$$\varepsilon_V = \left(\frac{b_f}{b_{f0}} \right)^3 \left(\frac{1 - \sqrt[3]{1 - \phi_{f0}}}{1 - \sqrt[3]{1 - \phi_f}} \right)^3 - 1 \quad (7)$$

假设基质宽度在煤层气开采过程中保持不变,即 $a_m = a_{m0}$ ^[27,30],该假设等同于 REV 基质体积应变为 0,由此可知,REV 体积应变与其裂隙体积应变相关关系必然得以简化。该假设条件下,由式 (6) 可得基于 REV 体积应变的裂隙率为

$$\phi_f = \frac{\varepsilon_V + \phi_{f0}}{1 + \varepsilon_V} \quad (8)$$

结合式 (1) 与式 (8) 可得基于 REV 体积应变的渗透率表达式,为后续区分不同的渗透率表达式,REV 体积应变、REV 裂隙体积应变作自变量的表达式分别用 V 、 f 区分,而基于式 (1)、(2) 得到的表达式分别用 ϕ 、 b 区分,故该表达式可记作 $k_{V\phi}$ 模型,即

$$\frac{k_{V\phi}}{k_{V\phi0}} = \left[\frac{\varepsilon_V + \phi_{f0}}{\phi_{f0}(1 + \varepsilon_V)} \right]^3 \quad (9)$$

结合式 (2) 与式 (7) 可得基于 REV 体积应变的渗透率 (k_{Vb} 模型) 表达式为

$$\frac{k_{Vb}}{k_{Vb0}} = \left(\frac{1 - \sqrt[3]{1 - \phi_{f0}}}{1 - \sqrt[3]{1 - \phi_f}} \right)^3 (1 + \varepsilon_V) \quad (10)$$

1.3 基于 REV 裂隙体积应变的渗透率模型

根据几何关系,REV 裂隙体积应变为

$$\varepsilon_{Vb} = \frac{(a_m + b_f)^3 - a_m^3}{(a_{m0} + b_{f0})^3 - a_{m0}^3} - 1 \quad (11)$$

结合式 (11) 与式 (4), REV 裂隙体积应变可写作如下 2 种形式:

$$\varepsilon_{vb} = \left(\frac{a_m}{a_{m0}} \right)^3 \frac{\phi_f}{\phi_{f0}} \frac{1 - \phi_{f0}}{1 - \phi_f} - 1 \quad (12)$$

$$\varepsilon_{vb} = \left(\frac{b_f}{b_{f0}} \right)^3 \frac{\phi_f}{\phi_{f0}} \left(\frac{1 - \sqrt[3]{1 - \phi_{f0}}}{1 - \sqrt[3]{1 - \phi_f}} \right)^3 - 1 \quad (13)$$

根据式 (12) 可得基于 REV 裂隙体积应变的裂隙率为

$$\phi_f = \frac{\phi_{f0}(1 + \varepsilon_{vb})}{\phi_{f0}\varepsilon_{vb} + 1} \quad (14)$$

结合式 (1) 与式 (14) 可得基于 REV 裂隙体积应变的渗透率 ($k_{f\phi}$ 模型) 表达式为

$$\frac{k_{f\phi}}{k_{f\phi 0}} = \left(\frac{1 + \varepsilon_{vb}}{\phi_{f0}\varepsilon_{vb} + 1} \right)^3 \quad (15)$$

结合式 (2) 与式 (13) 可得基于 REV 裂隙体积应变的渗透率 (k_{fb} 模型) 表达式为

$$\frac{k_{fb}}{k_{fb 0}} = \left(\frac{1 - \sqrt[3]{1 - \phi_f}}{1 - \sqrt[3]{1 - \phi_{f0}}} \right)^3 \frac{\phi_{f0}}{\phi_f} (1 + \varepsilon_{vb}) \quad (16)$$

1.4 体积应变与有效应力、吸附应变联系

根据式 (8) 与式 (14), 可得

$$\varepsilon_v = \phi_{f0}\varepsilon_{vb} \quad (17)$$

式 (17) 展示了 REV 体积应变与其裂隙体积应变呈线性关系, 很明显正是上述 $a_m = a_{m0}$ 假设, 使得这一简化的应变关系成立。

按照弹性力学约定, 以拉应力为正, 压应力为负。煤体 REV 有效应力变化量为

$$\Delta\sigma_e = \alpha p - p_f - (\alpha p_0 - p_{f0}) \quad (18)$$

式中, α 为 Biot 系数; p_f 为围岩应力; p 为孔压。

煤孔隙内瓦斯吸附/解吸会引起煤体膨胀/收缩。瓦斯吸附引起的煤体积应变一般常用 Langmuir 型经验关系式表征, 煤体吸附应变变化量^[22]为

$$\Delta\varepsilon_s = b\varepsilon_L \left(\frac{p}{1 + bp} - \frac{p_0}{1 + bp_0} \right) \quad (19)$$

式中, b 为 Langmuir 压力常数, $b = 1/p_L$, p_L 为最大吸附应变 1/2 时对应的孔隙压力; ε_L 为 Langmuir 最大吸附应变。

根据弹性力学理论, 煤体 REV 体积应变与有效应力 $\Delta\sigma_e$ 、吸附应变 $\Delta\varepsilon_s$ 关系如下

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta\sigma_e}{K} - f_v\Delta\varepsilon_s \quad (20)$$

式中, K 为体积模量; f_v 为吸附应变系数。

煤体 REV 裂隙体积应变可表示为

$$\varepsilon_{vb} = \frac{\Delta\sigma_e}{K_f} - f_{vb}\Delta\varepsilon_s \quad (21)$$

式中, K_f 为裂隙体积模量; f_{vb} 为裂隙吸附应变系数。

将式 (20) 与式 (21) 代入式 (17) 中, 可得体积应变的系数关系为

$$K = \frac{K_f}{\phi_{f0}} \quad (22)$$

$$f_v = \phi_{f0}f_{vb} \quad (23)$$

1.5 煤体渗透率模型

结合式 (9)、(10) 与式 (18)~(20) 可得适用于恒定围压条件下基于 REV 体积应变 ($k_{v\phi}$ 模型、 k_{vb} 模型) 渗透率表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{k_{v\phi}}{k_{v\phi 0}} &= \left\{ \frac{\frac{\alpha(p-p_0)}{K} - f_v\varepsilon_L b \left(\frac{p}{1+bp} - \frac{p_0}{1+bp_0} \right) + \phi_{f0}}{\phi_{f0} \left[1 + \frac{\alpha(p-p_0)}{K} - f_v\varepsilon_L b \left(\frac{p}{1+bp} - \frac{p_0}{1+bp_0} \right) \right]} \right\}^3 \\ \frac{k_{vb}}{k_{vb 0}} &= \left(\frac{1 - \sqrt[3]{1 - \phi_f}}{1 - \sqrt[3]{1 - \phi_{f0}}} \right)^3 \left[1 + \frac{\alpha(p-p_0)}{K} - f_v\varepsilon_L b \left(\frac{p}{1+bp} - \frac{p_0}{1+bp_0} \right) \right] \end{aligned} \right. \quad (24)$$

将式 (18)、(19) 与式 (20) 代入式 (15) 与式 (16), 可得适用于恒定围压条件下基于 REV 裂隙体积应变 ($k_{f\phi}$ 模型、 k_{fb} 模型) 渗透率表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{k_{f\phi}}{k_{f\phi 0}} &= \left\{ \frac{1 + \frac{\alpha(p-p_0)}{K_f} - f_{vb}\varepsilon_L b \left(\frac{p}{1+bp} - \frac{p_0}{1+bp_0} \right)}{\phi_{f0} \left[\frac{\alpha(p-p_0)}{K_f} - f_{vb}\varepsilon_L b \left(\frac{p}{1+bp} - \frac{p_0}{1+bp_0} \right) \right] + 1} \right\}^3 \\ \frac{k_{fb}}{k_{fb 0}} &= \left(\frac{1 - \sqrt[3]{1 - \phi_f}}{1 - \sqrt[3]{1 - \phi_{f0}}} \right)^3 \frac{\phi_{f0}}{\phi_f} \left[1 + \frac{\alpha(p-p_0)}{K_f} - f_{vb}\varepsilon_L b \left(\frac{p}{1+bp} - \frac{p_0}{1+bp_0} \right) \right] \end{aligned} \right. \quad (25)$$

2 渗透率模型验证

2.1 模型验证

目前常用的渗透率测试方法包括稳态法和瞬态法 (脉冲衰减法)^[31]。OLSEN 于 1966 年提出稳态法^[32], 稳态法的优点在于对仪器要求较低, 计算比较简便, 但当煤岩体渗透率较低时测量精度较差, 而且受外界环境 (空气流动和温度) 影响较大^[33]。瞬态法由 BRACE 在 1968 年提出并广泛应用于煤岩体渗透率的测量^[34-36],

具有测试精度高、测试时间短的优点,而且适用于渗透率较低的测试样品,但对仪器和实验流程要求较高,另外脉冲压力的大小和平衡时间也会影响测试结果的准确性^[33,37]。

为了验证笔者提出渗透率模型准确性,选取包含上述2种测试方法的渗透率实验数据进行验证,并分析有效应力和吸附应变对渗透率的影响规律,实验数据取自文献^[38-40]。表1为4组渗透率实验数据的基本情况,包括实验方法、实验条件、取样地点、

测定气体与孔压变化范围等信息。4组实验数据测试方法包括稳态法与瞬态法,实验气体压力既有低压阶段又有高孔压阶段,测试气体包含CH₄、CO₂与N₂。表2为4组煤样的属性参数,其中Biot系数、初始裂隙率、体积模量、Langmuir压力常数等信息取自原文献,前2组煤样的最大吸附应变取自文献^[26],需要说明的是,文献^[26]汇总了文献^[38]与文献^[39]中对应煤样的基础物性参数,但文献^[26]中给出的是线应变。

表1 4组渗透率实验数据的基本情况^[38-40]

Table 1 Basic characteristics of permeability experimental data for four groups^[38-40]

实验方法	编号	实验条件	取样地点	测定气体	气体压力变化范围/MPa
稳态法	Expdata1	围压3 MPa	润红矿 ^a	CH ₄	0.30~1.85
	Expdata2	围压6 MPa	新田湾矿 ^a	CH ₄	0.10~3.00
瞬态法	Expdata3	围压10 MPa	Monte Sinni矿 ^a	CO ₂	0.49~7.75
	Expdata4	围压10 MPa	Monte Sinni矿 ^a	N ₂	1.01~7.36

表2 4组煤样的属性参数

Table 2 Property parameters for four groups of coal samples

编号	实验数据来源 ^[38-40]	$\phi_0/\%$	K/MPa	$\epsilon_L/10^{-2}$	b/MPa^{-1}	α
Expdata1	魏建平等	4.25	1.60×10^4	0.318	1.120 0	0.85
Expdata2	王刚等	6.82	1.89×10^3	2.943	1.092 0	1.00
Expdata3	PINI等	0.42	7.78×10^2	4.900	0.380 0	1.00
Expdata4	PINI等	0.42	7.78×10^2	1.700	0.051 9	1.00

为分析多参数渗透率模型的参数拟合误差,开展双参数拟合(体积模量与吸附应变系数)与单参数拟合(吸附应变系数)的对比研究,进一步利用双参数拟合的体积模量与表2给出的体积模量实验值,分析体积模量拟合误差;利用双参数拟合与单参数拟合的吸附应变系数,确定吸附应变系数的拟合误差。图2为基于REV体积应变的渗透率模型匹配结果及应变变化规律。可以看出,以体积模量 K 与吸附应变系数 f_f 作为关键拟合参数, $k_{V\phi}$ 模型与 k_{Vb} 模型2种模型都能极好地匹配实验数据,而且 $k_{V\phi}$ 模型与 k_{Vb} 模型匹配曲线几乎完全一致。此外,随孔压增大,有效应力引起的应变呈线性增大,吸附作用导致裂隙收缩,因而吸附应变随孔压增大而减小。对于前2组煤样,随孔压增大,有效应力引起的应变相比吸附应变小得多,因而在整个孔压变化范围内,渗透率变化趋势与吸附应变趋势一致;对于后2组煤样,在孔压变化过程中,有效应力引起的应变与吸附应变相当,且孔压最大时,有效应力引起的应变更大,因此渗透率最终呈增大趋势。

图3为基于REV裂隙体积应变渗透率模型匹配结果及应变变化规律。可以看出,以裂隙体积模量 K_f 与裂隙吸附应变系数 f_{fb} 为关键拟合参数,基于裂隙体积应变的渗透率模型与实验数据能较好匹配,对于同一组实验数据, $k_{f\phi}$ 模型与 k_{fb} 模型匹配曲线也几乎完全一致。同时,随孔压增大,有效应力引起的应变与吸附应变的变化趋势与图2中相应应变的变化趋势完全一致,结合式(17)、(20)与式(21)亦可得出一致结论,有效应力引起的REV裂隙体积应变与其体积应变也呈线性关系,吸附引起的REV裂隙体积应变与其体积应变亦然,相关系数都为初始裂隙率,不同的是,有效应力与吸附引起的REV裂隙体积应变比相应的REV体积应变大得多。

表3与表4为笔者提出的系列渗透率模型匹配参数。表中 R^2 最小为0.99,说明模型匹配效果极好,不同模型拟合的 f_v 差别不大, f_{fb} 亦然,但对于前2组数据, K 与 K_f 的拟合值都有明显的差别,且拟合的体积模量也较大,这是由于随孔压变化有效应力引起的应变相比吸附应变小得多,因此体积模量变化对渗透

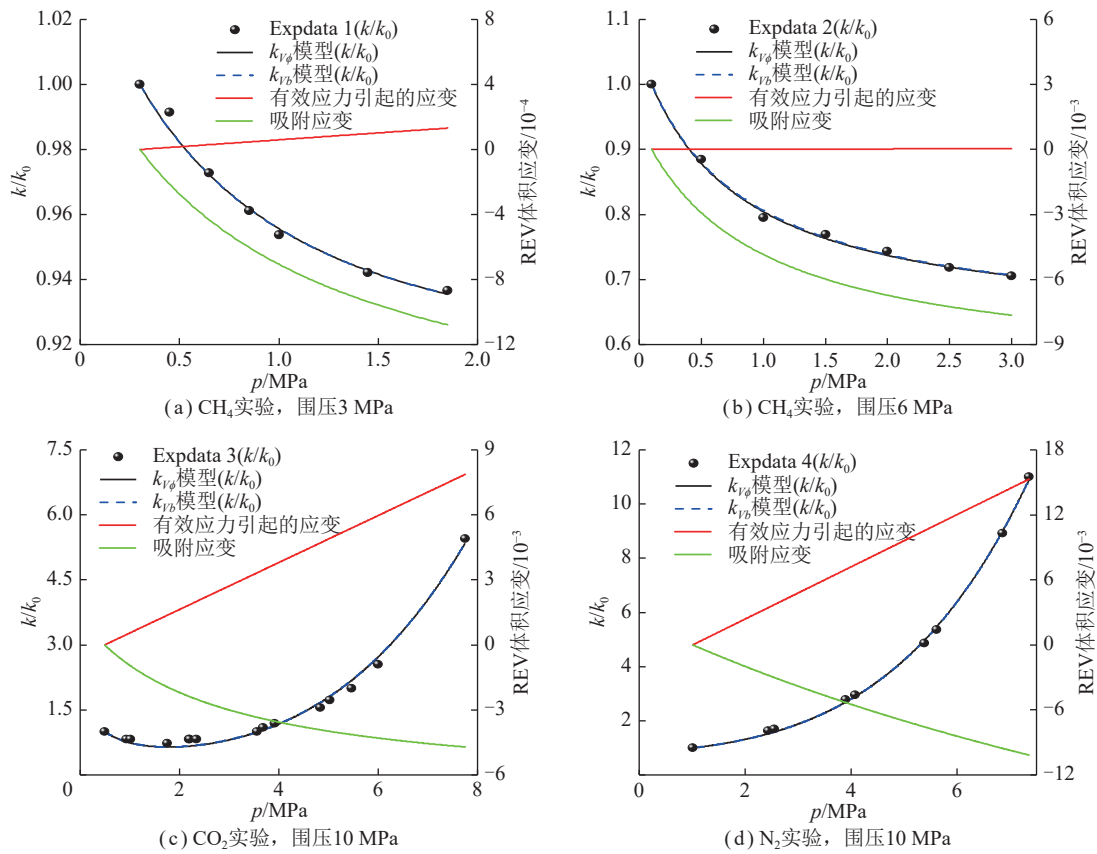


图2 基于REV体积应变的渗透率模型匹配结果及应变变化规律

Fig.2 Matching results and strain variation patterns for permeability model based on REV volume strain

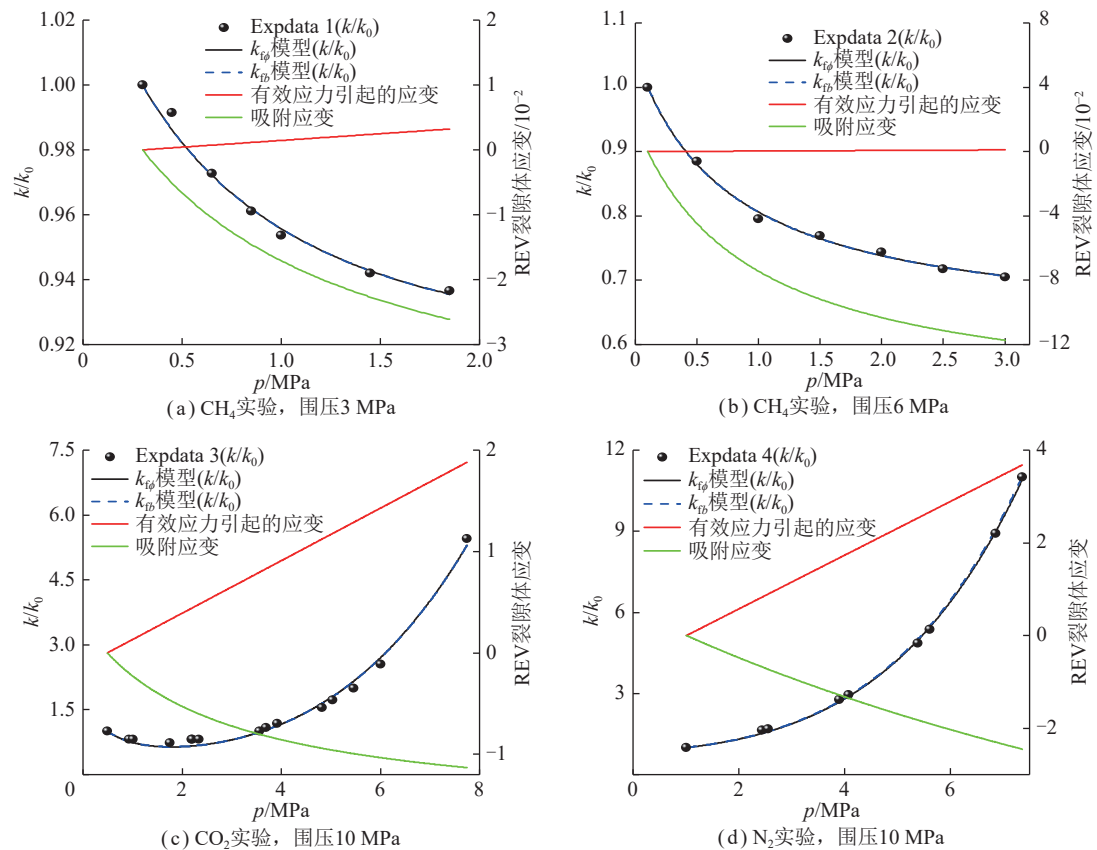


图3 基于REV裂隙体积应变渗透率模型匹配结果及应变变化规律

Fig.3 Matching results and strain variation patterns for permeability model based on REV fracture volume strain

率的影响极小,与图2、图3结果一致。需要注意的是,拟合的参数不一定与真实的物理属性参数值相同,甚至可能相差很大,一方面由于模型参数存在拟合误差,另一方面当拟合的参数项相比模型主要影响因素可以忽略时,此时参数变化几乎不会影响模型结果,因此拟合该参数极易失真。

依据式(22)及表4中裂隙体积模量 K_f 可计算出煤样体积模量 K' ,拟合与计算的体积模量及其误差见表5。从表中可以看出,利用式(1)推导出的 $k_{f\phi}$ 模型与 k_{fb} 模型,分别拟合和计算出 K_1 和 K'_1 ,其数值非常接近,而由式(2)得到的 k_{fb} 模型和 k_{fb} 模型,拟合和计算的 K_2 和 K'_2 也近似相等,但对于前2组数据, $k_{f\phi}$ 模型与 k_{fb} 模型拟合的 K_1 与 K_2 差别较大,这是由于体积模量较大时有效应力引起的应变较吸附应变小得多,因此体积模量的变化对渗透率影响较小。将表5中体积模量与表2中体积模量实际值进行比较,分析参数拟合误差 e_K (如 $e_K = \left| \frac{K_1 - K}{K} \right|$),4种渗透率模型体积模量的拟合误差都较大,对于 $k_{f\phi}$ 模型与 k_{fb} 模型,

由于 K_f 往往难以估算,单纯的参数拟合不可避免出现较大的拟合误差,因此 $k_{f\phi}$ 模型与 k_{fb} 模型适用性更好。当然,亦可依据体积模量实验值结合式(22),求解 K_f ,将其作为已知属性参数进行拟合,来减少多参数拟合出现的拟合误差。

表3与表4中将体积模量与裂隙体积模量作为待定参数,若4种渗透率模型代入表2中体积模量 K 与结合式(22)得到的裂隙体积模量 K_f ,可拟合出相应的吸附应变系数,且最小的 R^2 大于0.97。以单参数拟合的吸附应变系数作为真实值,分析表3与表4所拟合吸附应变系数的误差 e_f (如 $e_f = \left| \frac{f_{v1} - f'_{v1}}{f_{v1}} \right|$),见表6。从表中可以看出,以体积模量与应变系数双参数进行拟合,得到的应变系数存在误差,在3.90%~221.69%内,每组煤样实验数据对4种模型拟合的吸附应变系数,其误差相差不多。同时,双参数拟合相比单参数拟合,拟合参数存在明显误差,由此可知对于更多参数的渗透率模型,尽管可以实现与实验数据的极好匹配,也难以保证拟合参数的准确性。

表3 基于REV体积应变的渗透率模型匹配参数

Table 3 Matching parameters for permeability model based on REV volume strain

编号	$k_{f\phi}$ 模型			k_{fb} 模型		
	K_1/MPa	f_{v1}	R^2	K_2/MPa	f_{v2}	R^2
Expdata1	9.66×10^3	0.83	0.99	1.00×10^4	0.80	0.99
Expdata2	4.03×10^4	0.41	1.00	7.81×10^4	0.39	1.00
Expdata3	9.19×10^2	0.16	0.99	9.23×10^2	0.16	0.99
Expdata4	4.11×10^2	2.67	1.00	4.15×10^2	2.64	1.00

表4 基于REV裂隙体积应变的渗透率模型匹配参数

Table 4 Matching parameters for permeability model based on REV fracture volume strain

编号	$k_{f\phi}$ 模型			k_{fb} 模型		
	K_{f1}/MPa	f_{fb1}	R^2	K_{f2}/MPa	f_{fb2}	R^2
Expdata1	4.11×10^2	19.43	0.99	4.25×10^2	18.88	0.99
Expdata2	2.75×10^3	5.97	1.00	5.32×10^3	5.71	1.00
Expdata3	3.86	39.16	0.99	3.88	38.96	0.99
Expdata4	1.73	636.05	1.00	1.74	628.20	1.00

表5 拟合与计算的体积模量及其误差

Table 5 Bulk modulus and errors for fitting and calculation

编号	$K_1/\text{MPa}(k_{f\phi}\text{模型})$	$K_2/\text{MPa}(k_{fb}\text{模型})$	$K'_1/\text{MPa}(k_{f\phi}\text{模型})$	$K'_2/\text{MPa}(k_{fb}\text{模型})$	$e_K/\%$
Expdata1	9.66×10^3	1.00×10^4	9.67×10^3	1.00×10^4	37.50~39.63
Expdata2	4.03×10^4	7.81×10^4	4.03×10^4	7.80×10^4	2 032.28~4 032.28
Expdata3	9.19×10^2	9.23×10^2	9.19×10^2	9.24×10^2	18.12~18.77
Expdata4	4.11×10^2	4.15×10^2	4.12×10^2	4.14×10^2	46.66~47.17

表 6 吸附应变系数拟合值及误差分析

Table 6 Fitting values and errors for adsorption strain coefficient

编号	$f'_{V1}(k_{V\phi}\text{模型})$	$f'_{V2}(k_{Vb}\text{模型})$	$f'_{Vb1}(k_{i\phi}\text{模型})$	$f'_{Vb2}(k_{ib}\text{模型})$	$e_f/\%$
Expdata1	0.79	0.77	18.65	18.15	3.90~5.06
Expdata2	0.47	0.45	6.81	6.57	12.33~13.33
Expdata3	0.21	0.21	49.42	49.51	20.76~23.81
Expdata4	0.83	0.84	198.36	200.01	214.08~221.69

2.2 模型对比分析

2.2.1 与经典模型对比分析

为进一步验证所提渗透率模型,结合 2.1 小节中 4 组实验数据,选取 CONNELL 指数与立方模型^[24]、P-M 模型^[41]和 S-D 模型^[23]与笔者提出的 $k_{i\phi}$ 模型渗透率模型进行对比分析。

CONNELL 指数模型、CONNELL 立方模型、P-M 模型和 S-D 模型可分别被表示为

$$\frac{k}{k_0} = \exp \left\{ -3 \left[-C_f(p-p_0) + \gamma \frac{\varepsilon_L p_L}{(p+p_L)(p_0+p_L)}(p-p_0) \right] \right\} \quad (26)$$

$$\frac{k}{k_0} = \left\{ 1 - \frac{1}{\phi_{i0}} \left[-\frac{1}{K}(p-p_0) + \gamma \frac{\varepsilon_L p_L}{(p+p_L)(p_0+p_L)}(p-p_0) \right] \right\}^3 \quad (27)$$

$$\frac{k}{k_0} = \left[1 + \frac{C_m}{\phi_{i0}}(p-p_0) + \frac{\varepsilon_L}{3\phi_{i0}} \left(\frac{K}{M} - 1 \right) \left(\frac{bp}{1+bp} - \frac{bp_0}{1+bp_0} \right) \right]^3 \quad (28)$$

$$\frac{k}{k_0} = \exp \left\{ 3C_f \left[\frac{v}{1-v}(p-p_0) - \frac{E}{3(1-v)} \varepsilon_L \left(\frac{bp}{1+bp} - \frac{bp_0}{1+bp_0} \right) \right] \right\} \quad (29)$$

式中, C_f 为裂隙压缩系数; γ 为吸附应变系数; C_m 为有效应力系数; M 为约束轴向模量; v 为泊松比; E 为弹性模量。

图 4 为不同渗透率模型拟合结果对比。从图中可以看出, P-M 模型和 S-D 模型对 4 组渗透率实验数据匹配效果都较差,这是由于 P-M 模型与 S-D 模型都适用单轴应变条件而非三轴应力条件。所提模型与 CONNELL 模型匹配效果极好,匹配度 R^2 最小为 0.96,所提模型推导过程更加简明,且与 CONNELL 模型结果呼应,式 (26)、式 (27) 与式 (22) 结论一致,有效应力的系数关系也满足 $K\phi_{i0}=K_f$ 与 $K_f=1/C_f$ 。

表 7 为 CONNELL 模型、P-M 模型和 S-D 模型拟合参数。从理论上来说, P-M 模型和 S-D 模型拟合的有效应力系数 C_m 与 C_f ,需满足 $C_m=1/K$ 与 $C_f=1/(K\phi_{i0})$,显然表中拟合值计算的体积模量与表 2 中体积模量

K 的实际值差别较大。CONNELL 指数模型拟合参数 C_f 也满足 $C_f=1/(K\phi_{i0})$,由表中拟合值也可得到体积模量计算值,其与表 2 实际值相差不大,与所提模型拟合结果相似(表 5), CONNELL 模型拟合的吸附应变系数与所提模型拟合的吸附应变系数(表 6)也相近。

2.2.2 不同实验条件的模型对比

为了充分验证所提出的模型,分析其与 CONNELL 模型差异,结合 CONNELL 立方模型,利用以下 2 种实验条件的煤体渗透率数据,对模型进行对比分析: ① 恒定孔压条件 $p-p_0=0$, 渗透率随围压变化; ② 恒定差压条件 $\Delta(p_f-p)=0$, 渗透率随孔压变化。

定孔压条件下, $k_{i\phi}$ 模型与 CONNELL 立方模型分别写作

$$\frac{k_{i\phi}}{k_{i\phi 0}} = \left[\frac{\phi_{i0}K + p_{i0} - p_f}{\phi_{i0}(p_{i0} - p_f) + \phi_{i0}K} \right]^3 \quad (30)$$

$$\frac{k}{k_0} = \left[1 - \frac{1}{\phi_{i0}} \left(\frac{p_f - p_{i0}}{K} \right) \right]^3 \quad (31)$$

从式 (30) 与式 (31) 可看出, 所提模型式 (30) 忽略 $\phi_{i0}(p_{i0}-p_f)$ 项即可简化为式 (31), 只有 $\Delta p_f \ll K$ 时这一简化才不会导致大的误差。模型拟合所用定孔压实验数据取自文献[20], 实验气体为 CO_2 和 N_2 , 实验过程中孔压保持为 1 MPa, 围压 p_f 从 2~5 MPa 逐渐增大, 煤样属性参数见表 8。

图 5 为定孔压条件下 $k_{i\phi}$ 模型和 CONNELL 立方模型对比, 可以看出, 两模型拟合曲线重合且拟合度均较好, R^2 分别为 0.98 和 0.96, 拟合的 K 值几乎一致, 显然是由于实验过程最大的 $\Delta p_f=3$ MPa, 相比 K 最小拟合值 191 MPa 要小得多。

恒定差压条件下, $k_{i\phi}$ 模型和 CONNELL 立方模型分别写作

$$\frac{k_{i\phi}}{k_{i\phi 0}} = \left\{ \frac{1 - \frac{(1-\alpha)(p-p_0)}{\phi_{i0}K} - f_{Vb}\varepsilon_L b \left(\frac{p}{1+bp} - \frac{p_0}{1+bp_0} \right)}{1 - \phi_{i0} \left[\frac{(1-\alpha)(p-p_0)}{\phi_{i0}K} + f_{Vb}\varepsilon_L b \left(\frac{p}{1+bp} - \frac{p_0}{1+bp_0} \right) \right]} \right\}^3 \quad (32)$$

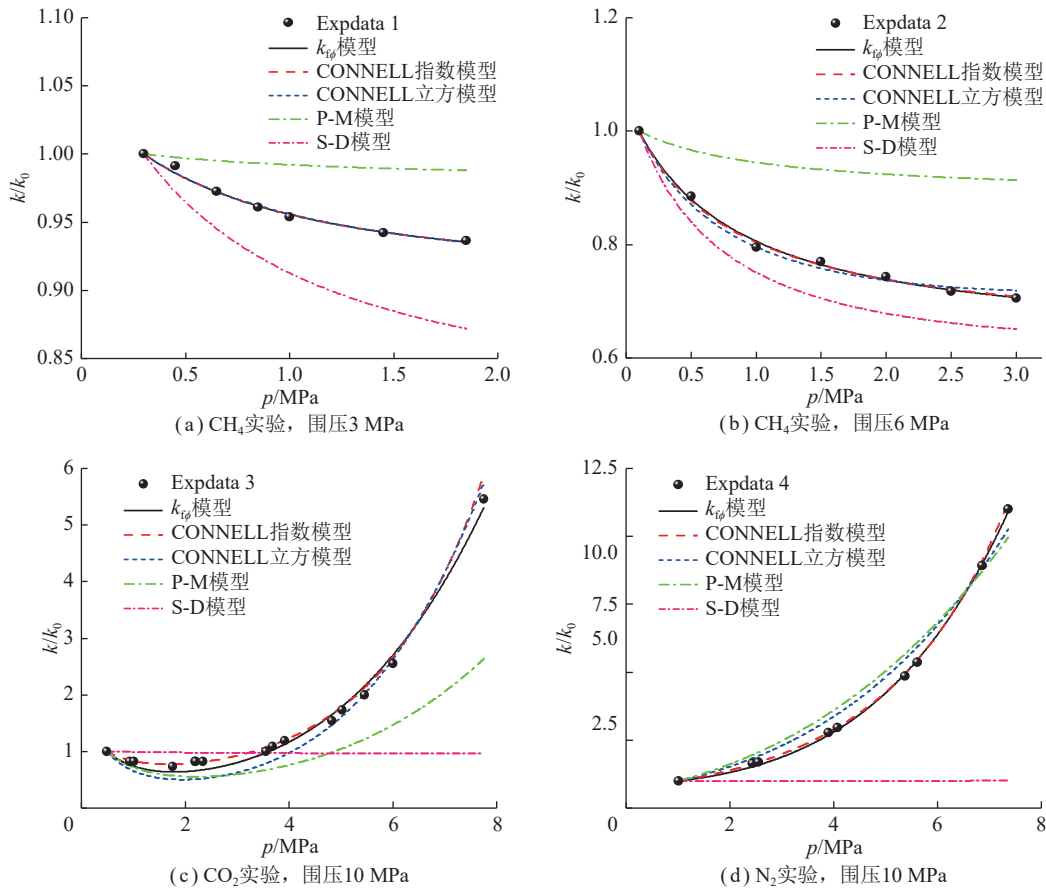


图4 不同渗透率模型拟合结果对比

Fig.4 Comparison of fitting results for different permeability models

表7 CONNELL模型、P-M模型和S-D模型拟合参数

Table 7 Fitting parameters for CONNELL, P-M and S-D models

编号	CONNELL指数模型		CONNELL立方模型	P-M模型	S-D模型
	C_f/MPa^{-1}	γ	γ	C_m/MPa^{-1}	C_f/MPa^{-1}
Expdata1	1.77×10^{-3}	18.57	0.77	1.00×10^{-16}	3.93×10^{-3}
Expdata2	2.12×10^{-15}	5.84	0.44	1.00×10^{-15}	9.20×10^{-3}
Expdata3	1.87×10^{-1}	27.30	0.21	8.64×10^{-4}	1.00×10^{-3}
Expdata4	1.86×10^{-1}	98.80	0.84	8.49×10^{-4}	8.13×10^{-3}

$$\frac{k}{k_0} = \left\{ 1 - \frac{1}{\phi_{r0}} \left[\gamma \frac{\varepsilon_L p_L}{(p + p_L)(p_0 + p_L)} (p - p_0) \right] \right\}^3 \quad (33)$$

定差压条件的实验数据取自文献[21], 实验气体为 CO_2 和 N_2 , 实验过程中差压 2 MPa, 渗透率随孔压增大而减小。煤样属性参数见表 8, 模型中体积模量 K 取值参考图 5 中 K 的拟合值。图 6 为恒定差压条件 k_{f0} 模型和 CONNELL 立方模型对比, k_{f0} 模型可以很好地表征渗透率随孔压的变化规律而且匹配效果明显优于 CONNELL 立方模型, CONNELL 立方模型最小 R^2 仅为 0.91, 且该模型在高压段 ($p \geq 4$ MPa) 明显高估了渗透率大小。

表8 定孔压条件与定差压条件实验煤样属性参数

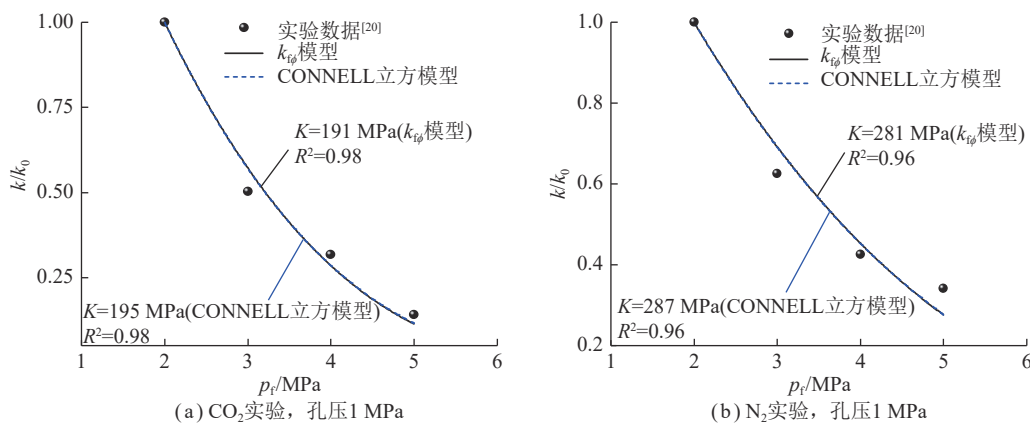
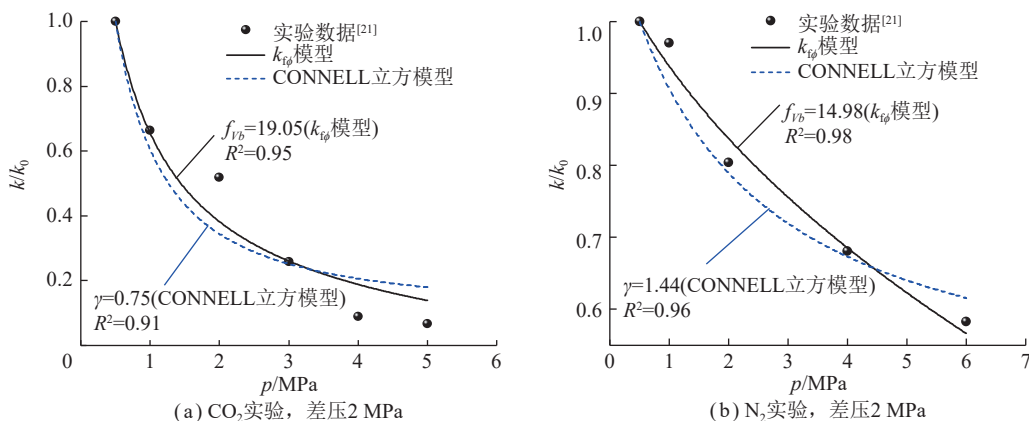
Table 8 Property parameters for experimental coal samples under constant pore pressure and constant differential pressure condition

气体类型	α	ϕ_{r0}	p_L/MPa	ε_L
CO_2	0.8	0.03	0.83	0.036 2
N_2	0.8	0.03	2.61	0.005 8
来源文献	[42]	[21]	[43]	[43]

3 讨 论

3.1 参数敏感性分析

结合 2.1 节中的实验数据及 k_{f0} 模型的匹配结果,

图5 定孔压条件 k_{fg} 模型和 CONNELL 立方模型对比Fig.5 Comparison of k_{fg} model and CONNELL cubic model under constant pore pressure condition图6 恒定差压条件 k_{fg} 模型和 CONNELL 立方模型对比Fig.6 Comparison of k_{fg} model and CONNELL cubic model under constant differential pressure condition

改变 K_f 和 f_{vb} 两个系数,分析渗透率模型的参数敏感性。图7为渗透率模型参数敏感性分析,图7(a)为裂隙体积模量敏感性分析, K_f 的变化,控制了有效应力对渗透率的影响;图7(b)为应变系数敏感性分析, f_{vb} 变化时,吸附应变对渗透率影响也发生变化。图中,在低压段 ($p < 4$ MPa), f_{vb} 增大时,吸附应变影响更显著,这是由于吸附应变在低压段变化较快,渗透率曲

线下移;而 K_f 减小时,高压段 ($p \geq 4$ MPa) 范围内,有效应力对渗透率的影响更为显著。由此可知,对多参数渗透率模型,较小的拟合参数误差也可能导致渗透率预测结果失真。

3.2 REV 细观尺度参数确定

对于 REV 几何模型,初始渗透率与 REV 细观尺度参数 a_0 、 b_0 有^[27]如下相关关系:

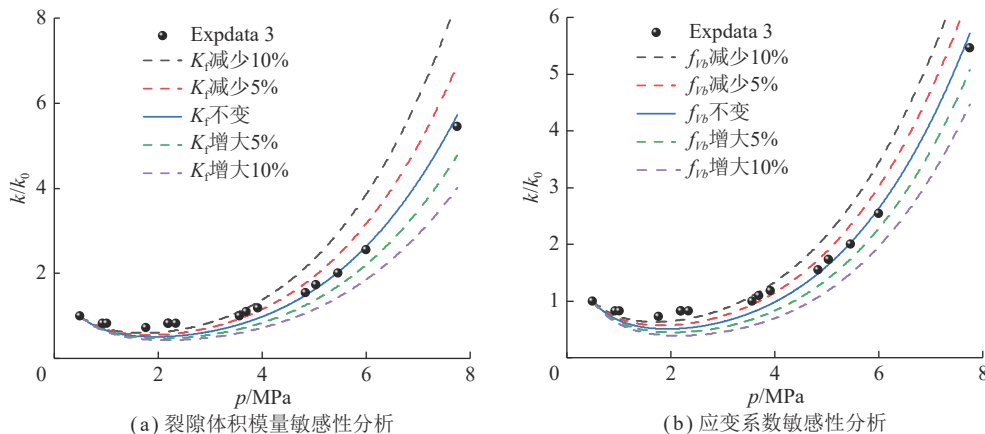


图7 渗透率模型参数敏感性分析

Fig.7 Sensitivity analysis of permeability model parameters

$$k_0 = \frac{b_0^3}{6a_0} \quad (34)$$

结合式(3)与式(34), 可得 REV 细观尺度参数与初始渗透率、初始裂隙率相关关系:

$$a_0 = \sqrt{6k_0} \left(\frac{\sqrt[3]{1-\phi_{f0}}}{1-\sqrt[3]{1-\phi_{f0}}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (35)$$

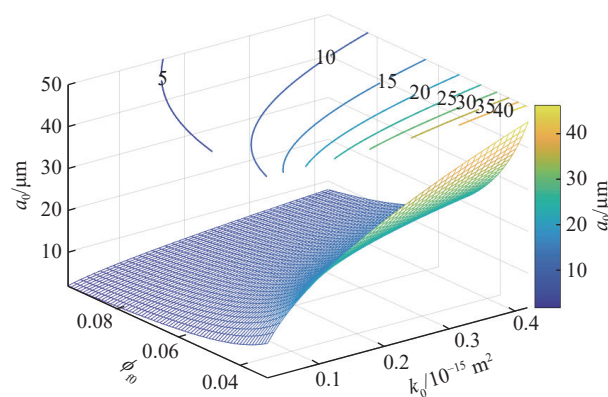
$$b_0 = \sqrt{6k_0} \left(\frac{\sqrt[3]{1-\phi_{f0}}}{1-\sqrt[3]{1-\phi_{f0}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (36)$$

埋深变化、构造应力、火成岩侵入等影响将造成煤储层的初始渗透率、初始裂隙率表现出非均质性, 而煤储层初始参数不同, 其 REV 细观尺度参数也随之变化。笔者依据沁水盆地内煤样的实测数据, 初始渗透率 k_0 和初始裂隙率 ϕ_{f0} 范围分别为 $(0.02 \sim 0.42) \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 、 $0.031 \sim 0.096^{[44]}$, 并结合式(35)与式(36)得到 REV 细观尺度参数 a_0 、 b_0 随初始渗透率、初始裂隙率的变化规律(图8)。由图中可以看出, 随 k_0 增大或者随 ϕ_{f0} 减小, a_0 、 b_0 都随之增大, a_0 变化范围为 $1.73 \sim 46.31 \text{ } \mu\text{m}$, b_0 变化范围为 $0.06 \sim 0.49 \text{ } \mu\text{m}$, a_0/b_0 的范围在 $28.83 \sim 94.51$ 。

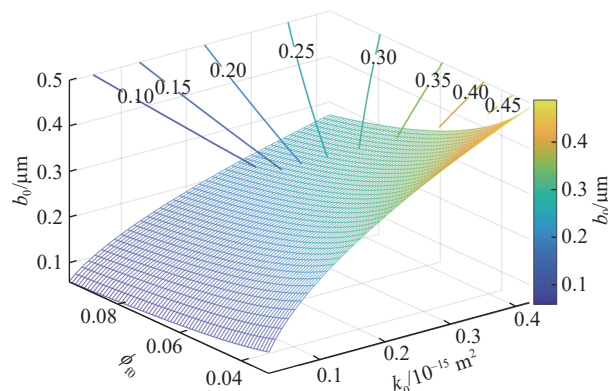
3.3 吸附应变系数影响机理

吸附应变系数通过影响煤体最大吸附应变进而改变煤体渗透率, 为研究其影响机制, 选取恒定差压条件下 CH_4 、 CO_2 的煤体渗透率实验数据^[24], 结合式(24)得到不同气体类型、初始裂隙率和差压条件下 f_V 值的匹配结果(图9)。从图中可以看出, $k_{V\phi}$ 模型能较好匹配恒定差压条件下的实验数据, 煤体初始裂隙率较大时其对应的 f_V 值也较大, 且相同条件下 CO_2 相比 CH_4 的 f_V 值更大。对于不同差压条件, 可看出随差压增大, CH_4 对应 f_V 值逐渐减小, 而 CO_2 对应的 f_V 值逐渐增大。图9(a)、(b)为 CH_4 实验数据拟合的 f_V 值, 最大为 0.19, 最小为 0.13, 说明煤样吸附气体后, 说明煤样吸附气体后, 煤样裂隙收缩, 依据式(17)可进一步确定 REV 收缩应变为实验观测煤体吸附应变的 $13\% \sim 19\%$; 图9(c)、(d)为 CO_2 实验数据拟合的 f_V 值, 最大为 0.38, 最小为 0.19, 说明煤体 REV 收缩应变为实验观测的煤体吸附应变的 $19\% \sim 38\%$ 。

图10为不同气体类型与不同初始裂隙率对应的 f_V 值随差压的变化规律。由图可知, 对于 CH_4 , 随差压增大, f_V 值呈线性减小, 相同差压条件下, 较大的初始裂隙率对应的 f_V 值更大, 初始裂隙率从 0.012 增大到



(a) a_0 随初始渗透率、初始裂隙率的变化规律



(b) b_0 随初始渗透率、初始裂隙率的变化规律

图8 REV 细观尺度参数随初始渗透率、初始裂隙率的变化规律

Fig.8 Variation patterns of REV mesoscale parameters with initial permeability and initial fracture porosity

0.015, 在 $2 \sim 6 \text{ MPa}$ 差压范围内, 对应的 f_V 平均增大了 0.033; 对于 CO_2 , 随差压增大, f_V 值近似呈指数增长, 初始裂隙率的大小对 f_V 的影响也较为显著, 初始裂隙率从 0.012 增大到 0.015, 在 2 MPa 和 6 MPa 差压处对应的 f_V 值分别增大了 0.05 和 0.08。

图11为不同因素影响下吸附应变系数对吸附应变的控制作用。 $f_{s1}\epsilon_s(\text{CH}_4)$ 与 $f_{s2}\epsilon_s(\text{CO}_2)$ 分别为 CH_4 和 CO_2 测定的煤体吸附应变在 2 MPa 差压下的校正结果^[24], 即差压增大至 2 MPa , CH_4 与 CO_2 的吸附应变系数分别减小 0.05 与 0.04; 煤样初始裂隙率不同, 对应的吸附应变系数亦不同, 初始裂隙率增大 0.003, 对于 CO_2 和 CH_4 的吸附应变系数分别增大 0.05 与 0.04。

除上述恒定差压条件外, 恒定围压条件下, 吸附应变系数对吸附应变也有明显控制作用。图12为恒定围压条件下吸附应变系数对煤体吸附应变的影响。由图可知, 恒定围压条件下煤体吸附 CO_2 和 N_2 引起的 REV 体积应变也服从 Langmuir 函数关系, 而观测

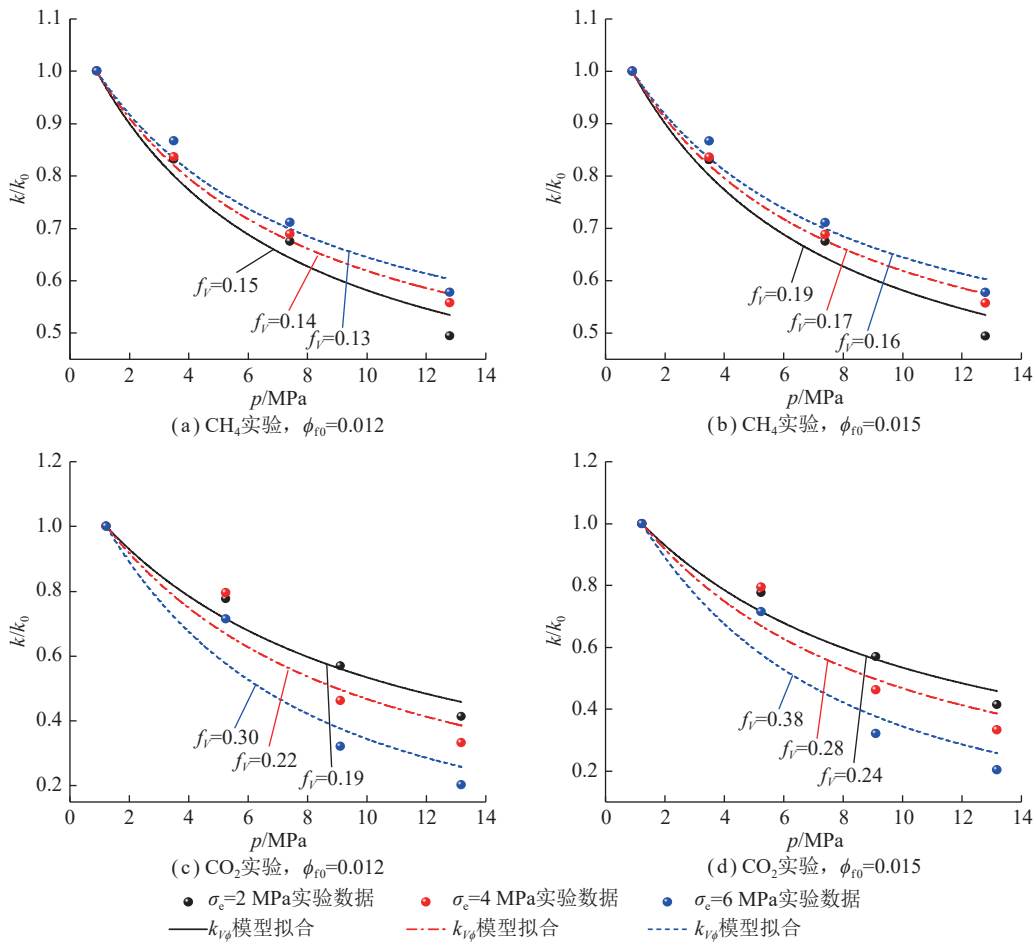


图 9 不同气体类型、初始裂隙率和差压 σ_e 条件下 f_v 值的匹配结果

Fig.9 Matching results of f_v values for different gas types, initial fracture porosity and differential pressure σ_e condition

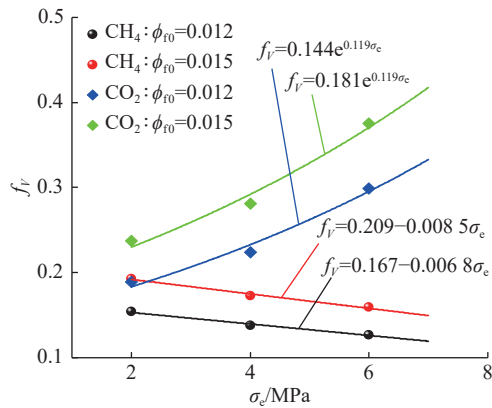
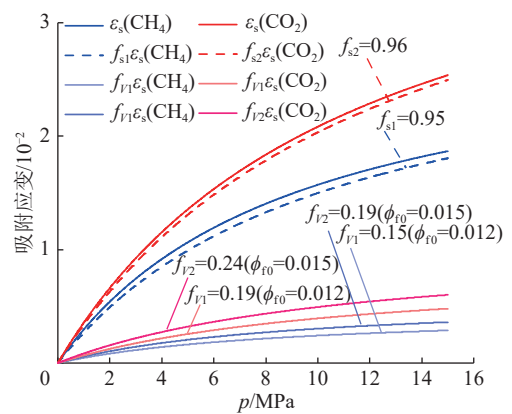


图 10 不同气体类型与不同初始裂隙率对应的 f_v 随差压的变化规律

Fig.10 Variation patterns of f_v values for different gas types and initial fracture rates with differential pressure

的煤体吸附应变(无外部应力实验条件)相比煤体实际收缩体积应变更大,且与气体类型相关,对于 CO_2 和 N_2 ,煤样在定围压条件下吸附应变系数分别减小了 0.79 与 0.17。需要注意的是,恒定围压条件下煤体因吸附气体导致裂隙收缩,这里 $f_v \varepsilon_s(\text{CO}_2)$ 与 $f_v \varepsilon_s(\text{N}_2)$ 表征 CO_2 与 N_2 吸附引起的 REV 体积应变大小。



f_{v1} 、 f_{v2} 、 f_{s1} 、 f_{s2} 为不同因素影响下的吸附应变系数

图 11 不同因素影响下吸附应变系数对吸附应变的控制作用

Fig.11 Control effect of adsorption strain coefficient on adsorption strain under different factor influences

3.4 国内主要矿井的渗透率极值压力

渗透率的演化规律由有效应力和吸附应变共同来表征,瓦斯抽采过程中,煤层瓦斯压力会随着抽采时间的增加不断下降,吸附应变与有效应力对渗透率的影响会呈现相反的趋势,渗透率在 2 种效应共同影

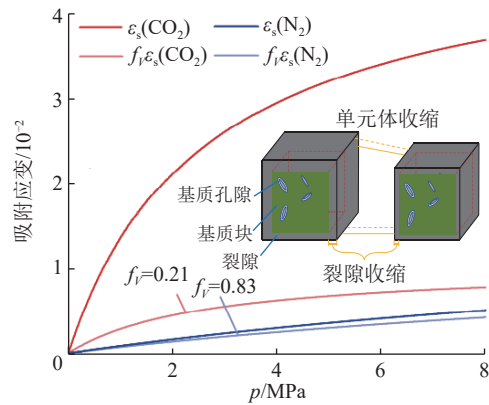


图 12 恒定围压条件下吸附应变系数对煤体吸附应变的影响

Fig.12 Influence of adsorption strain coefficient on coal adsorption strain under constant confining pressure condition

响下可能会存在极小值。通过渗透率模型求导,若渗透率模型存在极小值,极小值对应的压力为

$$p_{\min} = \sqrt{\frac{f_v \varepsilon_L K}{b a}} - \frac{1}{b} \quad (37)$$

选取文献[1,45-54]中不同矿井煤样的基础参数与应变测试结果,可确定国内主要矿井的渗透率极值压力(表9),矿井主要集中在华中、华北地区,气体包括CO₂、CH₄和N₂,对于CO₂,渗透率极值压力在0.94~5.33 MPa内,其最大与最小极值点分别取自山西寺河矿与鄂尔多斯盆地;对于CH₄,渗透率极值压力在1.06~6.94 MPa内,其最大与最小极值点分别取自安阳红岭煤矿与平顶山煤矿;对于N₂,所取矿井无极值点。

表9 国内主要矿井渗透率极值压力

Table 9 Corresponding pressure for the extreme values of permeability in major domestic mines

地区方位	取样地点	气体类型	极值压力/MPa	数据来源[1,45-54]
华中地区	郑煤白坪矿	CH ₄	4.95	王登科等
西南地区	重庆松藻煤矿	CH ₄	4.95	赵源
华中地区	焦作中马村煤矿	CH ₄	2.73	陈月霞
华中地区	平煤八矿	N ₂	—	赵宇
西南地区	贵州玉舍煤矿	CH ₄	1.47	袁梅
华中地区	安阳红岭煤矿	CH ₄	6.94	蒋一峰
华北地区	鄂尔多斯盆地	CO ₂	0.94~4.87	侯世辉
华东地区	淮北矿区祁南煤矿	CH ₄	2.52~2.73	董骏等
华北地区	山西寺河矿	CH ₄	4.19	王向浩
华北地区	山西寺河矿	CO ₂	5.33	王向浩
西北地区	陕西永陇煤矿	CH ₄	4.86	陈明义
华中地区	平煤十矿	CH ₄	1.06	李文璞

4 结 论

(1) 基于煤的REV体积应变及REV裂隙体积应变,能够推导出4种煤渗透率模型,而且REV体积应变及REV裂隙体积应变线性相关,相关系数为初始裂隙率。

(2) 在恒定围压、恒定孔压、恒定差压3种实验条件下,相比经典渗透率模型,4种渗透率模型对实验数据都有较好的匹配效果。相比单参数拟合,双参数拟合的体积模量与吸附应变系数,其拟合误差分别为18.12%~4 032.28%和3.90%~221.69%,说明即使拟合相关系数为1,开展渗透率模型的多参数拟合,拟合参数误差难以避免。

(3) REV细观尺度参数 a_0 、 b_0 可由初始裂隙率与初始渗透率共同确定,以沁水盆地煤样实测数据为例,

可计算 a_0 、 b_0 范围分别为1.73~46.31 μm和0.06~0.49 μm。

(4) 吸附应变系数与差压大小、气体类型及初始裂隙率都有关,国内主要矿井CO₂极值压力在0.94~5.33 MPa,CH₄极值压力在1.06~6.94 MPa。

致谢 本文的研究还受到了“中央高校基本科研业务费专项”资助,在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 我国煤与瓦斯共采: 理论、技术与工程[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1391–1397.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Theory, technology and engineering of simultaneous exploitation of coal and gas in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1391–1397.
- [3] 杨陆武, 崔玉环, 王国玲. 影响中国煤层气产业发展的技术和非技术要素分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2400–2411.
YANG Luwu, CUI Yuhuan, WANG Guoling. Analysis of technical and regulational aspects affecting China CBM progresses[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2400–2411.
- [4] 孙钦平, 赵群, 姜馨淳, 等. 新形势下中国煤层气勘探开发前景与对策思考[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 65–76.
SUN Qinpeng, ZHAO Qun, JIANG Xinchun, et al. Prospects and strategies of CBM exploration and development in China under the new situation[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 65–76.
- [5] 刘见中, 孙海涛, 雷毅, 等. 煤矿区煤层气开发利用新技术现状及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 258–267.
LIU Jianzhong, SUN Haitao, LEI Yi, et al. Current situation and development trend of coalbed methane development and utilization technology in coal mine area[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 258–267.
- [6] 肖智勇, 王长盛, 王刚, 等. 基质-裂隙相互作用对渗透率演化的影响: 考虑基质变形和应力修正[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(12): 2209–2219.
XIAO Zhiyong, WANG Changsheng, WANG Gang, et al. Influences of matrix-fracture interaction on permeability evolution: Considering matrix deformation and stress correction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(12): 2209–2219.
- [7] MENG Y, LI Z P, LAI F P. Influence of effective stress on gas slippage effect of different rank coals[J]. Fuel, 2021, 285: 119207.
- [8] 马如英, 王猛, 阿斯亚·巴克, 等. 准东南低阶煤覆压孔渗试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(6): 1182–1192.
MA Ruying, WANG Meng, BAKE Asiya, et al. Experimental study of overburden pore porosity and permeability of low-rank coal reservoirs in Southeastern Junggar[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(6): 1182–1192.
- [9] WANG Z Z, PAN J N, HOU Q L, et al. Changes in the anisotropic permeability of low-rank coal under varying effective stress in Fukang mining area, China[J]. Fuel, 2018, 234: 1481–1497.
- [10] 刘帅帅, 杨兆彪, 张争光, 等. 有效应力对煤储层不同方向渗透率影响的差异性[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(10): 1422–1429.
LIU Shuaishuai, YANG Zhaobiao, ZHANG Zhengguang, et al. Study on the differences of effective stress on coal reservoirs permeability in different directions[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(10): 1422–1429.
- [11] LEVINE J R. Model study of the influence of matrix shrinkage on absolute permeability of coal bed reservoirs[J]. Geological Society of London Special Publications, 1996, 109(1): 197–212.
- [12] 孟雅, 李治平, 唐书恒, 等. 中、高阶煤样甲烷吸附应变及渗透性实验分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1915–1924.
MENG Ya, LI Zhiping, TANG Shuheng, et al. Laboratory investigation on methane sorption-induced strain and permeability in middle and high rank coal samples[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1915–1924.
- [13] 祝捷, 张敏, 姜耀东, 等. 煤吸附解吸 CO₂ 变形特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1081–1086.
ZHU Jie, ZHANG Min, JIANG Yaodong, et al. Experimental study of coal strain induced by carbon dioxide sorption/desorption[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 1081–1086.
- [14] LIU H H, RUTQVIST J. A new coal-permeability model: internal swelling stress and fracture–matrix interaction[J]. Transport in Porous Media, 2010, 82(1): 157–171.
- [15] GUO P K, CHENG Y P, JIN K, et al. Impact of effective stress and matrix deformation on the coal fracture permeability[J]. Transport in Porous Media, 2014, 103(1): 99–115.
- [16] 荣腾龙, 周宏伟, 王路军, 等. 开采扰动下考虑损伤破裂的深部煤体渗透率模型研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 3983–3992.
RONG Tenglong, ZHOU Hongwei, WANG Lujun, et al. A damage-based permeability models of deep coal under mining disturbance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 3983–3992.
- [17] 赵家巍, 周宏伟, 刘泽霖, 等. 卸荷煤体分数阶渗透率模型参数探讨及其在渗流模拟中的应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2386–2395.
ZHAO Jiawei, ZHOU Hongwei, LIU Zelin, et al. Research on parameters determination of fractional permeability model for unloading coal body and its application in seepage simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2386–2395.
- [18] WANG G, XIAO Z Y, YU J H, et al. An improved coal permeability model with variable cleat width and klinkenberg coefficient[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(3): 3041–3051.
- [19] 贾荔丹, 李波波, 李建华, 等. 采气–采煤阶段煤岩渗透率演化机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(1): 132–146.
JIA Lidan, LI Bobo, LI Jianhua, et al. Study on the evolution mechanism of coal permeability during gas production and coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(1): 132–146.
- [20] 王伟, 方志明, 李小春. 沁水盆地煤样静水压力下渗透率实验及模型分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(S1): 251–257.
WANG Wei, FANG Zhiming, LI Xiaochun. Experimental and model analysis of permeability of coal sample from Qinshui Basin under hydrostatic pressure conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018,

- 39(S1): 251–257.
- [21] FANG Z M, LI X C, LIN H. Laboratory measurement and modeling of coal permeability with different gases adsorption[J]. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 2013, 6: 567.
- [22] LIU T, LIN B Q, YANG W. Impact of matrix–fracture interactions on coal permeability: Model development and analysis[J]. *Fuel*, 2017, 207: 522–532.
- [23] SHI J Q, DURUCAN S. Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: a new interpretation of the reservoir response to primary recovery[J]. *Transport in Porous Media*, 2004, 56(1): 1–16.
- [24] CONNELL L D, LU M, PAN Z J. An analytical coal permeability model for tri-axial strain and stress conditions[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 84(2): 103–114.
- [25] TANG J, ZHU J, SHAO T S, et al. A coal permeability model with variable fracture compressibility considering triaxial strain condition[J]. *Natural Resources Research*, 2021, 30(2): 1577–1595.
- [26] 祝捷, 唐俊, 王琪, 等. 含瓦斯煤渗透率演化模型和实验分析[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(6): 1764–1770.
- ZHU Jie, TANG Jun, WANG Qi, et al. Modeling and experimental analysis on the permeability evolution of coal containing methane [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(6): 1764–1770.
- [27] GUO H J, TANG H L, WU Y C, et al. Gas seepage in underground coal seams: Application of the equivalent scale of coal matrix-fracture structures in coal permeability measurements[J]. *Fuel*, 2021, 288: 119641.
- [28] LIU Q L, LI Z H, WANG E Y, et al. A dual-permeability model for coal under tri-axial boundary conditions[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 82: 103524.
- [29] ROBERTSON E P, CHRISTIANSEN R L. A permeability model for coal and other fractured, sorptive-elastic media[J]. *SPE Journal*, 2008, 13(3): 314–324.
- [30] WU X H, LI B B, REN C H, et al. An original coupled damage–permeability model based on the elastoplastic mechanics in coal[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(4): 2353–2370.
- [31] 陈卫忠, 杨建平, 伍国军, 等. 低渗透介质渗透性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(2): 236–243.
- CHEN Weizhong, YANG Jianping, WU Guojun, et al. Experimental study on permeability in low permeability media[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(2): 236–243.
- [32] OLSEN H W. Darcy’s law in saturated kaolinite[J]. *Water Resources Research*, 1966, 2(2): 287–295.
- [33] 刘江峰, 倪宏阳, 浦海, 等. 多孔介质气体渗透率测试理论、方法、装置及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(1): 137–146.
- LIU Jiangfeng, NI Hongyang, PU Hai, et al. Test theory, method and device of gas permeability of porous media and the application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(1): 137–146.
- [34] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73(6): 2225–2236.
- [35] FENG R M, HARPALANI S, PANDEY R. Evaluation of various pulse-decay laboratory permeability measurement techniques for highly stressed coals[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(2): 297–308.
- [36] WANG Y, LIU S M, ELSWORTH D. Laboratory investigations of gas flow behaviors in tight anthracite and evaluation of different pulse-decay methods on permeability estimation[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 149: 118–128.
- [37] 张宏源, 刘乐乐, 刘昌岭, 等. 基于瞬态压力脉冲法的含水合物沉积物渗透性实验研究[J]. *实验力学*, 2018, 33(2): 263–271.
- ZHANG Hongyuan, LIU Lele, LIU Changling, et al. Experimental investigation on permeability of hydrate bearing sediments based on pressure pulse method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(2): 263–271.
- [38] 魏建平, 秦恒洁, 王登科, 等. 含瓦斯煤渗透率动态演化模型[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(7): 1555–1561.
- WEI Jianping, QIN Hengjie, WANG Dengke, et al. Dynamic permeability model for coal containing gas[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(7): 1555–1561.
- [39] 王刚, 程卫民, 郭恒, 等. 瓦斯压力变化过程中煤体渗透率特性的研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(5): 735–739, 745.
- WANG Gang, CHENG Weimin, GUO Heng, et al. Study on permeability characteristics of coal body with gas pressure variation[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(5): 735–739, 745.
- [40] PINI R, OTTIGER S, BURLINI L, et al. Role of adsorption and swelling on the dynamics of gas injection in coal[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2009, 114(B4): B04203.
- [41] PALMER I, MANSOORI J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: a new model[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 1998, 1(6): 539–544.
- [42] GUO P K, CHENG Y P. Permeability prediction in deep coal seam: A case study on the No. 3 Coal Seam of the Southern Qinshui Basin in China[J]. *The Scientific World Journal*, 2013, 2013: 161457.
- [43] HUO B J, JING X D, FAN C J, et al. Numerical investigation of flue gas injection enhanced underground coal seam gas drainage[J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(6): 3204–3219.
- [44] ZHU H Y, TANG X H, LIU Q Y, et al. Permeability stress-sensitivity in 4D flow-geomechanical coupling of Shouyang CBM reservoir, Qinshui Basin, China[J]. *Fuel*, 2018, 232: 817–832.
- [45] 赵源. 基于含水率的固–气耦合模型构建及裂隙瓦斯流动规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- ZHAO Yuan. Research on solid-gas coupling model considering the

- influence of moisture content and gas flow law in fracture[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [46] 陈月霞. 瓦斯抽采过程中参数演化及钻孔优化数值模拟研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.
- CHEN Yuexia. Parameters evolution during gas drainage and numerical simulation of boreholes optimization[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [47] 赵宇. 煤层渗透率各向异性特征及其演化模型研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2020.
- ZHAO Yu. Research on anisotropic characteristics and evaluation model of coal seam permeability[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2020.
- [48] 袁梅. 含瓦斯煤渗透特性影响因素与煤层瓦斯抽采模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- YUAN Mei. Study on the influencing factors of gas-containing coal permeability and simulation of coal seam gas extraction[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [49] 蒋一峰. 受载煤体-瓦斯-水耦合渗流特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
- JIANG Yifeng. Coupling seepage characteristics of loaded coal containing gas and water[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2019.
- [50] 侯世辉. 煤层气井排采过程中不同煤体结构储层渗透率动态变化特征研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- HOU Shihui. Dynamic variation characterization of permeability of different coal structure reservoir during depletion[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [51] 董骏. 基于等效物理结构的煤体瓦斯扩散特性及应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- DONG Jun. Gas diffusion properties of coal mass based on equivalent physical structure and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [52] 王向浩. 高煤阶煤储层注入 CO_2 置换 CH_4 机理及对渗透率的影响研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- WANG Xianghao. Research on mechanism of CO_2 displacement CH_4 and affects on the permeability in high rank coal bed[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2018.
- [53] 陈明义. 煤-气-水耦合作用下低阶烟煤力学损伤及渗透率演化机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- CHEN Mingyi. Study on damage and permeability evolution mechanism of low rank bituminous coal under coupling effects of coal, gas and water[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [54] 李文璞. 采动影响下煤岩力学特性及瓦斯运移规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- LI Wenpu. Research on mechanical characteristics and gas migration law of coal influenced by mining[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.