

引用格式: 施雷庭, 赵启明, 任镇宇, 等. 煤岩裂隙形态对渗流能力影响数值模拟研究[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(4): 424-432.
SHI Leiting, ZHAO Qiming, REN Zhenyu, et al. Numerical simulation study on the influence of coal rock fracture morphology on seepage capacity[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(4): 424-432.
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.04.003

煤岩裂隙形态对渗流能力影响数值模拟研究

施雷庭¹, 赵启明^{1,2}, 任镇宇³, 朱诗杰⁴, 朱珊珊¹

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500; 2. 重庆能源职业学院, 重庆 402260;
3. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100016; 4. 重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆 401331)

摘要: 煤岩内发育的裂隙网络是气体运移的主要通道, 影响煤储层的渗流能力, 裂隙网络的几何特征对煤层气流动特性具有重要影响。以保德区块煤样为研究对象, 利用 COMSOL Multiphysics 模拟软件, 建立了煤岩二维裂隙网络模型, 研究裂隙长度、密度、开度和角度等因素对产量影响, 为提高煤层气产量提供理论指导。研究结果表明: 裂隙形态因素影响关系为长度、密度、开度越大, 与流动方向夹角越小, 煤岩渗流能力越强。但随着长度、密度与开度的增加, 流量增幅变缓, 继续增加单一因素提高煤层气开采效果不显著且成本难以控制。各因素的增长对出口流量的影响程度中, 角度、密度影响效果大于长度和开度。考虑地面定向井+高压水力切割方法提高煤层气开发效率。利用定向井眼和水力缝槽沟通天然裂缝系统, 充分利用平行面割理方向渗透率优势; 高压水力切割过程中诱导煤层产生裂隙, 增加导流通道数量与连通性, 有助于提高煤层气产量。

关键词: 煤层气; 裂隙形态; 数值模拟; 渗流能力; COMSOL Multiphysics 模拟软件

中图分类号: TE37

文献标识码: A

Numerical simulation study on the influence of coal rock fracture morphology on seepage capacity

SHI Leiting¹, ZHAO Qiming^{1,2}, REN Zhenyu³, ZHU Shijie⁴, ZHU Shanshan¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Development Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Chongqing Energy College, Chongqing 402260, China; 3. China United Coalbed Methane Corp. Ltd., Beijing 100016, China; 4. School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: The fracture network developed in coal rock serves as the primary channel for gas migration, significantly influencing the seepage capacity of coal reservoir. The geometric characteristics of fracture plays a crucial role on determining the flow characteristics of coal-bed methane. To study this, a two-dimensional fracture network model of coal rock was established using COMSOL Multiphysics simulation software, focusing on the coal samples of Baode block as the research subject. The effects of fracture length, density, opening degree and angle on production were investigated, providing valuable theoretical guidance for enhancing coal-bed methane production. The results indicate that fracture length, density, and opening degree have a positive correlation with the seepage capacity of coal rock, while the angle with the flow direction negatively impacts it. However, with the increase of length, density and opening degree, the improvement in flow rate slows down, and the effect of increasing single factor to improve coal-bed methane mining can be neglected, making it difficult to control the cost-benefit ratio. Among the factors influencing outlet, angle and density exert a more significant effect than length and opening degree. Considering the surface

收稿日期: 2023-03-31。

第一作者简介: 施雷庭 (1976—), 男, 博士, 教授, 从事提高采收率技术与教学研究。地址: 四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学, 邮政编码: 610500。E-mail: slting@swpu.edu.cn

通信作者简介: 赵启明 (1994—), 男, 硕士, 讲师, 从事提高采收率技术与教学研究。地址: 重庆市江津区双福新区福星大道2号, 邮政编码: 402260。E-mail: zhaoqm.eor@qq.com

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目“煤岩裂隙形态对渗流能力影响机理及模型构建”(KJQN202305603); 重庆市教育委员会科学技术研究项目“近井地带对入井工作液的剪切机制及数学模型构建”(KJQN202301518)。

directional well plus the high pressure hydraulic cutting method, we can enhance the efficiency of coalbed methane development. This approach connects the natural fracture system using directional borehole and hydraulic slot, fully utilizing the permeability advantage of parallel surface cutting direction. The high-pressure hydraulic cutting process induces cracks in the coal seam, increasing the number and connectivity of diversion channels, thereby bolstering the production of coal-bed methane.

Keywords: coal-bed methane; fracture morphology; numerical stimulation; seepage capacity; COMSOL Multiphysics simulation software

随着煤层气产能需求的增加以及开发技术的进步,如何提高单井的产气量是煤层气开发中的关键问题^[1]。煤岩由微孔隙和天然裂隙组成,形成了具有割理系统的孔隙-裂隙系统^[2-3],其中裂隙系统是煤层气在煤层中的主要渗透路径^[4]。煤岩中裂隙结构复杂多样,煤层气渗流能力受控于煤岩内部的裂隙结构特征,以致煤层气开采过程中存在大量难以解释的可变性。因此,清晰地认识裂隙结构形态特征与煤层气渗流特性的关系,对指导煤层气开采具有重要意义。

国内外学者对煤层气渗流行为进行深入研究,普遍认为煤层瓦斯流动是渗流和扩散共同作用的结果^[5-7]。游离煤层气受抽采压力影响沿裂隙通道流向低压区,基质内部吸附煤层气则在质量浓度差作用下解吸向裂隙扩散,受压力影响流出裂隙,因此,天然裂隙发育程度是影响煤层气产能的主要因素^[8-10]。煤岩的裂隙系统将煤分割成许多小的煤岩基质,煤岩基质中则包含有大量的孔隙^[11],如何通过简化理想模型,展现煤储层孔隙-裂隙系统流动状态,如何直观、有效地表征煤岩裂隙特征和渗流能力关系,对研究煤层气流动特性至关重要。

通过保德煤样渗流能力实验,研究了渗透率与裂隙开度之间的关系。通过孔隙-裂隙双重介质特性,构建了煤岩中不同形态裂隙结构的二维双重介质模型,运用COMSOL Multiphysics 模拟软件,实现了煤层气在二维裂隙网络结构中的渗流模拟,研究了裂隙形态中裂隙长度、密度、开度和角度因素对渗流能力的影响。

1 实验研究与模型分析

1.1 裂隙的渗流能力实验

应力大小影响煤储层中裂隙的闭合程度,应力越大,裂隙开度越小^[12]。而煤储层的特殊结构,导致煤岩中普遍发育不同方向的裂隙,在不同应力作用下,呈现不同的渗流能力。选取储层压力介于

2.56 ~ 12.00 MPa,压力系数介于0.70 ~ 0.99的保德地区8+9号煤岩样品,分别从平行裂隙、垂直裂隙方向的煤岩上钻取(图1),制备直径 ϕ 为25 mm,长 L 为70 mm的实验煤样。

研究煤岩来自保德地区太原组8+9号可采煤层^[13],埋藏深度介于300 ~ 800 m。煤岩样品呈黑色,条痕颜色为棕黑—黑色,弱玻璃光泽,线理结构,层状及块状构造,裂隙较发育,密度介于4 ~ 7条/4 cm。处理后的煤样编号标记见表1。

1.1.1 实验内容及步骤

通过外加轴压、围压的作用,模拟不同方向裂隙开度的变化,测试垂直裂隙方向和平行裂隙方向的煤样渗透率变化规律。分析不同煤样裂隙及裂隙方向与渗透率关系。

采用稳态测量法测试标准煤样在应力状态下的渗透性能。实验温度为25 °C,在固定气压的条件下,按梯度逐级改变压力。具体实验步骤如下:

1) 在压力加载装置中加入准备好的加工煤样,并进一步检查好实验系统的气密性,采用真空泵连续抽真空2 h。

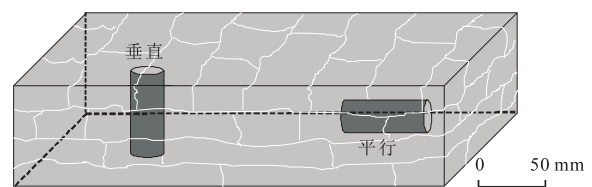


图1 煤岩割理结构及取样方式

Fig. 1 Coal rock Cleavage structure and sampling method

表1 样品来源及编号

Table 1 Source and Identification Number of the Samples

测试内容	样品编号	样品尺寸	来源	裂隙方向
不同轴压 加载	cz-8	$\phi 25 \text{ mm} \times L70 \text{ mm}$	8+9号煤层	垂直裂隙
	px-8		8+9号煤层	平行裂隙
不同围压 加载	cz-9	$\phi 25 \text{ mm} \times L70 \text{ mm}$	8+9号煤层	垂直裂隙
	px-9		8+9号煤层	平行裂隙

2) 设置煤样施加轴压 1 MPa, 然后分别由 1、3、6、9、12 MPa 梯度逐级加载围压, 按 0.8 MPa 压力注入氦气。

3) 为减小滑脱效应对煤样渗透率的影响, 在实验过程中保持驱替压力不变, 每个应力点维持足够长时间后(应力上升时间为 30 min, 下降时间为 1 h) 测定岩样在该应力点下渗透率值。

4) 测定完毕后加载下一级应力, 重复步骤 2—3。

5) 当应力达到最大值时, 按梯度逐级卸载围压, 并在气流流量稳定后, 记录数据, 计算渗透率。

6) 上述步骤完毕后, 更换煤样, 对煤样施加预定的围压 1 MPa, 然后分别由 1、3、6、9、12 MPa 梯度逐级加载轴压, 重复步骤 1—5, 直至完成所有的渗流实验。

1.1.2 实验结果

1) 轴压对煤样渗透率的影响

通过加、卸载轴压煤样渗透率结果数据, 类比平

行裂隙煤岩样品与垂直裂隙煤岩样品, 如图 2 所示。

随着轴压的增加, 实验煤样的渗透率均呈现下降趋势。轴压介于 1~6 MPa 阶段, 渗透率出现明显下降趋势, 6~12 MPa 阶段, 渗透率下降趋势减缓。

加载过程中, cz-8 煤样渗透率由 $0.52 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 降至 $0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, px-8 煤样渗透率由 $1.75 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 降至 $1.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。平行裂隙煤样初始渗透率比垂直裂隙煤样初始渗透率高, 平行裂缝与渗流方向一致时, 流体沿着裂缝流动的渗流能力更强。

2) 围压对煤样渗透率的影响

通过加、卸载围压煤样渗透率结果数据, 类比平行裂隙样品与垂直裂隙样品, 如图 3 所示。

图 3 中随着围压的增加, 实验煤样的渗透率均呈现有规律地下降。围压介于 1~6 MPa 阶段, 渗透率下降速度快, 6~12 MPa 阶段, 渗透率下降速度缓慢。

加载过程中, cz-9 煤样渗透率由 $0.60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 降至 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, px-9 煤样渗透率由 $1.93 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 降至 $0.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。平行裂隙煤样初始渗透率比垂

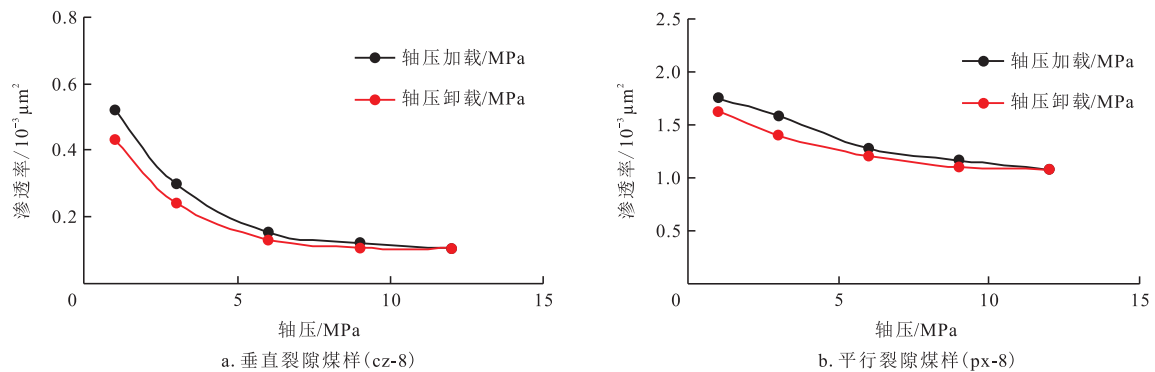


图2 煤样加、卸载过程渗透率与轴压关系

Fig. 2 Relationship between permeability and axial compression of coal during loading and unloading

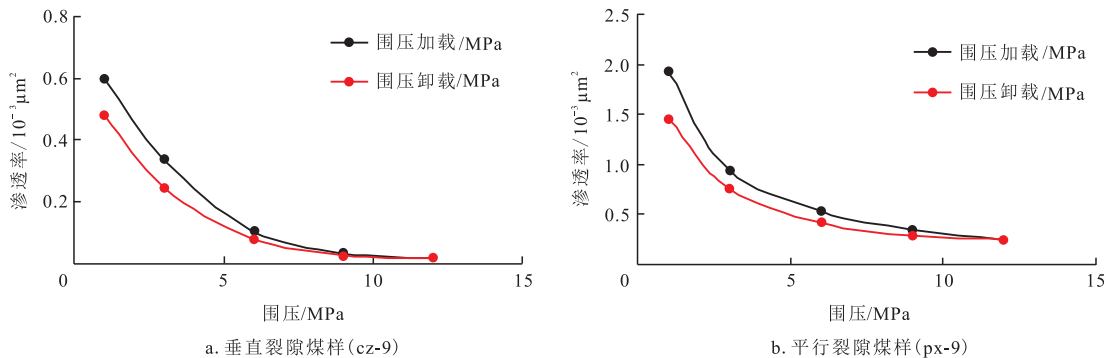


图3 煤样加、卸载过程渗透率与围压关系

Fig. 3 Relationship between permeability and ambient pressure of coal during loading and unloading

直裂隙煤样初始渗透率高,流体沿着平行裂缝流动的渗流能力更强。

1.1.3 实验渗流影响分析

基于实验研究发现,受到力的作用影响时,作用于平行裂隙的力导致裂隙闭合,开度变小,导致流体流通通道减小,影响煤样的渗透性。

大量的裂隙切割煤储层,裂隙相互交错形成割理网络系统,裂隙相互垂直,改变裂隙开度其渗透率的变化可以由式(1)表示^[14]:

$$K_z = K_{0x} \left(1 - \frac{\Delta b_x}{b_{0x}} \right)^3 + K_{0y} \left(1 - \frac{\Delta b_y}{b_{0y}} \right)^3 \quad (1)$$

式中: K_z 为开度增量导致渗透率的变化,压应变为正,拉应变为负,单位 m^2 ; Δb_x 、 Δb_y 分别为平行裂隙、垂直裂隙开度增量,单位 μm ; K_{0x} 为初始应力条件下平行裂隙的初始渗透率,单位 m^2 ; K_{0y} 为初始应力条件下垂直裂隙的初始渗透率,单位 m^2 ; b_{0x} 为平行裂隙的初始平均法向开度,单位 μm ; b_{0y} 为垂直裂隙初始平均法向开度,单位 μm 。

式(1)表明:渗透率受到裂隙开度的影响而发生变化,与渗流介质无关。裂隙开度与渗透性之间的关系对于煤岩具有重要意义,且能通过渗透率表征平行于面割理与垂直于面割理方向施加不同大小压

力,改变的裂隙开度大小。因此,研究煤层气的运移过程,需要通过煤层气的流动理论以及结合煤岩结构模型的特征,建立二维裂隙网络以及流动模型,分析煤层气在不同裂隙形态下的流动能力。

1.2 裂隙对渗流影响模拟

1.2.1 二维煤岩裂隙模型建立

运用COMSOL Multiphysics模拟软件,模拟煤层气在割理网络中的渗流行为,分析煤岩中煤层气运移规律。

根据孔隙-裂隙双重介质模型特征研究,将煤层气储层看作由基质系统和裂隙系统组成的双重介质,基质孔隙是煤层气主要的储存空间,割理组成的裂隙网络则是煤层气运移的主要渗流空间^[15-16]。孔隙和裂隙是煤层气储存与流动的2种重要结构,90%的煤层气以吸附状态赋存于基质孔隙表面^[17],开采煤层气的过程中,气体从煤岩流出的方式如图4所示^[18],气体首先通过解吸、扩散从基质孔隙内运移后汇入裂隙中,在裂隙中通过渗流方式流入井筒^[19-20]。因此,构建100 mm×50 mm的煤层气藏地质模型,研究煤岩渗流通道,有利于煤层气运移产出。其中蓝色线条代表一条长为25 mm的出口,模拟煤岩中的气体流动,上部灰色区域为纯基质区域。

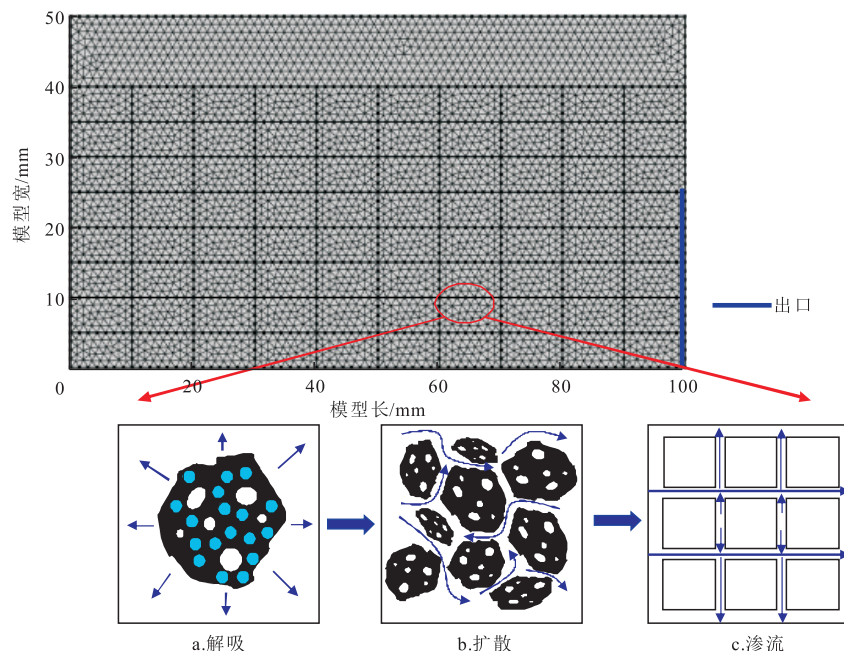


图4 解吸—扩散—渗流示意图

Fig. 4 Desorption-diffusion-seepage diagram

结合保德区块煤样特征,以及其他计算过程中可用到参数见表2。

煤层气藏分为基质系统和裂隙系统,气藏中同时存在于两个不同的流动场。

1) 基质系统流动模型

利用质量守恒定律及气相连续微分方程,建立煤层气气相流动模型^[21]:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \nabla(\rho_g v_g) - q_{mf} \quad (2)$$

式中: m 为基质中煤层气质量,单位kg; t 为时间,单位s; ρ_g 为煤层气密度,单位kg/m³; v_g 为基质系统中气体流量,单位μm²/(mPa·s); q_{mf} 为基质和孔隙之间的质量交换流量,单位kg/(m²·s)。

基质系统煤层气藏运动方程基于拟达西方程构建如下:

$$v_g = -k \frac{k_{rg}}{\mu_g} \nabla p_g \quad (3)$$

式中: k 为基质系统的绝对渗透率,单位m²; k_{rg} 为基质系统的气相相对渗透率; μ_g 为气相黏度,单位mPa·s; p_g 为基质中气相压力,单位MPa。

煤岩基质孔隙中,煤层气分为吸附态和游离态,则基质中的气体质量为两项相加,即:

$$m_g = m_f + m_{ad} \quad (4)$$

表2 参数采集

Table 2 Parameter collection

参数	符号	初始值	保德区块煤样特征
储层温度/K	T	304.6	
基质孔隙度	φ_m	0.047	煤孔隙度介于2.86%~6.52%,平均为4.69%
裂隙孔隙度	φ_f	0.005	
气相摩尔质量/(g/mol)	M_g	0.016	
普适气体常数/[J/(K·mol)]	R	8.314	
气相黏度/(mPa·s)	μ_g	0.022	
平行裂隙开度/mm	d_{px}	1	微裂隙开度约介于
垂直裂隙开度/mm	d_{cz}	1	0.5~1.5 mm
标准情况下气相密度/(kg/m ³)	ρ_{ga}	0.714	
兰氏压力/MPa	p_L	5.29	
兰氏体积/m ³	V_L	2.47×10 ⁻³	
煤层密度/(kg/m ³)	ρ_c	2.6×10 ³	
气体偏差因子	Z	1.032	
井底流压/MPa	p_w	5	
初始压力/MPa	p_0	12	储层压力介于2.56~12.00 MPa

式中: m_g 为基质中的气体质量,单位kg; m_f 为游离态气体质量,单位kg; m_{ad} 为吸附态气体质量,单位kg。

基质中游离态的气体质量为:

$$m_f = \rho_g \varphi_m = \frac{M_g}{RZT} p_g \varphi_m \quad (5)$$

吸附态的气体质量为:

$$m_{ad} = \rho_{ga} \rho_c (1 - \varphi_m) \frac{V_L p_g}{p_g + p_L} \quad (6)$$

式(5)一式(6)中: φ_m 为储层基质孔隙度; M_g 为气相摩尔质量,单位g/mol; R 为气体常数,单位J/(K·mol); Z 为气体偏差因子; T 为储层温度,单位K; ρ_{ga} 为标准气压下煤层气密度,单位kg/m³; ρ_c 为煤层密度,单位kg/m³; V_L 为兰氏体积,单位m³; p_L 为兰氏压力,单位MPa。

式(2)可变形为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho_g \varphi_m + \rho_{ga} \rho_c (1 - \varphi_m) \frac{V_L p_g}{p_g + p_L} \right] = \nabla(\rho_g v_g) + Q_g + q_{mf} \quad (7)$$

令孔隙压缩系数 $C_{fg} = \frac{1}{\varphi_m} \frac{\partial \varphi_m}{\partial p_g}$, 流度比 $\lambda_g =$

$k \frac{k_{rg}}{\mu_g}$, 式(7)中 $\nabla(\rho_g v_g) = \frac{M_g p}{RT Z} \nabla(\lambda_g \nabla p_g)$, 由于 ∇p_g 较小,忽略计算过程中 $(\nabla p_g)^2$ 项。因此,用复合函数的求导法则求解得基质系统煤层气藏单相流动模型为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial m_g}{\partial t} &= \frac{M_g}{RT} \left[\frac{\varphi_m}{Z} - \frac{p_g \varphi_m}{Z^2} \frac{\partial Z}{\partial p_g} + \frac{p_g}{Z} \frac{\partial \varphi_m}{\partial p_g} + \right. \\ &\quad \left. \rho_c p_a \frac{(1 - \varphi_m) V_L p_g}{(p_g + p_L)^2} - \rho_c p_a \frac{V_L p_g}{p_g + p_L} \varphi_m C_{fg} \right] \frac{\partial p_g}{\partial t} \\ &= \frac{M_g p}{RT Z} \nabla(\lambda_g \nabla p_g) + Q_g - q_{gmf} \quad (8) \end{aligned}$$

式(7)一式(8)中: Q_g 为基质中气体总流量,单位kg/(m²·s); p 为大气压强,单位MPa; p_a 为地层压力,单位MPa; q_{gmf} 为基质游离流量,单位kg/(m²·s)。

2) 裂隙系统流动模型:

其连续性方程为:

$$\frac{\partial m_g}{\partial t} = \frac{\partial(\rho_g v_g)}{\partial l} + q_{mf} \quad (9)$$

式中: l 为裂隙长度,单位m。

裂隙所占的体积较小,考虑单一变量,在计算时认为裂隙不可压缩,因此,式(9)左端简化求导可得:

$$\frac{\partial m_g}{\partial t} = \frac{M_g}{RT} \varphi_f \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{Z} \right) = \frac{M_g}{RT} \varphi_f \left[\left(\frac{1}{Z} - \frac{p}{Z^2} \frac{\partial Z}{\partial p} \right) \frac{\partial p}{\partial t} \right] \quad (10)$$

对式(9)右端进行简化: $v_g = \lambda_{fg} \frac{\partial p}{\partial l}$,由于裂隙中压力梯度即 $\frac{\partial p}{\partial l}$ 较小,因此,在计算过程中忽略简化后的 $(\frac{\partial p}{\partial l})^2$ 项,则裂隙系统的煤层气藏单相渗流微分方程为:

$$\frac{M_g}{RT} \varphi_f \left[\left(\frac{S_g}{Z} - \frac{p}{Z} \frac{\partial Z}{\partial p} \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{p}{Z} \frac{\partial S_g}{\partial t} \right] = \frac{M_g p}{RT Z} \frac{\partial}{\partial l} \left(\lambda_{fg} \frac{\partial p}{\partial l} \right) \quad (11)$$

式(10)一式(11)中: φ_f 为储层裂隙孔隙度; S_g 为含气饱和度; λ_{fg} 为裂隙中流度比。

1.2.2 影响因素设计

考虑到所有影响因素,研究发现裂隙的角度、长度、密度、开度等因素,直接影响着煤储层中流体的运移^[22-23]。在构建的二维双重介质模型中采用每4 cm裂隙条数来表示密度。

根据实际取样观察到裂缝密度,以及模拟研究中需要增加的数量,利用COMSOL Multiphysics 模拟软件构建长、宽均为10 cm的模型,分析不同裂隙形态对渗流能力的影响。为了探究压力分布,以及出口流量,分别对裂隙添加压力探针,以及对出口添加质量流量探针,如图5所示。

对煤岩缝网的关键参数进行敏感性分析,评价各参数对渗流能力效果的影响程度。在其他参数为最小值时,改变不同参数取值求解,取值参数如表3。

通过不同裂隙形态出口流量,分析裂隙对煤层气渗流的影响。

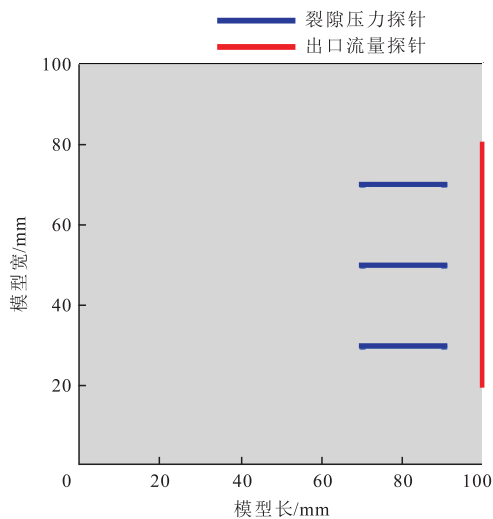


图5 裂隙及出口模拟

Fig. 5 Fracture and outlet simulation

2 结果与讨论

2.1 可靠性验证

通过模型求解,得到储层压力在不同时刻的分布情况,见图6。

模型中,气体既可以通过基质也可以通过裂隙向出口端渗流,由图6可知,初期压降方向主要以裂隙通道为主,整个模型中的压力变化随着裂隙渗流,基质气体向裂隙流动,储层压力降低。随着时间的推移,压力波逐渐向远处传递,但裂隙内的压力传播受到基质低渗透率的影响,导致压力波在储层内的传播较慢,1 000 s时变化趋于稳定。

为了验证模型准确性,由于面割理方向流动能力强,改变平行裂隙开度(0.5、1.0、1.5、2.0 mm),垂直裂隙开度为1.0 mm,求解时内边界采用定井底流压,外边界为定压边界。模拟1 000 s时压力分布变化规律,以及出口边界流量变化。

从图7中可以看出纯基质区域的压力波传播几乎没有变化,而平行裂隙的开度对煤层气藏开发状况有着较大的影响,裂隙的开度越大,气藏的压力下降越快。随着裂隙开度的增加,也会使得开发前期的吸附气解吸速度加快,导致压力降低幅度更大,传播更远。

通过图8流量变化可知,煤层中裂隙的闭合,造成渗透率的降低,减小了气体在孔隙和裂缝中的渗流速率,裂缝的渗流速率降低导致产气速率和产气量的下降。

裂隙开度变化对渗流影响模拟与加载实验值对比(图9),裂隙开度变化对流量影响与围压变化对渗透率影响曲线趋势一致,该模型能很大程度正确描述开度对煤层气开采效果的变化规律。

使用COMSOL Multiphysics 模拟软件求解煤岩裂隙中渗流的具体过程及其实现的可行性,为裂隙形态研究提供依据。

表3 取值参数
Table 3 Parameter of value

长度/cm	密度/(条/4 cm)	开度/mm	角度/(°)
2	1	0.5	0
4	3	1.0	45
6	5	1.5	90

2.2 裂隙对渗流影响模拟结果

2.2.1 裂隙长度

不同裂隙长度对应压力、流量变化如图10所示, 1 000 s时, 1条裂隙, 0.5 mm开度的水平裂隙下, 随着

裂隙长度增加, 压力沿着裂隙方向波及越远, 出口流量随长度的增加而增加。但长度为4 cm之后增加趋势变缓, 这是由于单裂隙条件下, 随着长度增加, 所能沟通的基质煤层气快速汇入裂隙区域提升效果不明显。即在煤层气开采的实际应用中, 为了满足单日井产量达到采出条件, 增加裂缝长度效果并不显著。

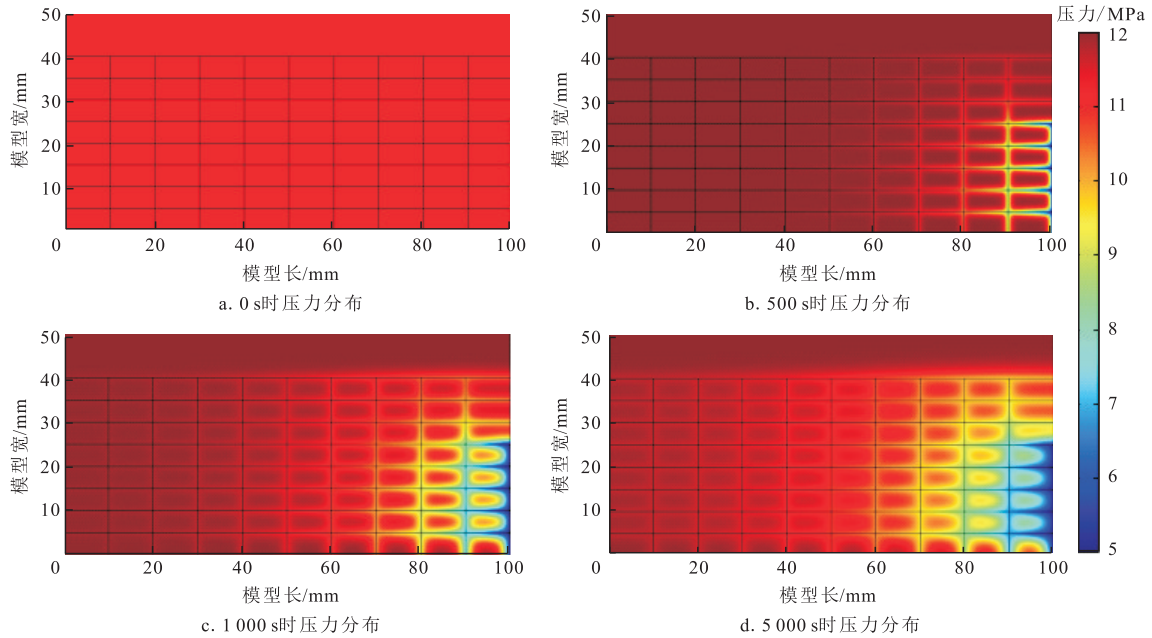


图6 双重介质模型压力分布演化过程

Fig. 6 Evolution process of pressure distribution in dual media model

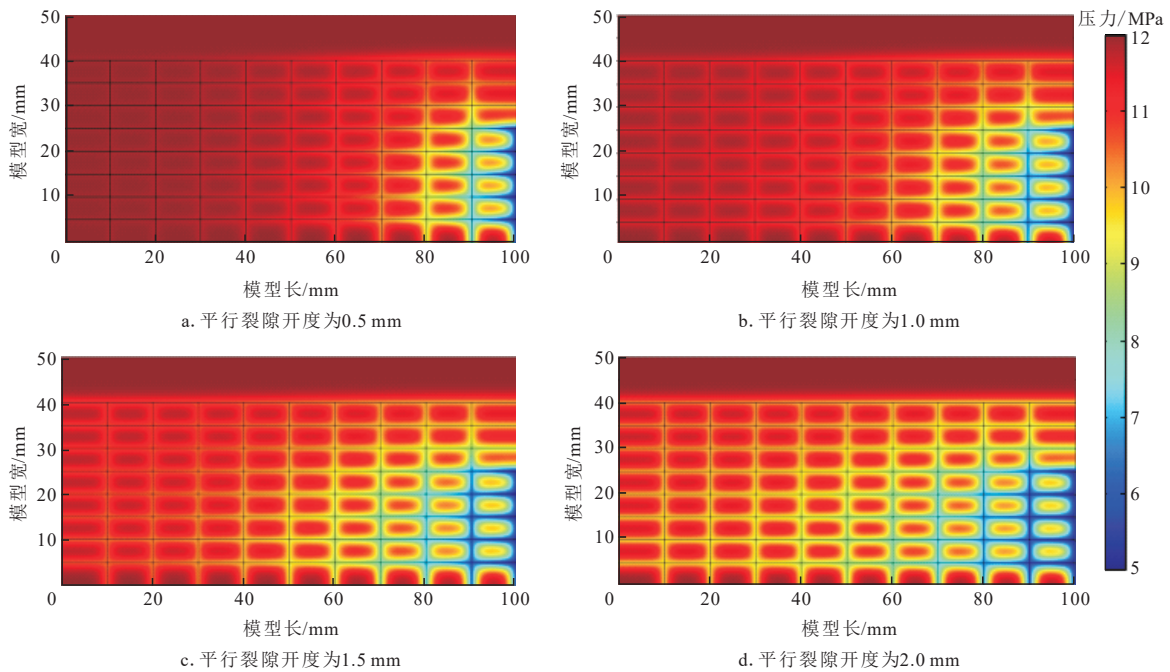


图7 不同平行裂隙开度在1 000 s时压力分布

Fig. 7 Pressure distribution of different parallel crack openings at 1 000 s

2.2.2 裂隙密度

1 000 s时,2 cm长,0.5 mm开度的水平裂隙下,不同裂隙密度对应压力分布如图11所示。由于1、2、3条/4 cm的裂隙不能有效判断密度对流量的增长趋势是否非线性增长,因此,需要增加裂隙数量。

随着裂缝条数的增多,密度变大,单位面积内裂

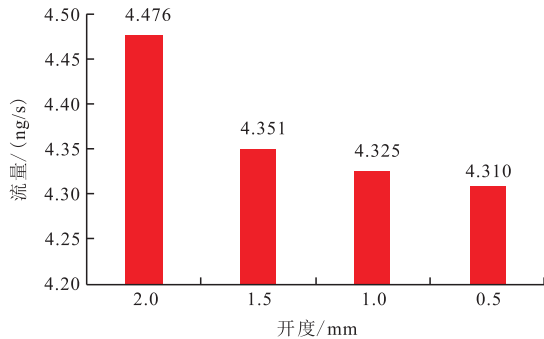


图8 不同平行裂隙开度的出口边界流量变化
Fig. 8 Variation in outlet boundary flowrate with different parallel fracture apertures

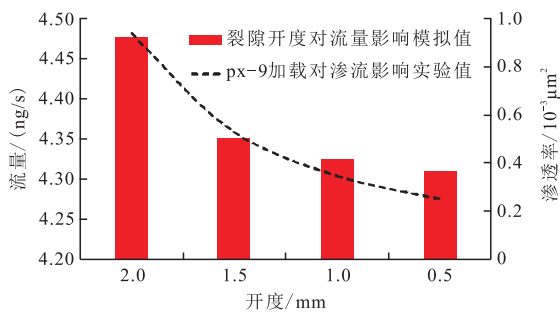


图9 裂隙开度变化对渗流影响模拟与加载实验值对比
Fig. 9 Simulation and experimental comparison of the influence of fracture aperture variation on permeation

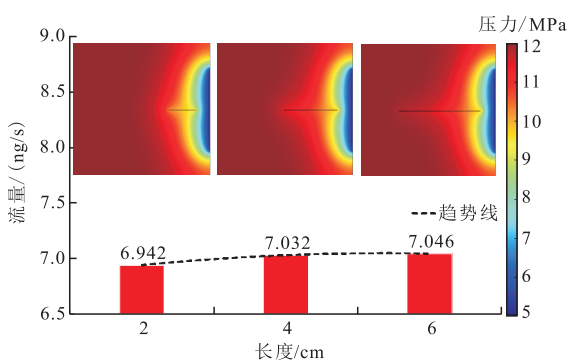


图10 不同裂隙长度对应压力及流量变化
Fig. 10 Pressure and flowrate variation corresponding to different fracture lengths

缝能够沟通的基质孔隙更多,增加了基质孔隙中气体的解吸面积,出口流量逐步提升。但随着裂缝数量的增多,对流量的增幅影响越来越弱,从曲线看出(图11),单位裂缝数量5至7条时增幅较低,因此,结合增幅程度、开发情况与经济效益,单位面积内,5条裂缝时对煤层气产量影响最好。

2.2.3 裂隙开度

不同裂隙开度对应压力及流量分布如图12所示,1 000 s时,1条2 cm长的水平裂隙下,随着裂隙开度的增加,压力波及面积增加不明显,出口流量则随开度的增加而缓慢增加。但裂隙开度的增大并不能沟通更多的基质煤层气快速汇入裂隙,导致后期开度变化缓慢。

2.2.4 裂隙角度

1 000 s时,针对裂隙密度1条/4 cm,长度2 cm,裂隙开度0.5 mm的情况,对应不同裂隙角度下,稳定

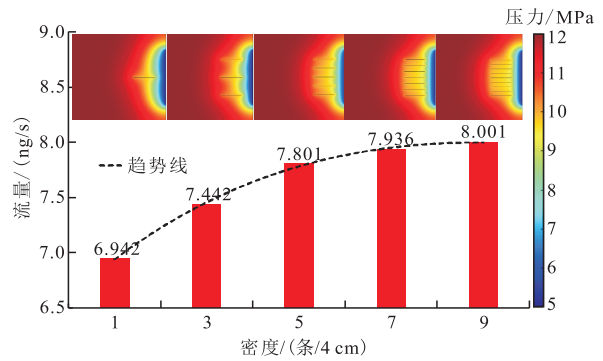


图11 不同裂隙密度对应压力及流量的变化
Fig. 11 Pressure and flowrate variation corresponding to different fracture densities

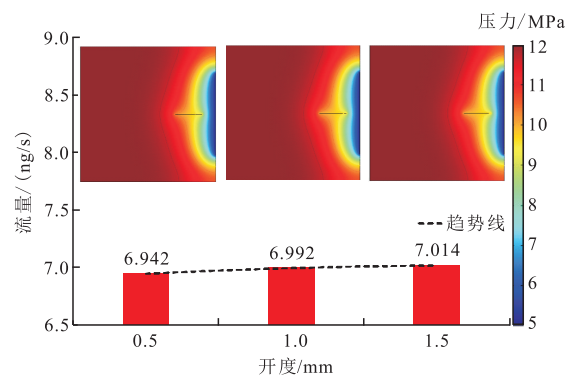


图12 不同裂隙开度对应压力及流量的变化
Fig. 12 Pressure and flowrate variation corresponding to different fracture apertures

期的压力、流量模拟,如图13所示。

随着裂隙角度的增加,压力沿着裂隙方向波及面积越小,这是由于裂隙与流体流动方向越大时,越可能阻碍流体运移。出口流量也随角度的增加而降低。但角度增至 90° 时,由于负压开采的低压区由基质传递至裂隙,导致裂隙能够沟通到更多的解吸区域,流量略微增大。在煤层气开采的实际应用中,开发方向应尽量满足裂隙方向,以保证流体运移与裂隙水平。

3 结论

1) 实验渗透率测试中,平行裂隙对渗透率的影响大于垂直裂隙。作用于平行裂隙的加载压力,会压缩煤岩裂隙,致使开度减小,渗透率下降。COMSOL Multiphysics 模拟中,平行面割理方向的渗透率远大于垂直面割理方向的渗透率,与实验一致。考虑在井网部署中使井网长轴方向平行于面割理方向,利用平行面割理方向渗透率优势,获得更好的开发效果。

2) 裂隙形态因素影响关系为长度越长、密度越大,开度越大,与流动方向夹角越小,出口流量越大。所构建模型中,裂隙长度增至4 cm、裂隙密度增至5条/4 cm,裂隙开度增至1.0 mm后,随着长度、密度与开度的增加,流量增幅变缓,影响程度有限。继续增加单一因素提高煤层气开采效果不显著且成本难以控制。

3) 各因素的增长对出口流量的影响程度中,角度、密度影响效果大于长度和开度。考虑地面定向井+高压水力切割方法提高煤层气开发。定向井跟

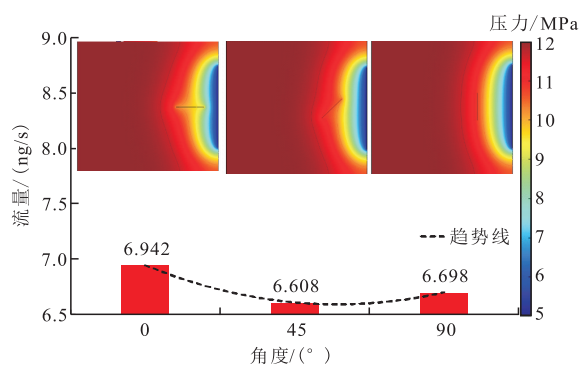


图13 不同裂隙角度对应压力及流量的变化

Fig. 13 Pressure and flowrate variation corresponding to different fracture angles

和水力缝槽沟通面割理方向天然裂缝系统,充分利用平行面割理方向渗透率优势;高压水力切割过程中诱导煤层产生裂隙,增加导流通道数量与连通性。

参考文献

- [1] 李勇,胡海涛,王延斌,等.煤层气井低产原因及二次改造技术应用分析[J].矿业科学学报,2022,7(1):55-70.
LI Yong, HU Haitao, WANG Yanbin, et al. Analysis of low production coalbed methane wells and application of secondary reconstruction technologies[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(1): 55-70.
- [2] WU Y, LIU J S, ELSWORTH D. Development of anisotropic permeability during coalbed methane production[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2010, 2(4): 197-210.
- [3] WU Y, LIU J S, ELSWORTH D, et al. Dual poroelastic response of a coal seam to CO_2 injection[J]. Greenhouse Gas Control, 2010, 4(4): 668-678.
- [4] 罗平亚.关于大幅度提高我国煤层气井单井产量的探讨[J].天然气工业,2013,33(6):1-6.
LUO Pingya. A discussion on how to significantly improve the single well productivity of CBM gas wells in China[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(6): 1-6.
- [5] 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.
- [6] GU F G, CHALATURNYK R. Permeability and porosity models considering anisotropy and discontinuity of coalbeds and application in coupled simulation[J]. Petroleum Science and Engineering, 2010, 74(3): 113-131.
- [7] THARAROOP P, KARPYN Z T, ERTEKIN T. Development of a multi-mechanistic, dual-porosity, dual-permeability, numerical flow model for coalbed methane reservoirs[J]. Natural Gas Science and Engineering, 2012, 8: 121-131.
- [8] 刘子雄.基于微地震向量扫描的煤层气井天然裂缝监测[J].煤田地质与勘探,2020,48(5):204-210.
LIU Zixiong. Microseismic vector scanning-based natural fracture monitoring of the coalbed methane wells[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(5): 204-210.
- [9] 刘世奇,王鹤,王冉,等.煤层孔隙与裂隙特征研究进展[J].沉积学报,2021,39(1):212-230.
LIU Shiqi, WANG He, WANG Ran, et al. Research progress on pore and fracture characteristics of coal seam[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 212-230.
- [10] 李祥春,高佳星,张爽,等.基于扫描电镜、孔隙-裂隙分析系统和气体吸附的煤孔隙结构联合表征[J].地球科学,2022,47(5):1876-1889.
LI Xiangchun, GAO Jiaying, ZHANG Shuang, et al. Combined characterization of scanning electron microscopy, pore and crack analysis system, and gas adsorption on pore structure of coal with different volatilization[J]. Earth Science, 2022, 47(5): 1876-1889.
- [11] PAN Z J, CONNELL L D. Modelling permeability for coal

(下转第458页)

- HE Shun, QIN Qirong, FAN Cunhui, et al. Shale gas preservation conditions in Dingshan area, Southeastern Sichuan [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(2): 24-31.
- [17] 姜磊, 邓宾, 刘树根, 等. 焦石坝—武隆构造带古流体活动差异及对页岩气保存条件的影响[J]. *地球科学*, 2019, 44(2): 524-538.
- JIANG Lei, DENG Bin, LIU Shugen, et al. Paleo-fluid migration and conservation conditions of shale gas in Jiaoshiba-Wulong Area[J]. *Earth Science*, 2019, 44(2): 524-538.
- [18] 黎琼, 欧光习, 汪生秀, 等. 渝东南地区五峰组—龙马溪组页岩气储层流体地球化学特征——以西参2井为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2019, 41(5): 529-540.
- LI Qiong, OU Guangxi, WANG Shengxiu, et al. Geochemical characteristics of fluid from shale gas reservoir of Wufeng-Longmaxi Formations in the Southeastern Chongqing, China: A case study of Well YC2[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2019, 41(5): 529-540.
- [19] 张光荣, 聂海宽, 唐玄, 等. 基于地层水指标的页岩气保存条件评价[J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(1): 47-55.
- ZHANG Guangrong, NIE Haikuan, TANG Xuan, et al. Evaluation of shale gas preservation conditions based on formation water index: A case study of Wufeng-Longmaxi Formation in Southeastern Chongqing[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(1): 47-55.
- [20] 何希鹏, 何贵松, 高玉巧, 等. 渝东南盆缘转换带常压页岩气地质特征及富集高产规律[J]. *天然气工业*, 2018, 38(12): 1-14.
- HE Xipeng, HE Guisong, GAO Yuqiao, et al. Geological characteristics and enrichment laws of normal-pressure shale gas in the basin-margin transition zone of SE Chongqing[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(12): 1-14.
- [21] 余光春, 魏祥峰, 李飞, 等. 上扬子地区断裂活动对页岩气保存的破坏作用[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(3): 355-362.
- YU Guangchun, WEI Xiangfeng, LI Fei, et al. Disruptive effects of faulting on shale gas preservation in upper Yangtze region[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(3): 355-362.

(编辑 常燕)

(上接第432页)

- reservoirs: A review of analytical models and testing data[J]. *Coal Geology*, 2012, 92(1): 1-44.
- [12] XUE J H, LI Y H, LI H B, et al. Experimental study on change mechanism of coal and rock permeability under total stress and strain condition[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(2): 33-37.
- [13] 张雷, 郝帅, 张伟, 等. 中低煤阶煤层气储量复算及认识——以鄂尔多斯盆地东缘保德煤层气田为例[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(1): 147-155.
- ZHANG Lei, HAO Shuai, ZHANG Wei, et al. Recalculation and understanding of middle and low rank coalbed methane reserves: A case study of Baode Coalbed Methane Field on the eastern edge of Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(1): 147-155.
- [14] MENG Z P, ZHANG J C, WANG R. In-situ stress, pore pressure and stress-dependent permeability in the Southern Qinshui Basin[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(1): 122-131.
- [15] WARREN J E, ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. *SPE Journal*, 1963, 3(3): 245-255.
- [16] ELSWORTH D, MAO B. Flow-deformation response of dual-porosity media[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1992, 118(1): 107.
- [17] 姚海鹏, 于东方, 李玲, 等. 内蒙古地区典型煤储层吸附特征[J]. *岩性油气藏*, 2021, 33(2): 1-8.
- YAO Haipeng, YU Dongfang, LI Ling, et al. Adsorption characteristics of typical coal reservoirs in Inner Mongolia[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2021, 33(2): 1-8.
- [18] 石军太, 李相方, 徐兵祥, 等. 煤层气解吸扩散渗流模型研究进展[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43(12): 1548-1557.
- SHI Juntai, LI Xiangfang, XU Bingxiang, et al. Review on desorption-diffusion-flow model of coal-bed methane[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2013, 43(12): 1548-1557.
- [19] 李前贵, 康毅力, 罗平亚. 煤层甲烷解吸—扩散—渗流过程的影响因素分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2003, 31(4): 26-29.
- LI Qiangui, KANG Yili, LUO Pingya. Analysis of the factors affecting processes of CBM desorption, diffusion and percolation [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2003, 31(4): 26-29.
- [20] 朱志良, 高小明. 陇东煤田侏罗系煤层气成藏主控因素与模式[J]. *岩性油气藏*, 2022, 34(1): 86-94.
- ZHU Zhiliang, GAO Xiaoming. Main controlling factors and models of Jurassic coalbed methane accumulation in Longdong coalfield[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022, 34(1): 86-94.
- [21] 刘继滨, 寇双燕, 刘继芹. 煤层气-水两相三孔介质渗流规律研究[J]. *石油化工应用*, 2017, 36(10): 14-19.
- LIU Gibin, KOU Shuangyan, LIU Jiqin. Study on coalbed methane-water two-phase seepage law in triple porosity medium[J]. *Petrochemical Industry Application* 2017, 36(10): 14-19.
- [22] 张玉柱. 基于裂隙网络图像的煤层气流动特性研究[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(9): 172-177.
- ZHANG Yuzhu. Study on coalbed methane flow characteristics based on fracture network image[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(9): 172-177.
- [23] XIA B W, LIU S W, OU C N, et al. Experimental study on mechanical properties of sandstone with single fracture under fully-mechanized top-coal caving mining stress path[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 95-105.

(编辑 李青)