

瓦斯吸附热效应作用下渗透率回弹和恢复演化

刘正东¹, 林晓松¹, 白刚², 孙晨¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 气体吸附/解吸所释放/吸收热量对煤层渗透率回弹和恢复特性演化存在显著影响, 基于热-流-固(THM)多物耦合理论探究了单/多重瓦斯吸附热因素耦合作用下渗透率回弹和恢复现象在时间尺度上的演化特征, 并进一步获取吸附热效应对煤层气开采特性的影响. 结果表明: 单一因素作用下, 渗透率回弹和恢复时间与吸附热强度呈正相关趋势, 同样其对 Langmuir 常数的响应特征与前者类似, 且当吸附性能参数超过临界值后趋于稳定; 多因素耦合作用下, 瓦斯吸附热强度对渗透率回弹和恢复现象时间尺度的控制作用表现为促进, 而空间尺度上则不易受吸附热影响. 此外, 若未考虑瓦斯吸附热效应将会高估回弹和恢复带来的瓦斯流量增量.

关键词: 煤层气; 渗透率回弹; 渗透率恢复; 瓦斯吸附热效应; 抽采量

中图分类号: TD 712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2025)05-0103-10

Evolution of Permeability Rebound and Recovery Under the Influence of Gas Adsorption Thermal Effects

LIU Zheng-dong¹, LIN Xiao-song¹, BAI Gang², SUN Chen¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China. Corresponding author: LIN Xiao-song, E-mail: lin_xs_98@163.com)

Abstract: The thermal quantity released/absorbed during gas adsorption/desorption significantly influences the evolution of permeability rebound and recovery in coal seams. Based on the thermo-hydro-mechanical (THM) coupling theory, this study investigates the temporal evolution of permeability rebound and recovery under single/multiple gas adsorption thermal effects and further assesses their impact on coalbed methane (CBM) extraction. Results indicate that under a single-factor influence, permeability rebound and recovery time exhibit a positive correlation with adsorption heat intensity, and its response to Langmuir's constant is characterized similarly to the former and tends to stabilize when the adsorption performance parameter exceeds the critical value. Under multi-factor coupling, adsorption heat enhances permeability rebound and recovery on the temporal scale while the spatial scale is less susceptible to adsorption heat. Furthermore, neglecting adsorption thermal effects may lead to an over-estimation of the gas production increase induced by permeability rebound and recovery.

Key words: coalbed methane; permeability rebound; permeability recovery; gas adsorption thermal effects; extraction capacity

煤层气是一种清洁可靠的能源^[1-2], 我国蕴含着世界第三的煤层气储量^[3-4], 具备极大的开发潜力. 合理进行煤层气开采不仅可以调节能源结

构^[5], 还可以降低煤矿开采过程中的灾害风险^[6]. 渗透率是描述储层抽采难易程度的重要指标之一, 正确认识抽采过程中渗透率演化特征对煤层

收稿日期: 2023-11-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52104188, 52374189); 中国博士后科学基金资助项目(2022MD713769); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室开放课题资助项目(WS2023A02).

作者简介: 刘正东(1990—), 男, 江苏盐城人, 东北大学副教授, 博士生导师.

消突和 CBM (coalbed methane) 开采均具有重要意义。

在进行煤层渗透率演化特征的理论 and 实验研究中,部分学者发现在 CBM 开采过程中渗透率随储层压力的不断变化会出现回弹和恢复现象.Palmer 等^[7]通过提取美国圣胡安盆地 fairway B1 渗透率随孔隙压力的演化数据发现在开采后期基质收缩占据主导地位,渗透率曲线呈现出恢复现象.Chen 等^[8]认为瓦斯抽采初期,渗透率的主控因素为有效应力作用,而在抽采稳定期主控因素转变为煤基质收缩效应,进而导致渗透率曲线随压力的下降呈现出先降后升的趋势.上述研究表明渗透率回弹压力、时间将会成为遏制 CBM 开采的重要节点,准确把握渗透率的瓶颈(回弹值)及恢复时间等特征的演化规律,对提高 CBM 开采效率有着重要意义。

为揭示不同初始储层条件下渗透率回弹和恢复的演化特征,Liu 等^[9]基于自然应变和工程应变理论提出了一种考虑有效应力和气体吸附诱导变形竞争机制的渗透率模型,发现初始储层压力和煤层压缩系数高于阈值将不会发生渗透率回弹和恢复现象,同样地,当内部膨胀系数高于阈值将不会发生渗透率回弹和恢复现象.Su 等^[10]基于瓦斯动态扩散系数提出了一种包括瓦斯气体流动场及应力场的耦合模型,基于该模型发现渗透率的回弹和恢复时间随初始压力的增加而延长,而其随初始扩散系数和初始渗透率的增加呈现出较为一致减小的趋势.然而在上述研究中,均未考虑瓦斯吸附热效应.事实上煤基质中的吸附态瓦斯的吸-脱附过程往往伴随着热量的流动,其会造成煤层温度发生较大的变化,导致煤基质吸附量及热应力的改变,进而影响渗透率演化特征.因而准确把握瓦斯吸附热效应对渗透率回弹和恢复演化特征的影响至关重要。

本文基于瓦斯吸附热效应构建了一种考虑煤层温度场、气体流动场和应力场的全耦合多物理场模型,并通过考虑温度变化对气体吸附/解吸效应的影响及热膨胀对渗透率的影响,改良了原有的 SD 渗透率模型.多物理场全耦合模型被用于 CBM 开采数值模拟研究,准确量化了等量吸附热对渗透率回弹和恢复演化特征的影响,并分析了二者对固定点位置的敏感性;厘清不同吸附性能参数下渗透率回弹和恢复现象在时间尺度上的演化特征;说明了等量吸附热与吸附性能参

数共同作用下渗透率回弹和恢复的演化特征;在此基础上,讨论了考虑与未考虑吸附热效应作用下渗透率回弹和恢复特性对 CBM 抽采量的影响差异。

1 考虑吸附热效应条件下多物理场耦合模型构建

1.1 模型基本假设

在构建符合 CBM 开采过程中甲烷运移特性的 THM 多物理场全耦合模型之前需提出一些合理的假设条件,以满足求解过程的便捷性和有效性:

- 1) 煤层是干燥的(忽略水分对甲烷运移特性的影响);
- 2) 煤层是一种由骨架、孔隙和裂隙共同组成的各向同性、均质和双孔弹性介质;
- 3) 甲烷在煤层中的运移行为遵循菲克扩散和达西渗流定律;
- 4) 煤骨架不可压缩,其应变也是无穷小的;
- 5) 甲烷可视为理想气体;
- 6) 煤层始终处于恒定载荷,且存在单轴的轴向应力。

1.2 控制方程

1.2.1 温度场

假定煤层处于热平衡状态,则温度场的控制方程可忽略机械能和热能之间热量交换^[11]。

$$\frac{\partial \left((\rho c_p)_c T \right)}{\partial t} + \eta \nabla T - \nabla \cdot (\lambda_c \nabla T) + K \alpha_T T \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial T} = Q_{ht} \quad (1)$$

式中: $(\rho c_p)_c$ 为流固混合比热容, $J/(m^3 \cdot K)$; T 为煤层温度, K ; t 为时间, s ; η 为对流系数, $J/(m^2 \cdot s)$; λ_c 为流固混合导热系数, $W/(m \cdot K)$; K 为煤体体积模量, MPa ; α_T 为热膨胀系数, K^{-1} ; ε_s 为 CH_4 吸附/解吸引起的应变; Q_{ht} 为热源项。

瓦斯抽采过程中热量的变化主要源于气体解吸所释放的热量,则热源可用等量吸附热与煤基质吸附/解吸质量表示^[12]:

$$Q_{ht} = q_{st} \frac{\rho_c \rho_{ga}}{M_c} \frac{\partial V_c}{\partial t} \quad (2)$$

式中: q_{st} 为气体等量吸附热, J/mol ; ρ_{ga} 为标准状况下气体密度, kg/m^3 ; M_c 为 CH_4 摩尔质量, kg/mol ; V_c 为单位质量煤基质吸附/解吸体积, m^3/kg ; ρ_c 为煤层密度, kg/m^3 。

在 CBM 开采的过程中,煤层温度与压力均处于动态变化状态,则基质孔隙内部的 CH_4 吸附

体积为^[13]

$$V_c = \frac{n_m b p_m}{1 + b p_m} \exp\left(\frac{-c_1(T - T_{cr})}{1 + c_2 p_m}\right). \quad (3)$$

式中: n_m 为极限吸附量, m^3/t ; b 为Langmuir压力常数, MPa^{-1} ; p_m 为基质 CH_4 压力, MPa ; c_1 为温度修正系数, K^{-1} ; c_2 为压力修正系数, MPa^{-1} ; T_{cr} 为气体解吸参考温度, K .

流固相混合比热容可用煤层裂隙率、各相比热容与密度表示^[14].

$$(\rho_c c_p)_c = (1 - \phi_f) \rho_c c_s + \phi_f \rho_g c_L. \quad (4)$$

式中: ρ_g 为 CH_4 密度, kg/m^3 ; c_s 和 c_L 分别为煤骨架和 CH_4 比热容, $J/(kg \cdot K)$; ϕ_f 为煤层裂隙率.

对流系数可用 CH_4 渗流速度、 CH_4 比热容与 CH_4 密度三者乘积表示,且依假设条件(4),裂隙系统内部 CH_4 渗流速度可由线性达西定律表征.

$$u = -\frac{k}{\mu} \nabla p_f, \quad (5)$$

$$\eta = -\frac{k}{\mu} \nabla p_f \rho_g c_L. \quad (6)$$

式中: u 为 CH_4 渗流速度, m/s ; k 为煤层渗透率, cm^2 ; p_f 为裂隙 CH_4 压力, MPa ; μ 为 CH_4 动力黏度, $Pa \cdot s$.

流固相混合导热系数与混合比热容表现形式较为相似,均可用煤层裂隙率与各相导热系数进行表述.

$$\lambda_c = (1 - \phi_f) \lambda_s + \phi_f \lambda_g. \quad (7)$$

式中: λ_s 和 λ_L 分别为煤骨架和 CH_4 导热系数, $W/(m \cdot K)$.

将式(2)~(7)代入式(1)中可得到温度场控制方程:

$$\begin{aligned} & \left[(1 - \phi_f) \rho_s c_s + \phi_f (\rho_g c_L) \right] \frac{\partial T}{\partial t} + K a_T T \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} = \\ & \nabla \cdot \left\{ \left[(1 - \phi_f) \lambda_s + \phi_f \lambda_g \right] \nabla T \right\} + \frac{k}{\mu} \nabla p_f \rho_g c_L \nabla T - \\ & q_{st} \frac{\rho_c \rho_{ga}}{M_c} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{n_m b p_m}{1 + b p_m} \exp\left(\frac{-c_1(T - T_{cr})}{1 + c_2 p_m}\right) \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

1.2.2 气体流动场

在CBM开采过程中,基质孔隙气体压力相较于裂隙气体压力下降存在滞后效应,造成基质孔隙与裂隙系统存在较大的浓度差异,在这种浓度梯度作用下基质与裂隙系统发生质量交换行为,可由质量守恒方程对其进行定量表征^[15].

$$\frac{\partial m_m}{\partial t} = -\frac{M_c}{\tau R T} (p_m - p_f). \quad (9)$$

式中: m_m 为单位体积基质孔隙内 CH_4 质量, kg/m^3 ; R 为通用气体常数, $J/(mol \cdot K)$; τ 为吸附时间, s .

煤层基质孔隙内 CH_4 通常以吸附态和游离态同时存在,可由式(10)对其质量进行表征^[16].

$$m_m = \frac{n_m b p_m}{1 + b p_m} \exp\left(\frac{-c_1(T - T_{cr})}{1 + c_2 p_m}\right) \frac{M_c}{V_m} \rho_c + \phi_m \frac{M_c}{R T} p_m. \quad (10)$$

式中: V_m 为标况下 CH_4 的摩尔体积, m^3/mol ; ϕ_m 为煤层孔隙率.

随着CBM开采的进行,煤裂隙系统内部的 CH_4 在压力梯度的作用下运移至钻孔并排出煤层,另一方面基质孔隙内的 CH_4 在浓度梯度的作用下运移至裂隙系统,充当其正质量源.由质量守恒定律,二者之间的差异应等于单位时间内裂隙系统内部 CH_4 质量变化量.

$$\frac{\partial m_f}{\partial t} = \frac{M_c}{\tau R T} (1 - \phi_f) - \nabla \cdot (\rho_g u). \quad (11)$$

式中: m_f 为单位体积裂隙系统内部 CH_4 质量, kg/m^3 .

结合式(4)和(8)~(11)可得到煤层流动场的控制方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{n_m b p_m}{1 + b p_m} \exp\left(\frac{-c_1(T - T_{cr})}{1 + c_2 p_m}\right) \frac{M_c}{V_m} \rho_c + \phi_m \frac{M_c}{R T} p_m \right] = \\ & -\frac{1}{\tau} \frac{M_c}{R T} (p_m - p_f); \\ & p_f \frac{\partial \phi_f}{\partial t} + \phi_f \frac{\partial p_f}{\partial t} - \nabla \cdot \left(p_f \frac{k}{\mu} \nabla p_f \right) = \\ & \frac{1}{\tau} (p_m - p_f) (1 - \phi_f). \end{aligned} \quad (12)$$

1.2.3 应力场

应力作用是研究煤层渗透率演化规律不可忽略的重要因素之一.为了还原煤层真实的应力状态,可将应力场控制方程定义为由温度、有效应力和气体吸附/解吸效应耦合作用引起的应变的形式^[17].

$$\begin{aligned} & G u_{i,jj} + \frac{G}{1 - 2\nu} u_{j,ji} - \beta_i p_{f,i} - \beta_m p_{m,i} - \\ & K \varepsilon_s - K \varepsilon_T + F_i = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

式中: G 为煤体剪切模量, MPa ; ν 为煤体泊松比; β_m 和 β_f 分别为基质与裂隙的有效压力系数; ε_T 为由温度引起的应变; F_i 为体积力, MPa .

1.2.4 渗透率方程

渗透率演化模型作为多物理场耦合模型的关键因素,会随着煤层温度和压力的变化而变化.本文依据现有的SD渗透率模型^[18],将渗透率演化定义为有效应力、气体吸附/解吸效应及热膨胀三者共同控制的形式.

$$\frac{k}{k_0} = \exp \left\{ -3C_f \left[-\frac{v}{1-v} [\beta_f(p_f - p_0) + \beta_m(p_m - p_0)] + \frac{E\alpha_T}{3(1-v)}(T - T_0) + \frac{Ef\epsilon_L}{3(1-v)} \left[\frac{bp_m}{1+bp_m} \exp \left(\frac{-c_1(T - T_{er})}{1+c_2p_m} \right) - \frac{bp_0}{1+bp_0} \right] \right] \right\} \quad (14)$$

式中： C_f 为煤层压缩系数； p_0 为煤层初始压力，MPa； f 为内部膨胀系数； ϵ_L 为 Langmuir 应变常数。

1.3 模型验证

为准确验证多物理场全耦合模型的有效性，选取中国沁水盆地 SX006-1 生产井于 2012 年 1 月至 2013 年 2 月(约 400 d)的压力随时间变化的数据^[19]。依据 Su 等建立的物理模型及其参数设置开展研究。图 1 为现场测试数据与模拟结果的匹配结果。从图中可以看出，现场测试数据与模拟结果匹配度较高，表明多物理场全耦合模型能够较好描述 CBM 开采过程中参数的演化规律。

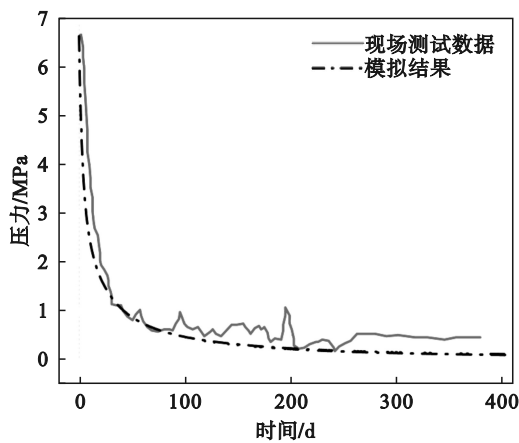


图 1 现场测试数据与模拟结果的匹配结果

Fig. 1 Matching results between field test data and simulation results

2 渗透率回弹和恢复理论分析

一般情况下，随着 CBM 开采的进行，压力和温度均处于减小的状态。因而随着开采时间的增加，有效应力对其渗透率的演化表现为负效应，相反地，吸附/解吸效应和热应力对渗透率的演化表现为正效应。

在 CBM 开采初期，裂隙与基质孔隙内部的动态平衡($p_m = p_f = p_0$)被打破，由于基质孔隙内的压力变化速度远小于裂隙系统内压力变化速

度，二者压力状态在极短时间内将会演化为 $p_0 = p_m > p_f$ 的状态。且此时温度变化梯度较小，因而渗透率的演化主要受有效应力控制，进而引起渗透率的下降。将储层初始参数代入式(14)中可得到：

$$\frac{k}{k_0} = \exp \left\{ -3C_f \left[-\frac{v}{1-v} [\beta_f(p_f - p_0)] + \frac{E\alpha_T}{3(1-v)}(T - T_0) \right] \right\} < 1. \quad (15)$$

在 CBM 开采末期，裂隙系统内和基质孔隙内的气体压力都将演化至接近 0 的状态($p_m = p_f = 0$)，此时温度变化梯度也将大于开采初期，将储层初始参数代入式(14)中可得到：

$$\frac{k}{k_0} = \exp \left\{ -3C_f \left[-\frac{v}{1-v} [-\beta_f p_0 - \beta_m p_0] + \frac{Ef\epsilon_L}{3(1-v)} \left[-\frac{p_0}{p_0 + p_L} \right] + \frac{E\alpha_T}{3(1-v)}(T - T_0) \right] \right\} > 1. \quad (16)$$

式(16)表明，在抽采末期，解吸效应与热膨胀对渗透率耦合的积极效应要高于有效应力的消极效应，且最终煤层渗透率值明显高于初始渗透率。这一系列现象说明在整个 CBM 开采过程中，渗透率呈现出先下降后上升的演化趋势，存在回弹与恢复现象，其规律如图 2 所示。

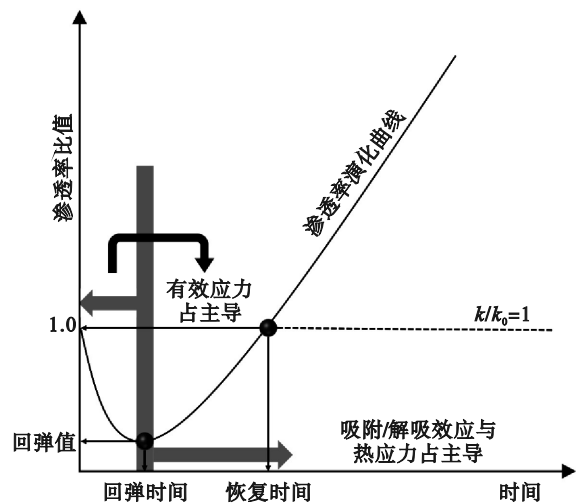


图 2 渗透率回弹与恢复时间示意图

Fig. 2 Schematic diagram of permeability rebound and recovery time

3 吸附热效应作用下回弹和恢复现象演化特征

3.1 模型描述及输入参数

为探究考虑瓦斯吸附/解吸热条件下渗透率回弹和恢复的演化特征,利用所建立多物理场全耦合模型对整个 CBM 开采气体运移过程进行模拟研究.其中煤层物理模型尺寸为 20 m×5 m;气体流动边界设置为:四周均为零通量边界,钻

孔处为恒定负压(83 kPa)条件;应力边界条件设置为:顶部施加边界载荷条件,左右两端施加辊支撑边界条件,底端施加固定约束条件;温度边界条件设置为:四周及钻孔处均为零通量边界.数值模拟所选取的参数如表 1 所示.设定固定点 A(8,2.5),C(14,2.5),D(16,2.5)和 B(19,2.5)用于研究煤层渗透率回弹和恢复现象在时间尺度上动态演化规律,如图 3 所示.

表 1 数值模型所需参数^[10,14,20-22]
Table 1 Parameters required in the numerical simulation model

参数	值	参数	值
煤层初始压力 p_0/MPa	6.6	吸附时间 τ/s	844 345
杨氏模量 E/MPa	2 713	CH_4 摩尔质量 $M_c/(\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1})$	0.016
基质杨氏模量 E_m/MPa	8 139	CH_4 动力黏度 $\mu/\text{Pa}\cdot\text{s}$	1.08×10^{-5}
煤层压缩系数 C_f/MPa^{-1}	0.139 2	CH_4 导热系数 $\lambda_g/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.031
煤层密度 $\rho_c/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 250	煤骨架导热系数 $\lambda_s/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.191
气体常数 $R/(\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	8.314	CH_4 等量吸附热 $q_{st}/(\text{J}\cdot\text{mol}^{-1})$	2 100
极限吸附量 $n_m/(\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1})$	20	Langmuir 压力常数 b/MPa^{-1}	1
煤骨架比热容 $c_s/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	1 350	Langmuir 应变常数 ε_L	0.126 6
泊松比 ν	0.35	CH_4 比热容 $c_L/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	2 160
初始渗透率 k_0/cm^2	4.935×10^{-12}	内部膨胀系数 f	0.1
初始裂隙率 ϕ_f	0.005	初始孔隙率 ϕ_m	0.05

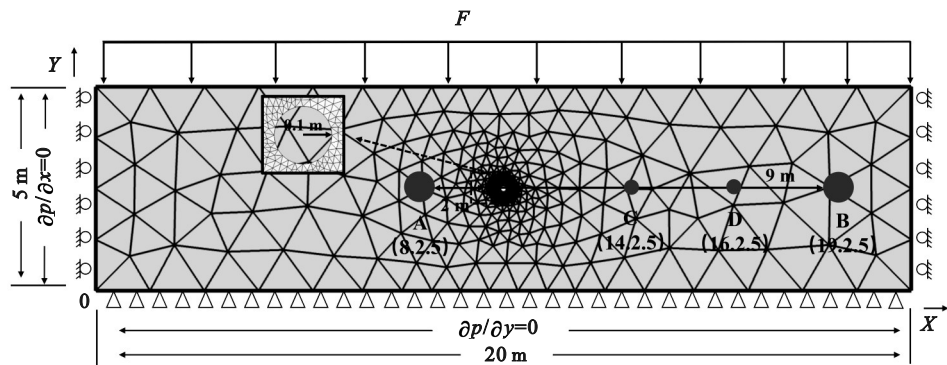


图 3 物理模型及其边界条件

Fig. 3 Physical model and boundary conditions

3.2 单一瓦斯吸附热因素作用

为探究在考虑吸附热效应作用下渗透率对吸附热效应影响因素的响应特征及研究的便捷性,本文将吸附热定义为如下形式^[23]:

$$Q_{st} = q_{st} V_c = q_{st} \frac{n_m b p}{1 + b p} \exp\left(\frac{-c_1(T - T_{cr})}{1 + c_2 p_m}\right). \quad (17)$$

从式(17)可以看出,影响吸附热效应的主要因素为等量吸附热及吸附量,本文将从等量吸附热及吸附量两方面进行探究,采用控制变量的方法设计如表 2 所示的 3 种模拟方案.

3.2.1 等量吸附热

为探究等量吸附热与渗透率回弹和恢复现象的关系,选取 3 种不同等量吸附热条件下监测点 A 处渗透率演化与时间的规律进行分析(方案 3).

图 4 详尽描述了不同等量吸附热条件下渗透率随时间的演化规律.其表现为在各种等量吸附热条件下均呈现出先下降后上升的趋势.直接表明在考虑煤层气吸附/解吸热效应的情况下,渗透率演化过程中存在回弹与恢复现象,印证了前文

所述结论.但不同等量吸附热作用下渗透率回弹和恢复特性均表现出差异性.为量化表征此差异特征,分别将不同监测点处渗透率回弹时间及A点处渗透率恢复时间与等量吸附热的关系绘制于图5.

表2 单因素条件下模拟方案
Table 2 Simulation scheme under single factor condition

方案	$n_m/(m^3 \cdot t^{-1})$	b/MPa^{-1}	$q_{st}/(J \cdot mol^{-1})$
1	20	1	2 100
	40		
	60		
2	20	2	2 100
		3	
3	20	1	2 100
			2 600
			3 100

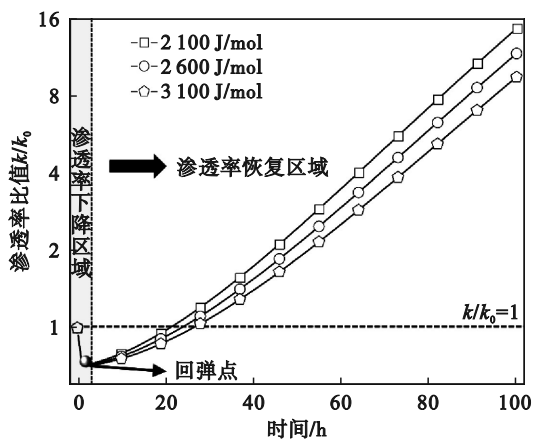


图4 不同等量吸附热条件下监测点处渗透率演化规律
Fig. 4 Permeability evolution patterns at monitoring points under different isochoric adsorption heat conditions

图5明显地展现出无论与钻孔距离如何,渗透率回弹时间均随等量吸附热的增加而增加的趋势,同样地,A点处渗透率恢复时间表现为相同的趋势.上述现象是由于等量吸附热主要表征基质吸附/解吸过程中吸收/释放的热量,其对煤层温度演化具有重要的影响,在CBM开采过程中,等量吸附热的提高使得煤层在同等抽采时间内温度下降更多,进而导致热效应对渗透率作用增强.

渗透率恢复时间演化规律与渗透率回弹值大小存在一定关联性,图6描述了不同等量吸附热条件下回弹值的演化规律,可发现随等量吸附热增大,渗透率回弹值呈现减小的趋势,这也导

致了恢复至初始状态所需要时间的延长.且随着气体吸附/解吸与热应力协同效应的减弱,进而导致恢复时间增量亦呈现增大的趋势.

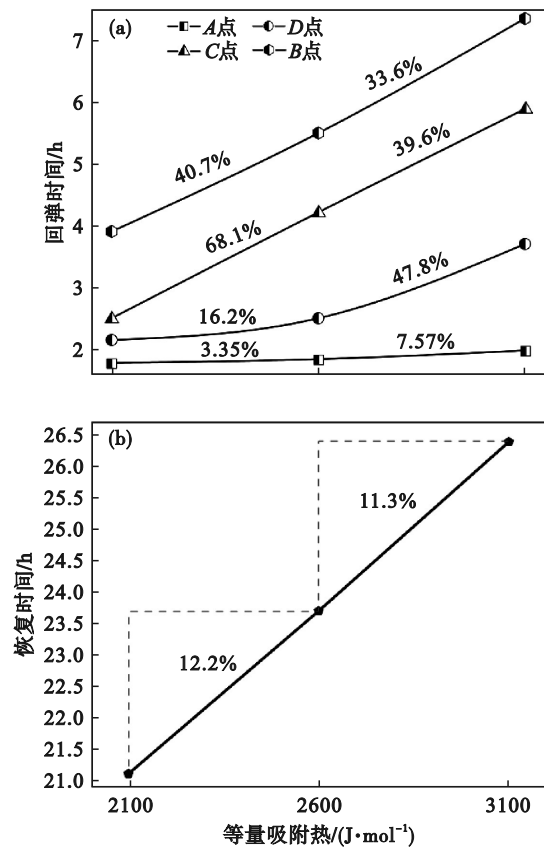


图5 渗透率回弹和恢复时间与等量吸附热的关系
Fig. 5 Relationship between permeability rebound and recovery time and isochoric adsorption heat

(a)—回弹时间; (b)—恢复时间.

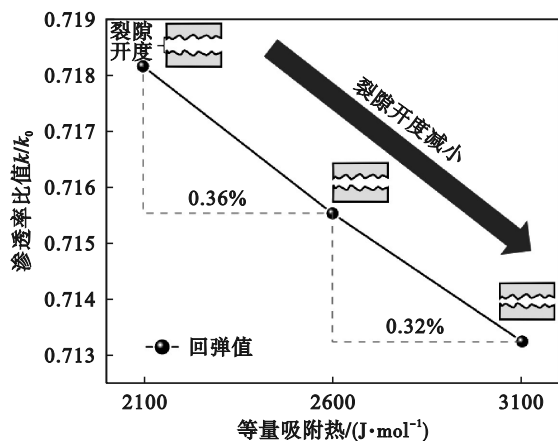


图6 不同等量吸附热条件下监测点A处的回弹值
Fig. 6 Rebound value at monitoring point A under different isothermal adsorption conditions

3.2.2 Langmuir常数

Langmuir常数是衡量煤基质吸附性能的重要参数,为探究其对渗透率回弹和恢复现象的影

响,分别选取不同 Langmuir 常数进行数值模拟研究(方案 1,2),并绘制不同 Langmuir 常数情况下渗透率随时间的演化规律,如图 7 所示。

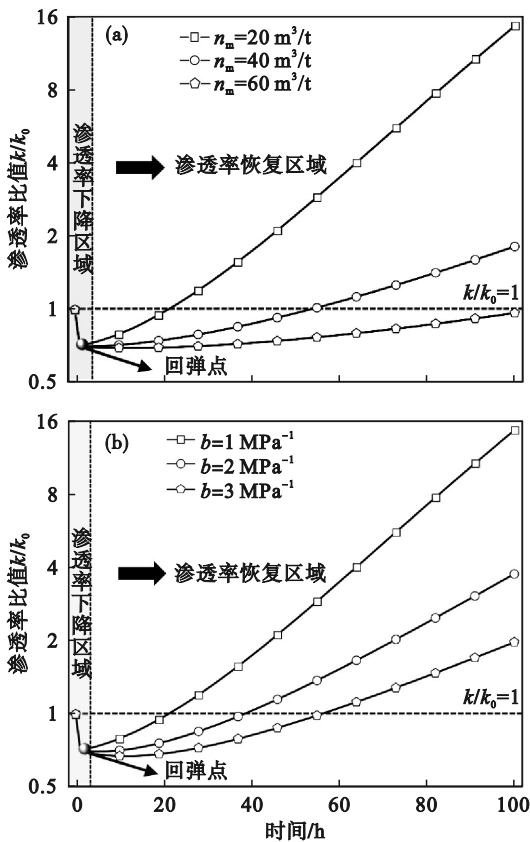


图 7 A 点处渗透率随时间变化

Fig. 7 The change of permeability with time at point A (a)—极限吸附量; (b)—Langmuir 压力常数。

图 7 清晰显示了随极限吸附量/Langmuir 压力常数的增加,渗透率出现较为明显的下降趋势,且均能够出现渗透率回弹和恢复现象。为弄清渗透率回弹和恢复现象随 Langmuir 常数的演化特征,分别将监测点处渗透率回弹和恢复时间与 Langmuir 常数的关系绘制于图 8 和图 9。

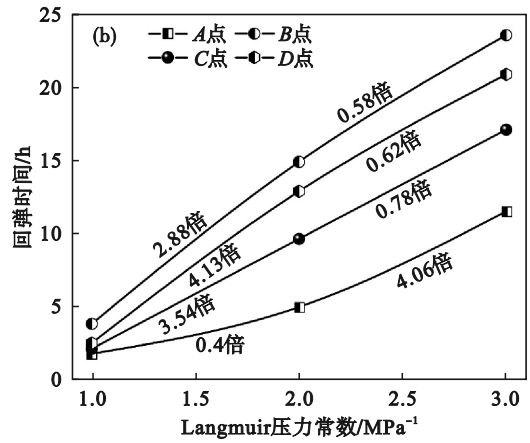


图 8 渗透率回弹时间演化

Fig. 8 Permeability rebound time evolution (a)—极限吸附量; (b)—Langmuir 压力常数。

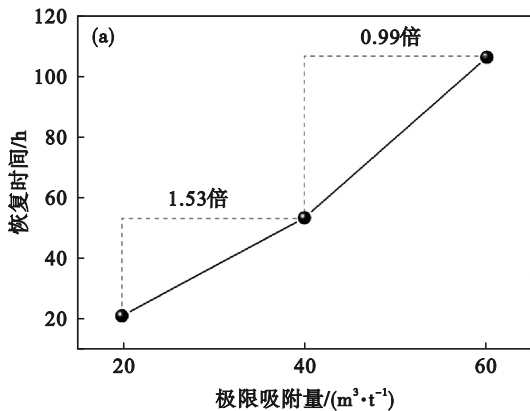


图 9 渗透率恢复时间演化

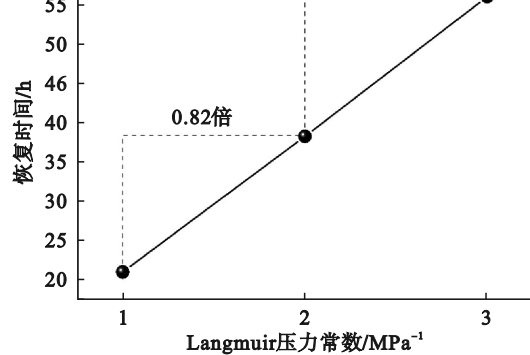
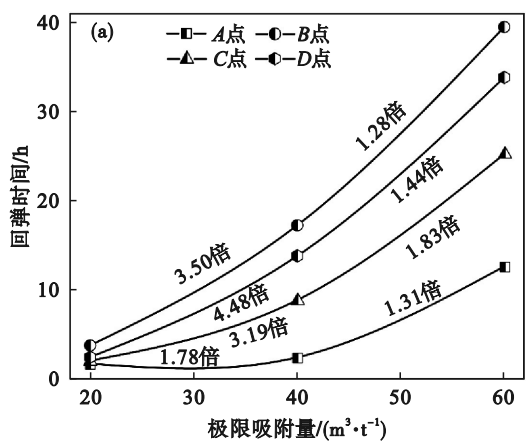


Fig. 9 Permeability recovery time evolution (a)—极限吸附量; (b)—Langmuir 压力常数。



由图 8 可明显发现,渗透率回弹时间随极限吸附量的增加呈现出延长的趋势,但对不同常数的响应特征存在略微的差异。回弹时间对极限吸附量的响应特征曲线呈现“凹”形,具体表现为先缓慢上升后快速上升的趋势,这表明随着极限吸附量的增加渗透率回弹时间将会呈现激增的状态;回弹时间对 Langmuir 压力常数的响应曲线则呈现“凸”形,表明在其增加至一定值后对渗透率回弹时间几乎无影响。此外,随着距钻孔距离的

增加,回弹时间整体呈现延长的趋势。

恢复时间变化情况与回弹时间类似,均表现为随Langmuir常数的增加而上升的趋势,且渗透率恢复时间对不同Langmuir常数的响应特征也呈现出类似的趋势,见图9.表现为随Langmuir常数的增加恢复时间先快速增加再缓慢增加的趋势,其增长倍数逐渐降低.具体表现为当极限吸附量分别为20,40和60 m³/t时,其恢复时间分别为21.06,53.29和106.04 h.同样地,当Langmuir压力常数分别为1,2和3 MPa⁻¹时,渗透率恢复时间为21.06,38.23和55.97 h.表明Langmuir常数在增加到一定数值后,其对渗透率恢复时间的影响将会演化至较低水平。

这些现象表明吸附性能对渗透率的回弹和恢复现象影响较大,但在其增加至一定数值后,其对渗透率恢复现象的影响较低.值得注意的是,极限吸附量对回弹现象演化特征存在较大的影响,在其增加至一定数值后,渗透率回弹时间呈现激增的趋势,而Langmuir压力常数无此趋势。

3.3 多瓦斯吸附热因素耦合作用

依据上文的研究可发现,单一吸附热参数对渗透率回弹和恢复在时间尺度上的演化规律存在影响,但在CBM开采过程中吸附热效应参数往往不是以单一形式作用,为探究多因素耦合作用下吸附热效应对渗透率回弹和恢复演化特征的作用程度,设计如表3所示的3种模拟方案。

表3 多因素耦合条件下模拟方案

Table 3 Simulation scheme under multiple factor coupling condition

方案	$n_m/(m^3 \cdot t^{-1})$	b/MPa^{-1}	$q_m/(J \cdot mol^{-1})$
1	20	1	2 100
2	40	2	4 200
3	60	3	6 300

为探究多瓦斯吸附热效应因素耦合作用下渗透率演化差异,采用方案1和2进行数值研究,提取监测点A处渗透率随时间的演化数据,绘制于图10中。

图10清晰显示出在不同吸附热参数耦合作用下,渗透率呈现出随抽采时间的延长的趋势,但在同等时刻下方案1的(吸附热效应较小)渗透率比值明显高于方案2(吸附热效应较高),且二者渗透率比值差距逐渐增大。

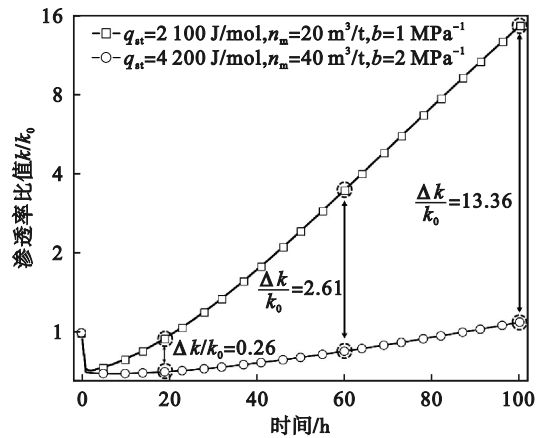


图10 监测点A处渗透率演化差异

Fig. 10 Differences in permeability evolution at monitoring points A

上述现象可归因于,当吸附热水平较低时,温度演化同样处于较低水平,导致煤基质内部气体解吸量明显大于吸附热水平较高的情况(图11a).这进一步促进基质收缩变形,使得裂隙开度增大,提高了渗透率水平.上述现象表明,吸附热水平过高会限制渗透率发展。

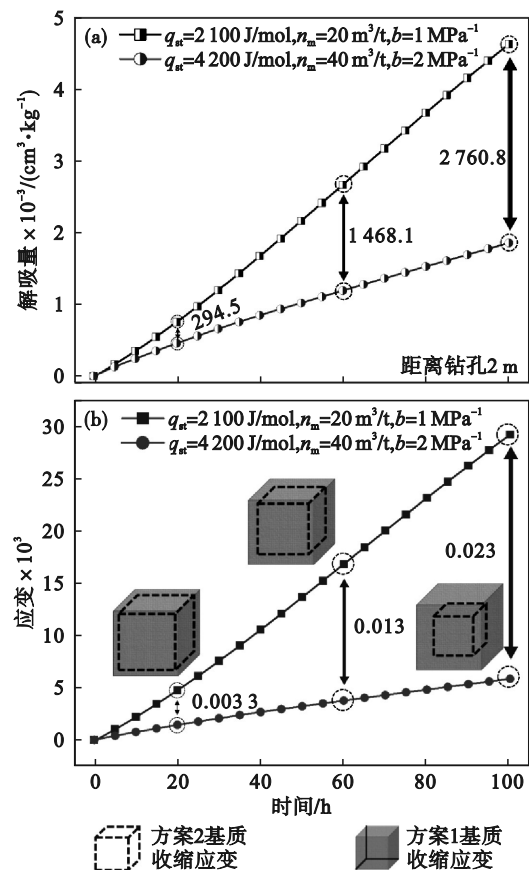


图11 监测点A解吸量及应变量差异

Fig. 11 Differences in desorption and strain at monitoring point A

(a)—解吸量; (b)—应变。

通过上述分析,二者渗透率回弹和恢复的演化特征也存在较大的差异性,为准确量化此种差异,采用方案 1,2 和 3 进行数值模拟研究,分别绘制监测点 A 与 B 处 3 种情况下渗透率回弹和恢复时间差异曲线,如图 12 所示.

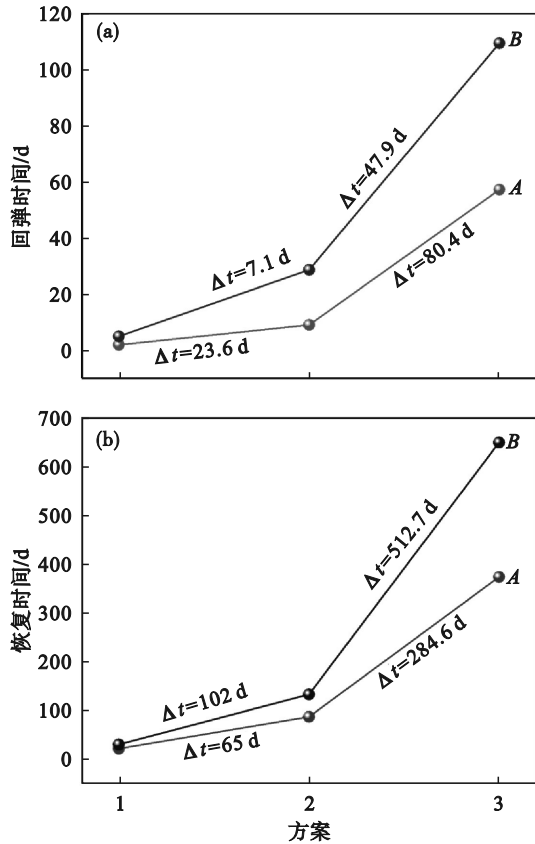


图 12 不同监测点处回弹和恢复时间差异

Fig. 12 Differences in rebound and recovery time at different monitoring points

(a)—回弹时间; (b)—恢复时间.

图 12 清晰地显示出在 CBM 开采过程中,回弹时间与恢复时间均表现出随吸附热效应剧烈程度的增加渗透率回弹和恢复时间呈现出延长的趋势.更确切地说,在监测点 A 处方案 1~3 的回弹时间分别为 2, 9.1 和 57 h,恢复时间分别为 22.9, 87.9 和 372.5 h;在监测点 B 处回弹时间分别为 5, 28.6 和 109 h,恢复时间分别为 31.5, 133.5 和 646.2 h.且不同监测点回弹和恢复时间对吸附热效应的敏感程度不同,具体表现为距钻孔较远,其敏感性降低.这一系列现象表明,吸附热效应对恢复时间的作用程度明显高于回弹时间,且距钻孔越近越易受吸附热效应影响.

3.4 吸附热效应对瓦斯抽采量的影响

瓦斯抽采量同样可作为评价 CBM 开采效果的指标之一,从上文所述结果来看,在考虑吸附热效应的情况下渗透率回弹和恢复时间的演化

规律随参数的增加呈现滞后的特征,因而在同等时间下瓦斯抽采量也存在显著差异,为厘清两种情况下瓦斯抽采量的差异性,分别记录同等初始条件下考虑与未考虑吸附热效应抽采 1 150 min 的抽采量数据,见图 13.

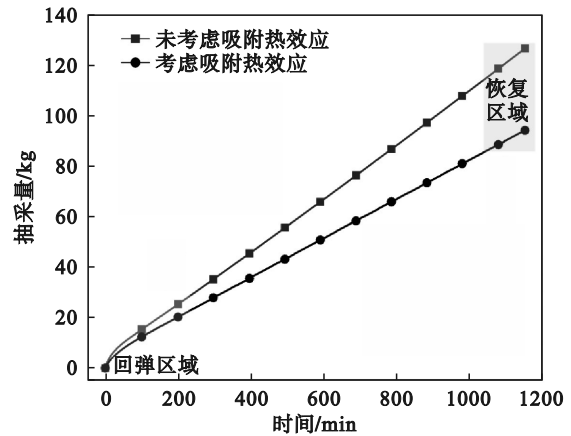


图 13 考虑与未考虑吸附热效应抽采量差异

Fig. 13 Difference of extraction capability with and without adsorption thermal effect

随着抽采时间的延长,二者抽采量差异越来越大,表明在未考虑吸附热效应的情况下会高估瓦斯抽采量,且从图 13 中可以发现,在二者相对应的回弹和恢复区域内瓦斯流量相差一个数量级左右,若未考虑吸附热效应将会高估渗透率回弹和恢复带来的瓦斯流量增量.

4 结 论

1) 渗透率的演化是由有效应力、气体吸附/解吸和热应力三者控制,而在瓦斯吸附热效应作用下,由于开采过程中煤层温度的下降导致气体吸附/解吸效应和热应力协同作用引起的体应变明显降低,进而渗透率回弹和恢复时间呈现出随等量吸附热和 Langmuir 常数升高而延长的趋势.

2) 在不同等量吸附热与吸附性能参数耦合作用下,渗透率回弹和恢复现象在时间尺度上随吸附热效应的剧烈程度呈现出延长的趋势,且距钻孔越近越容易受到吸附热效应的影响.

3) 随着 CBM 开采的进行,未考虑吸附热效应的瓦斯抽采量明显高于考虑吸附热效应的瓦斯抽采量,且二者差距随时间的延长逐渐增大.另一方面,前者的渗透率回弹和恢复时间早于后者,进而导致二者在相应的回弹和恢复区域内瓦斯流量存在一个数量级左右的差异.表明前者会高估渗透率回弹和恢复带来的瓦斯增量.

参考文献:

- [1] Liang W G, Yan J W, Zhang B N, et al. Review on coal bed methane recovery theory and technology: recent progress and perspectives [J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35 (6): 4633-4643.
- [2] Pillalamarri M, Harpalani S, Liu S M. Gas diffusion behavior of coal and its impact on production from coalbed methane reservoirs [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 86(4): 342-348.
- [3] 张惜图, 胡胜勇, 武玺, 等. 煤粉侵入对支撑裂缝渗透率的动态影响规律 [J]. *煤炭学报*, 2024, 49(5): 2338-2346. (Zhang Xi-tu, Hu Sheng-yong, Wu Xi, et al. Dynamic influence of coal fine intrusion on propped fracture permeability [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49 (5): 2338-2346.)
- [4] 王家臣. 我国综放开采 40 年及展望 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 83-99. (Wang Jia-chen. 40 years and prospect of fully mechanized mining in China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 83-99.)
- [5] Mastalerz M, Drobnik A. 5-coalbed methane: reserves, production, and future outlook [M]// Letcher T M. *Future energy* (3rd ed). New York: Elsevier, 2020: 97-109.
- [6] Wang H, Wang E Y, Li Z H, et al. Study on sealing effect of pre-drainage gas borehole in coal seam based on air-gas mixed flow coupling model [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 136: 15-27.
- [7] Palmer L, Mansoori J. How permeability depends on stress and pore pressure a new model [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 1998, 1(6): 539-544.
- [8] Chen Y X, Liu D M, Yao Y B, et al. Dynamic permeability change during coalbed methane production and its controlling factors [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 25: 335-346.
- [9] Liu Z D, Cheng Y P, Wang L, et al. Analysis of coal permeability rebound and recovery during methane extraction: implications for carbon dioxide storage capability assessment [J]. *Fuel*, 2018, 230: 298-307.
- [10] Su E L, Liang Y P, Zou Q L, et al. Numerical analysis of permeability rebound and recovery during coalbed methane extraction: implications for CO₂ injection methods [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 149 (4): 93-104.
- [11] Wang J L, Lian W H, Li P, et al. Simulation of pyrolysis in low rank coal particle by using DAEM kinetics model: reaction behavior and heat transfer [J]. *Fuel*, 2017, 207: 126-135.
- [12] 郝建峰. 基于解吸热效应的煤与瓦斯热流固耦合模型及其应用研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021. (Hao Jian-feng. Study on the thermo-hydro-mechanical coupling model of coal and gas based on the desorption thermal effect and its application [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.)
- [13] Teng T, Wang J G, Gao F, et al. A thermally sensitive permeability model for coal-gas interactions including thermal fracturing and volatilization [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 32: 319-333.
- [14] 凡永鹏, 霍中刚, 王永. 基于流-固-热耦合的 CO₂-ECBM 数值模拟研究 [J]. *煤矿安全*, 2022, 53(2): 162-169. (Fan Yong-peng, Huo Zhong-gang, Wang Yong. Numerical simulation of CO₂-ECBM based on fluid-solid-thermal coupled model [J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53 (2): 162-169.)
- [15] Li S, Fan C J, Han J, et al. A fully coupled thermal-hydraulic-mechanical model with two-phase flow for coalbed methane extraction [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 33: 324-336.
- [16] Wang G, Wang K, Jiang Y J, et al. Reservoir permeability evolution during the process of CO₂-enhanced coalbed methane recovery [J]. *Energies*, 2018, 11(11): 2996.
- [17] Liu Z D, Cheng Y P, Liu Q Q, et al. Numerical assessment of CBM drainage in the remote unloaded coal body: insights of geostress-relief gas migration and coal permeability [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 45: 487-501.
- [18] 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.
- [19] Pan Z J, Connell L D. Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 92: 1-44.
- [20] Zhang H B, Liu J S, Elsworth D. How sorption-induced matrix deformation affects gas flow in coal seams: a new FE model [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(8): 1226-1236.
- [21] Zhao Y, Lin B Q, Liu T, et al. Gas flow in hydraulic slotting-disturbed coal seam considering stress relief induced damage [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 75: 103160.
- [22] Yang R, Ma T R, Xu H, et al. A model of fully coupled two-phase flow and coal deformation under dynamic diffusion for coalbed methane extraction [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 72: 103010.
- [23] 李海鉴. 煤吸附瓦斯的热效应研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019. (Li Hai-jian. Study on thermal effect of methane adsorption in coal [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.)