



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020 年热点论文

《煤炭学报》2021 年第 1 期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

多层叠置煤层压裂裂缝纵向扩展模型与数值模拟

杨兆中¹, 张 丹¹, 易良平^{1,2}, 李小刚¹, 李 宇³

(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. 西南石油大学 机电工程学院, 四川 成都 610500; 3. 中海油能源发展股份有限公司, 天津 300452)

摘 要:水力压裂技术是高效开发多层叠置煤层的一种方式。在多层叠置煤层中,各层地应力、岩石力学性质等都存在差异,而这些差异会对水力裂缝纵向扩展产生较大影响。因此针对多层叠置煤层中水力裂缝纵向延伸问题,基于孔弹性理论和损伤力学建立了多层叠置煤层压裂裂缝纵向扩展模型,该模型假设仅当单元应变超过岩石的临界应变时才会造成损伤;通过对岩石的初始渗透率和裂缝渗透率进行加权求和来计算单元渗透率,其权重系数是裂缝宽度和单元尺寸的函数;在初始状态下,除裂缝单元外,其他单元均无损伤。采用有限元数值离散方法和 Newton-Raphson (NR) 迭代法建立了相应的数值求解迭代格式,并基于 MATLAB 软件编写了相应数值计算程序。基于建立的模型,研究了原位应力差、砂煤层界面强度、砂岩层(盖层)弹性模量和泊松比以及压裂液黏度对水力裂缝纵向延伸的影响。结果表明:原地应力差、界面强度越大,压裂缝穿过砂煤层界面并在砂岩层中扩展延伸的可能性越大;砂岩层弹性模量越大,裂缝穿层后延伸高度越大;压裂液黏度越大,压裂缝越容易穿过层间界面延伸到上下隔层;如果水力裂缝沿砂煤层界面扩展,则界面处的裂缝宽度远小于煤层中的裂缝宽度;沿砂煤层界面扩展时的水力裂缝缝内压力高于穿过砂煤层界面在砂岩层中扩展时的水力裂缝缝内压力。

关键词:多层叠置煤层;水力压裂;裂缝扩展;流固耦合;多层煤岩

中图分类号:P618.11;TE37

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2021)10-3268-10

Longitudinal propagation model of hydraulic fracture and numerical simulation in multi-layer superimposed coalbed

YANG Zhaozhong¹, ZHANG Dan¹, YI Liangping^{1,2}, LI Xiaogang¹, LI Yu³

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China)

Abstract: Hydraulic fracturing technology is a way to efficiently develop multi-layer superimposed coalbed reservoirs. Among the multi-layer coalbed superimposed reservoirs, compared with other rock layers, the interlayer stress, interface properties, and lithology of coal layer are quite different, which will have a great impact on hydraulic fracture propagation. Therefore, aiming at the problem of hydraulic fracture longitudinal propagation, a multi-layer superimposed coal layer hydraulic fracture longitudinal expansion mechanism model was developed based on the theory of pore elasticity and damage mechanics. In this approach, it assumes that the damage will only be caused when the element strain ex-

收稿日期:2020-07-27 修回日期:2020-10-06 责任编辑:郭晓炜 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2020.1261

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05044-004-002)

作者简介:杨兆中(1969—),男,四川泸州人,教授,博士生导师,博士。E-mail: yzzycl@vip.sina.com

通讯作者:易良平(1991—),男,四川泸州人,讲师。E-mail: ylpfrac@163.com

引用格式:杨兆中,张丹,易良平,等.多层叠置煤层压裂裂缝纵向扩展模型与数值模拟[J].煤炭学报,2021,46(10):3268-3277.

YANG Zhaozhong, ZHANG Dan, YI Liangping, et al. Longitudinal propagation model of hydraulic fracture and numerical simulation in multi-layer superimposed coalbed[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3268-3277.



移动阅读

ceeds the critical strain of the rock. The element permeability is the weighted summation of initial rock permeability and fracture permeability, and the weight coefficient is a function of fracture width and element size. In the initial state, all elements except the fracture elements have no damage. The finite element numerical discretization method and Newton-Raphson (NR) iterative method were used to establish the corresponding numerical solution iteration format, and the corresponding numerical calculation program was written by MATLAB. The model was used to examine the influences of in-situ stresses difference, interface strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio of sandstone layer (cap layer), and fracturing fluid viscosity on the longitudinal propagation of hydraulic fracturing. The results demonstrate that the larger in-situ stress difference, interface strength, and modulus of elasticity (sandstone layer), the higher probability of hydraulic fracture penetrates the sand coal layer interface and extends in the sandstone layer. High viscosity of the fracturing fluid will make it possible that the fracture extends through the interlayer interface to the upper and lower barriers. If the fracture propagation along the sand coal layer interface, the fracture width in the interface is much smaller than that in the coal. The pressure in the fracture that propagates along the sand coal layer interface is higher than the pressure of hydraulic fractures that cross the sand coal interface.

Key words: muti-layer superimposed coalbed; hydraulic fracture; fracture propagation; fluid-solid coupling; multilayer coal

鄂尔多斯盆地东缘临兴、滇东黔西等地区,煤层纵向叠置,具有多层、薄层、层间距小等特征,不同煤层的压力系数和渗透性质差异明显^[1-8]。这类地层中压裂缝高的合理控制对煤层气有效开采非常重要。

关于水力裂缝的纵向延伸问题,国内外运用物理实验和数值模拟开展了大量研究。物理实验表明,水力裂缝纵向扩展受层间应力差、弹性模量、界面强度、压裂液黏度等因素的影响,其中层间应力差为主要影响因素^[9-16]。目前常用的裂缝纵向扩展数值模拟方法有边界元法^[17]、有限差分法^[18-20]、位移不连续法^[21-22]、有限元法^[23-25]和扩展有限元法^[26]。这些方法在模拟裂缝延伸时需要预设裂缝扩展步长,且需要建立相交准则来判断裂缝扩展至界面后的延伸方向。而基于损伤力学建立的裂缝延伸模型则不需要预先设定裂缝延伸方向和相交准则,在处理裂缝延伸问题时不需要额外的规则来描述裂缝界面,裂缝延伸后不需要重新剖分网格。因此,笔者基于损伤力学建立了水力压裂裂缝纵向扩展流固耦合计算模型,基于该模型模拟多层叠置煤层中水力裂缝纵向延伸规律,分析多层叠置煤层压裂缝高的影响因素。

1 模型建立与求解

1.1 损伤演化模型

当材料受到单轴拉伸时可以将其损伤演化法^[27]则表示为

$$D = \begin{cases} 0 & \varepsilon \leq \varepsilon_c \\ 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon} [1 - A_1 + A_1 e^{-B_1(\varepsilon - \varepsilon_c)}] & \varepsilon > \varepsilon_c \end{cases} \quad (1)$$

式中, D 为损伤变量; ε 为应变; ε_c 为临界应变(材料

开始破坏时的应变); A_1, B_1 为材料拉伸系数。

1.2 控制方程

若忽略惯性力和体积力的影响,将饱和流体的多孔介质视为线弹性材料,则多孔弹性岩石的控制方程^[28]为:

(1) 应力平衡方程:

$$\nabla \sigma = 0 \quad (2)$$

式中, σ 为总应力张量,Pa。

对于完全饱和的多孔介质,根据孔弹性力学理论^[29],总应力 σ 和有效应力 σ_{eff} 以及孔隙流体压力 P 之间的关系可以表示为

$$\sigma = \sigma_{\text{eff}} - \alpha(D)IP \quad (3)$$

式中, I 为单位张量,二维情况下为 $[1 \ 1 \ 0]^T$; $\alpha(D)$ 为Biot孔弹性系数,其随岩石损伤演化而变化,即

$$\alpha(D) = 1 - K_D/K_s \quad (4)$$

式中, K_D 为多孔介质受损后的体积模量,MPa; K_s 为骨架颗粒的体积模量,MPa。

将式(3)代入式(2)可得应力平衡方程

$$\nabla(\sigma_{\text{eff}} - \alpha(D)IP) = 0 \quad (5)$$

式(5)对应的边界条件为

$$\begin{cases} u = \tilde{u}, \partial\Omega^u \\ \sigma n = t, \partial\Omega^t \end{cases} \quad (6)$$

其中, u 为位移(变量); $\tilde{u}$ 为边界处的位移值; n 为边界处的法线向量; t 为边界上的力; $\partial\Omega^u$ 为位移场 Dirichlet 边界; $\partial\Omega^t$ 为位移场 Neumann 边界。求解域的各边界满足式(7)关系:

$$\begin{cases} \partial\Omega = \partial\Omega^u \cup \partial\Omega^f \\ \partial\Omega^u \cap \partial\Omega^f = \emptyset \end{cases} \quad (7)$$

(2) 流体连续性方程:

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t} + \nabla v = 0 \quad (8)$$

式中, ζ 为流体体积增量, m^3 ; v 为流体流速, m^3/s 。

假设流体流动符合 Darcy 定律, 则流体体积增量和流速可表示为

$$\zeta = \frac{P}{M(D)} + \alpha(D)\varepsilon_v \quad (9)$$

$$v = -\frac{k}{\mu} \nabla P \quad (10)$$

式中, $M(D)$ 为 Biot 模量, Pa, 如式 (11) 所示; ε_v 为体积应变; k 为各向异性渗透率张量, m^2 ; μ 为流体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

$$M(D) = (K_u - K_D)/\alpha(D)^2 \quad (11)$$

其中, K_u 为不排水体积模量, 即岩石未损伤 (原始状态下) 的体积模量。将式 (9) 和 (10) 代入式 (8), 得到多孔弹性介质的流体连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{P}{M(D)} + \alpha(D)\varepsilon_v \right] - \nabla \left(\frac{k}{\mu} \nabla P \right) = 0 \quad (12)$$

式 (12) 对应的边界条件为

$$\begin{cases} P = \tilde{P}, \partial\Omega^p \\ \left(-\frac{k}{\mu} \nabla P \right) \cdot n = q, \partial\Omega^q \end{cases} \quad (13)$$

其中, q 为注入排量; $\partial\Omega^p$ 为压力场 Dirichlet 边界; $\partial\Omega^q$ 为压力场的 Neumann 边界。求解域的各边界满足:

$$\begin{cases} \partial\Omega = \partial\Omega^p \cup \partial\Omega^q \\ \partial\Omega^p \cap \partial\Omega^q = \emptyset \end{cases} \quad (14)$$

压裂过程中由于岩石破裂, 使得流体沿破裂面切向的流动能力大于沿破裂面法向的流动能力, 即地层岩石渗透率为各向异性。因此, 对于二维情况, 各向异性渗透张量可写为

$$k = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, k_x 为 x 方向的渗透率, m^2 ; k_y 为 y 方向的渗透率, m^2 。 k_x 和 k_y 是由岩石的初始渗透率和裂缝渗透率加权组成:

$$\begin{cases} k_x = k_{x0}(1 - W_x) + W_x k_{fx} \\ k_y = k_{y0}(1 - W_y) + W_y k_{fy} \end{cases} \quad (16)$$

式中, k_{x0} 为岩石基质在 x 方向的初始渗透率, m^2 ; k_{y0} 为岩石基质在 y 方向的初始渗透率, m^2 ; k_{fx} 为 x 方向的裂缝渗透率, m^2 ; k_{fy} 为 y 方向的裂缝渗透率, m^2 ; W_x

为 x 方向的渗透率加权系数; W_y 为 y 方向的渗透率加权系数。

裂缝渗透率的计算模型为

$$k_{fx} = \frac{w_x^2}{12\eta}, k_{fy} = \frac{w_y^2}{12\eta} \quad (17)$$

其中, η 为裂缝面形状因子, 本文取 1; w_x, w_y 为裂缝宽度, 本文假设仅当高斯结点处的应变超过临界应变时岩石才会破裂产生裂缝。因此, 可以将裂缝宽度的计算公式表示为

$$w_x = \langle \varepsilon_x - \varepsilon_c \rangle_+ l_x = \frac{(|\varepsilon_x - \varepsilon_c| + \varepsilon_x - \varepsilon_c)}{2} l_x \quad (18)$$

$$w_y = \langle \varepsilon_y - \varepsilon_c \rangle_+ l_y = \frac{(|\varepsilon_y - \varepsilon_c| + \varepsilon_y - \varepsilon_c)}{2} l_y \quad (19)$$

$$w = \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad (20)$$

式中, ε_x 为高斯结点处 x 方向的应变; ε_y 为高斯结点处 y 方向的应变; ε_c 为临界应变; l_x 为 x 方向的单元长度, m; l_y 为 y 方向的单元长度, m。

渗透率加权系数代表水力裂缝对计算单元渗透率的贡献, 等于裂缝宽度与单元长度的比值, 即

$$W_x = \frac{w_y}{l_y}, W_y = \frac{w_x}{l_x} \quad (21)$$

临界应变与临界拉应力之间关系^[30]可表示为

$$\varepsilon_c = \frac{16\sigma_c}{9E} \quad (22)$$

式中, E 为弹性模量。

1.3 数值求解

式 (5) 应力平衡方程与式 (12) 流体连续性方程相互耦合, 构成了渗流-应力耦合非线性方程组。式 (5) 和式 (12) 分别与位移场权函数 W_u 和压力场权函数 W_p 相乘, 并在计算域上积分, 利用散度定理并结合边界条件可得应力平衡方程和流体连续性方程等效积分“弱”形式:

$$\int_{\Omega} \nabla \cdot [W_u^T (1 - D) C \varepsilon - \alpha(D) I P] d\Omega = \int_{\Omega} t W_u^T d\Gamma \quad (23)$$

$$\int_{\Omega} \left\{ W_p^T \left[\frac{1}{M(D)} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial(1/M(D))}{\partial t} + \alpha(D) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{\partial \alpha(D)}{\partial t} \varepsilon_v \right] \right\} d\Omega + \int_{\Omega} \nabla W_p^T \left(\frac{k}{\mu} \nabla P \right) d\Omega = \int_{\Gamma} W_p^T q d\Gamma \quad (24)$$

其中, C 为弹性矩阵, 是应力应变转换的关系矩阵。对于每个计算单元的位移场、压力场和对应权函数构造相应的插值函数, 其插值形式为

$$\begin{aligned} u &= N_u u^n, w_u = N_u w_u^n \\ P &= N_p P^n, w_p = N_p w_p^n \end{aligned} \quad (25)$$

其中, N_u, N_p 为插值函数; u^n, P^n, w_u^n, w_p^n 分别为网格单元结点上的位移、压力及两者对应权函数值, 单元的真实位移、压力和权函数由结点上的值乘以相应的插值函数加权得到。将式(25)代入式(23)和(24), 可得

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}_u^T [(1-D) \mathbf{C} \mathbf{B}_u u^n - \alpha(D) \mathbf{I} N_p P^n] d\Omega = \int_{\Gamma} \mathbf{N}_p^T t d\Gamma \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \mathbf{N}_p^T \left\{ \frac{1}{M(D)} N_p \frac{\partial P^n}{\partial t} + N_p P^n \frac{\partial (1/M(D))}{\partial t} + \right. \\ \left. \alpha(D) \mathbf{B}_u^{\text{vol}} \frac{\partial u^n}{\partial t} + \mathbf{B}_u^{\text{vol}} u^n \frac{\partial \alpha(D)}{\partial t} \right\} d\Omega + \\ \int_{\Omega} \mathbf{B}_p^T \frac{k(D)}{\mu} \mathbf{B}_p P^n d\Omega = \int_{\Gamma} \mathbf{N}_p^T q d\Gamma \end{aligned} \quad (27)$$

式中, $\mathbf{B}_u, \mathbf{B}_u^{\text{vol}}$ 和 $\mathbf{B}_p$ 分别为应变矩阵、体积应变矩阵和压力插值形函数的导数矩阵。

采用向后欧拉法对式(27)中关于时间导数的项进行离散, 即

$$\begin{cases} \frac{\partial P^n}{\partial t} = \frac{P_{i+\Delta t}^n - P_i^n}{\Delta t}, \frac{\partial u^n}{\partial t} = \frac{u_{i+\Delta t}^n - u_i^n}{\Delta t} \\ \frac{\partial (1/M(D))}{\partial t} = \frac{(1/M(D))_{i+\Delta t} - (1/M(D))_i}{\Delta t} \\ \frac{\partial \alpha(D)}{\partial t} = \frac{\alpha(D)_{i+\Delta t} - \alpha(D)_i}{\Delta t} \end{cases} \quad (28)$$

将式(28)代入式(27), 并将第 $n+1$ 个时间步变量的下标去掉, 则式(27)可写为

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \mathbf{N}_p^T \left[\frac{1}{M(D)} N_p (P^n - P_i^n) + N_p P^n \left(\frac{1}{M(D)} - \frac{1}{M(D)_i} \right) + \right. \\ \left. \alpha(D) \mathbf{B}_u^{\text{vol}} (u^n - u_i^n) + \int_{\Omega} \mathbf{N}_p^T \mathbf{B}_u^{\text{vol}} u^n (\alpha(D) - \alpha(D)_i) \right] d\Omega + \\ \int_{\Omega} \mathbf{B}_p^T \frac{k}{\mu} \mathbf{B}_p P^n \Delta t d\Omega = \int_{\Gamma} \mathbf{N}_p^T q \Delta t d\Gamma \end{aligned} \quad (29)$$

采用 Newton-Raphson 迭代法求解渗流-应力耦合方程组, 因此将式(26)和(29)写成余量的形式:

$$\begin{aligned} R_u &= \int_{\Omega} \mathbf{B}_u^T [(1-D) \mathbf{C} \mathbf{B}_u u^n - \alpha(D) \mathbf{I} N_p P^n] d\Omega - \\ &\quad \int_{\Gamma} \mathbf{N}_p^T t d\Gamma \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} R_p &= \int_{\Omega} \mathbf{N}_p^T \left\{ \frac{1}{M(D)} N_p (2P^n - P_i^n) - N_p P^n \frac{1}{M(D)_i} + \right. \\ &\quad \left. \alpha(D) \mathbf{B}_u^{\text{vol}} (2u^n - u_i^n) - \alpha(D)_i \mathbf{B}_u^{\text{vol}} u^n \right\} d\Omega + \end{aligned}$$

$$\int_{\Omega} \mathbf{B}_p^T \frac{k}{\mu} \mathbf{B}_p P^n \Delta t d\Omega - \int_{\Gamma_q} \mathbf{N}_p^T q \Delta t d\Gamma \quad (31)$$

其中, R_u 为位移方程的余量; R_p 为压力方程的余量。则渗流-应力耦合方程组在第 i 个迭代步的 Newton-Raphson (NR) 迭代格式可写为

$$\begin{bmatrix} J^{uu} & J^{up} \\ J^{pu} & J^{pp} \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} \delta u^h \\ \delta P^h \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} R_u \\ R_p \end{bmatrix}_i = 0 \quad (32)$$

式(32)左边第 1 项为雅可比矩阵 $\mathbf{J}$, 各分量为

$$\begin{cases} J^{uu} = \int_{\Omega} (1-D) \mathbf{B}_u^T \mathbf{C} \mathbf{B}_u d\Omega \\ J^{up} = \int_{\Omega} -\alpha(D) \mathbf{B}_u^T \mathbf{I} N_p d\Omega \\ J^{pu} = \int_{\Omega} \mathbf{N}_p^T \mathbf{B}_u^{\text{vol}} (2\alpha(D) - \alpha(D)_i) d\Omega \\ J^{pp} = \int_{\Omega} \mathbf{N}_p^T N_p \left(\frac{2}{M(D)} - \frac{1}{M(D)_i} \right) d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{B}_p^T \frac{k}{\mu} \mathbf{B}_p \Delta t d\Omega \end{cases} \quad (33)$$

通过式(32)可求得第 i 个迭代步的位移增量 δu^h 和压力增量 δP^h , 进而得到第 $i+1$ 个迭代步的位移和压力的试探解, 即

$$u_{i+1}^h = u_i^h + \delta u^h, P_{i+1}^h = P_i^h + \delta P^h \quad (34)$$

若位移场和压力场的误差都满足式(35)所示的收敛条件时, 迭代结束, 否则继续迭代:

$$\|R_u\| \leq \text{tol} \|R_{u0}\|, \|R_p\| \leq \text{tol} \|R_{p0}\| \quad (35)$$

2 模型稳定性与正确性分析

2.1 模型收敛性与稳定性验证

通过比较 3 个不同时间步长的模拟结果来验证模型收敛性和稳定性。

如图 1 所示, 计算区域为边长等于 16 m 的正方形, 在计算区域中心有一条沿 y 方向长度为 1.5 m 的

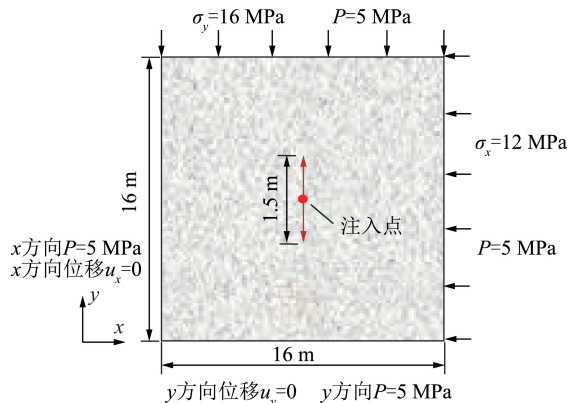


图 1 计算区域和边界条件示意

Fig. 1 Schematic diagram of computational domain and boundary conditions

初始裂缝;固定左边界在 x 方向上的位移,同时固定下边界在 y 方向上的位移,并在右边界的 x 方向上施加 12 MPa 的压应力,在上边界的 y 方向上施加 16 MPa 的压应力。初始孔隙流体压力和沿外边界的流体压力 P 均设置为 5 MPa。计算区域被网格尺寸为 0.25 m 的有限单元均匀离散。3 个不同算例中时间步长分别设置为 3.0, 4.5, 6.0 s。从注入点以恒定的注入速度 $q = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ 注入流体,注入总时间 36 s。模拟用到的其他参数见表 1。

表 1 验证模型参数

Table 1 Parameters of model verification

参数	值	参数	值
临界应力/MPa	1	基质渗透率/ 10^{-15} m^2	0.1
弹性模量/MPa	6 000	不排水泊松比	0.3
泊松比	0.25	流体黏度 (mPa · s)	1

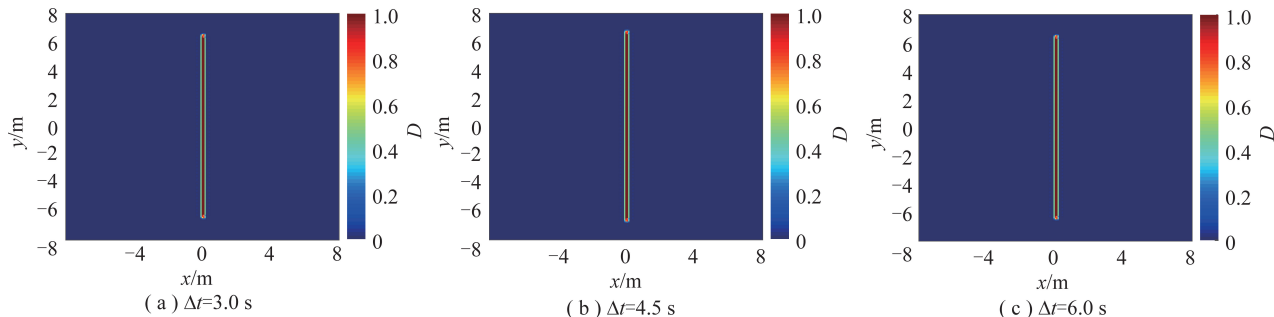


图 2 3 种不同时间步长情况下注入结束时损伤程度云图

Fig. 2 Damage distribution contours at the end of injection time in three different time steps

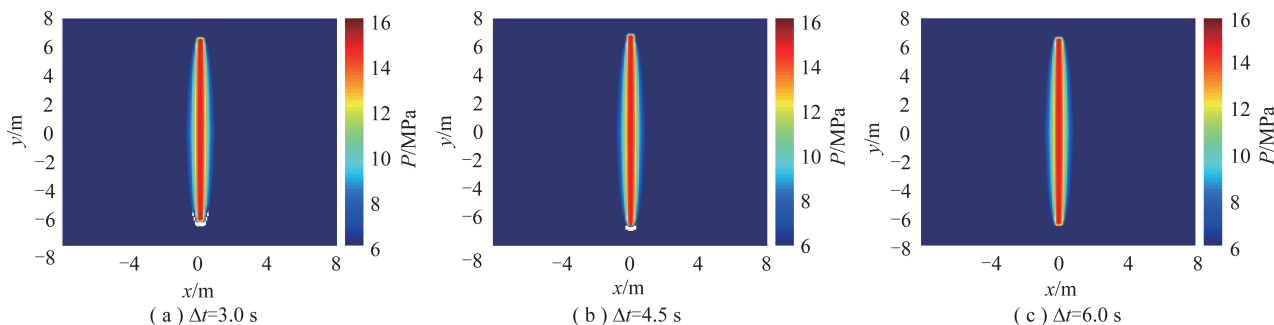


图 3 3 种不同时间步长情况下注入结束时压力云图

Fig. 3 Pressure distribution contours at the end of injection time in three different time steps

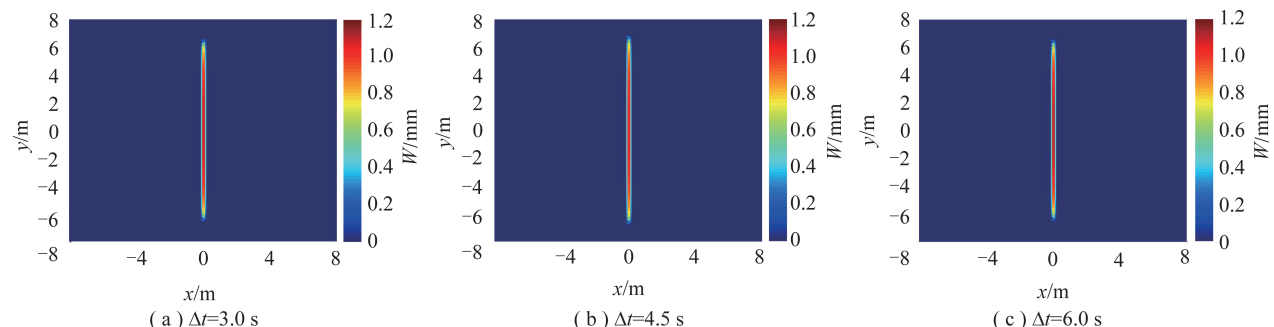


图 4 3 种不同时间步长情况下注入结束时裂缝宽度云图

Fig. 4 Fracture width distribution contours at the end of injection time in three different time steps

在 3 种不同时间步长情况下,损伤云图、压力云图和裂缝宽度云图几乎相同,裂缝都沿 y 方向扩展演化(图 2~4,其中, D 为损伤程度,0 表示完好无损,1 表示完全失效)。基质渗透率较低,导致由于压裂液滤失而造成压力升高的区域较小。水力裂缝内流体压力几乎相同,即水力裂缝内压降较小。由图 5 可知,在压裂初始阶段,3 种不同时间步长下注入点压力值相差较大,但是当注入时间超过 18 s 后,不同时间步长下注入点压力值相差较小,并且在注入结束时注入点压力相对误差仅为 0.15%,由此验证了该模型的收敛性和稳定性。

2.2 模型正确性验证

为了验证模型缝宽计算方法的正确性,将上述算例的计算结果与缝宽解析公式计算得到的结果进行对比。由 2.1 节模拟结果可知,水力裂缝内流体压力

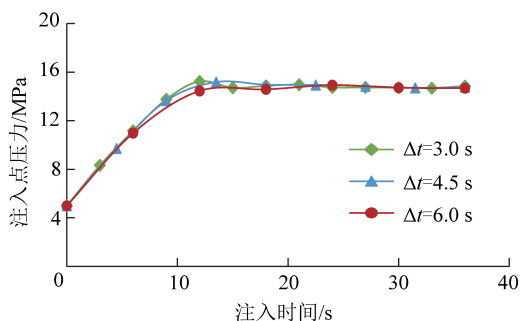


图 5 3 种不同时间步长情况下注入点压力随时间变化

Fig. 5 Pressure at the injection point versus injection time in three different time steps cases

几乎相同,而在缝内流体压力均匀分布条件下,裂缝宽度计算公式^[31]为

$$w(x) = \frac{4L(1 - \nu^2)(P_f - \sigma_h)}{E'} \sqrt{1 - \frac{x^2}{L^2}} \quad (36)$$

式中, ν 为泊松比; P_f 为缝内流体压力,上述算例模型计算结果为 12.273 MPa; σ_h 为垂直于裂缝面的远场地应力,在模拟算例中为左边界施加的压应力(12 MPa); L 为裂缝长度,算例模型计算得到裂缝半长为 5.75 m; x 为裂缝面上任意一点到注入点处的距离。

2 个不同模型计算得到的裂缝宽度沿缝长方向的分布曲线差异较小,平均误差仅为 2.75%(图 6)。由此验证了本文模型缝宽计算公式的正确性。

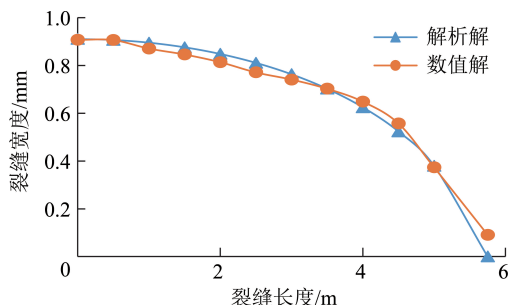


图 6 数值模型和解析模型的裂缝宽度对比

Fig. 6 Fracture width comparison between numerical model and analytical model

3 算例分析

影响多层叠置煤层中水力裂缝纵向扩展的关键因素包括地质因素(原位应力差、界面强度、弹性模量和泊松比)以及工程因素(压裂液黏度)。计算区域和边界条件如图 7 所示,其中, σ_{hs} 为砂岩水平地应力, σ_{hc} 为煤岩水平地应力。模拟用到的其他参数见表 2。

3.1 原位应力差对裂缝扩展的影响

本节将分析原位应力差即垂直方向(y 方向)上

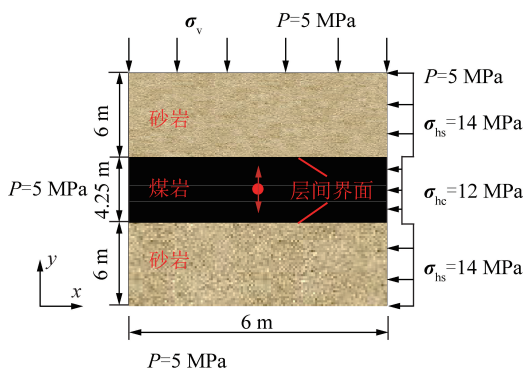


图 7 模拟使用的计算域和边界条件示意

Fig. 7 Schematic diagram of computational domain and boundary conditions used in the simulation example

的地应力与隔层(砂岩层)中 x 方向上的水平地应力之差对裂缝纵向延伸的影响。3 个算例中注入流体速度为 $q = 2.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$,垂直方向地应力分别为 15,16 和 17 MPa。

表 2 模拟使用的地层参数

Table 2 Parameters used in simulation

参数	数值	参数	数值
砂岩临界应力/MPa	3	砂岩渗透率/ 10^{-15} m^2	1
煤岩临界应力/MPa	1	煤岩渗透率/ 10^{-15} m^2	0.1
界面临界应力/MPa	1	界面渗透率/ 10^{-15} m^2	100
砂岩弹性模量/GPa	22	砂岩 x 方向水平地应力/MPa	14
煤岩弹性模量/GPa	6	煤岩 x 方向水平地应力/MPa	12
砂岩泊松比	0.17	y 方向地应力/MPa	15
煤岩泊松比	0.25	流体黏度/($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	1
初始地层压力/MPa	5	时间步/s	2
注入时间/s	96	单元长度/m	0.25

分析模拟结果(图 8~10)可知,当原地应力差较小时,水力裂缝从煤层扩展至层间界面后转向沿界面扩展,虽然水力裂缝会开启层间界面,但是界面处的裂缝宽度比煤岩层中裂缝宽度小。当原地应力差增大至 3 MPa 时,水力裂缝直接穿过层间界面而延伸到上下砂岩层,但由于层间界面渗透率比基岩高,因此流体在层间界面处的流动距离大于在基岩中的流动距离。由于损伤程度云图、压力云图和缝宽云图轮廓具有相似性,因此在后续算例中仅给出损伤云图来描述裂缝延伸形态。

3.2 界面强度对裂缝扩展的影响

3 个算例中,垂直方向上的地应力为 17 MPa,注入时间为 96 s,模拟界面强度分别为 0.50, 0.75, 1.00 MPa 时的裂缝纵向扩展情况(图 11)。

由图 11 可知,界面强度越大,水力裂缝越可能穿过界面而延伸到上下砂岩层。分析注入点压力变化曲线(图 12(a)),穿过层间算例中注入点压力比沿层间界面延伸算例注入点压力低,而沿层间界面延伸

时,层间界面强度越小,注入点压力越小。

3.3 杨氏模量和泊松比对裂缝扩展的影响

算例中,垂直方向地应力为 17 MPa,模拟砂岩层中的弹性模量分别为 22,16 和 10 GPa。由于岩石的泊松比通常与弹性模量成反比,故砂岩泊松比分别为

0.17,0.20 和 0.23。

如图 13 所示,砂岩层弹性模量越大,裂缝高度越大,即较小的砂岩层(盖层)弹性模量会降低裂缝高度。分析压力变化曲线(图 12(b)),砂岩层弹性模量越大,裂缝穿层后注入点压力越高。

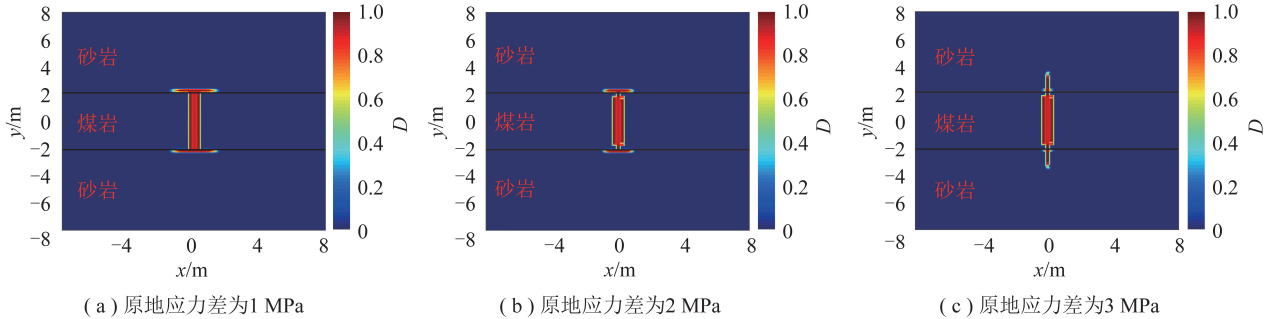


图 8 3 种不同原地应力差下注入结束时损伤程度云图

Fig. 8 Damage distribution contours at the end of injection time in three different in-situ stresses difference cases

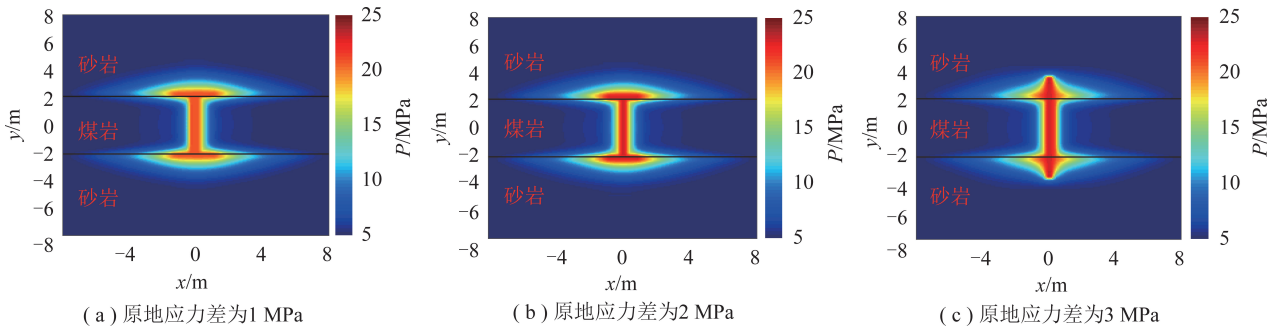


图 9 3 种不同原地应力差下注入结束时压力云图

Fig. 9 Pressure distribution contours at the end of injection time in three different in-situ stresses difference cases

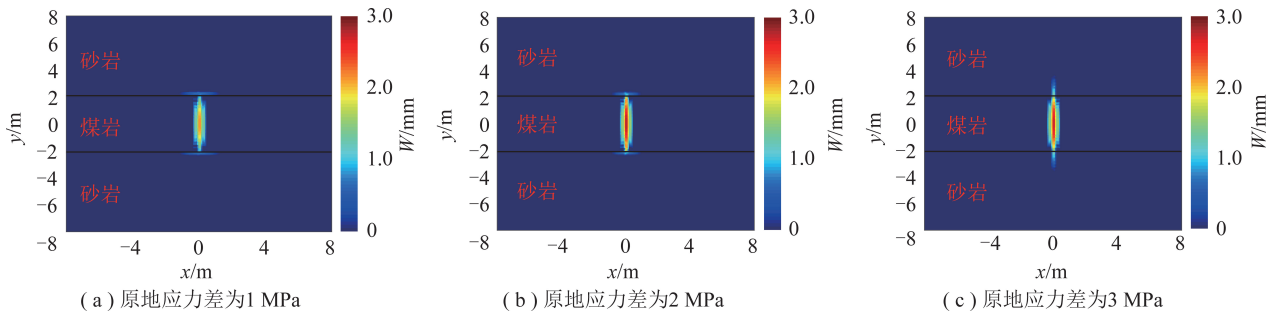


图 10 3 种不同原地应力差下注入结束时裂缝宽度云图

Fig. 10 Fracture width distribution contours at the end of injection time in three different in-situ stresses difference cases

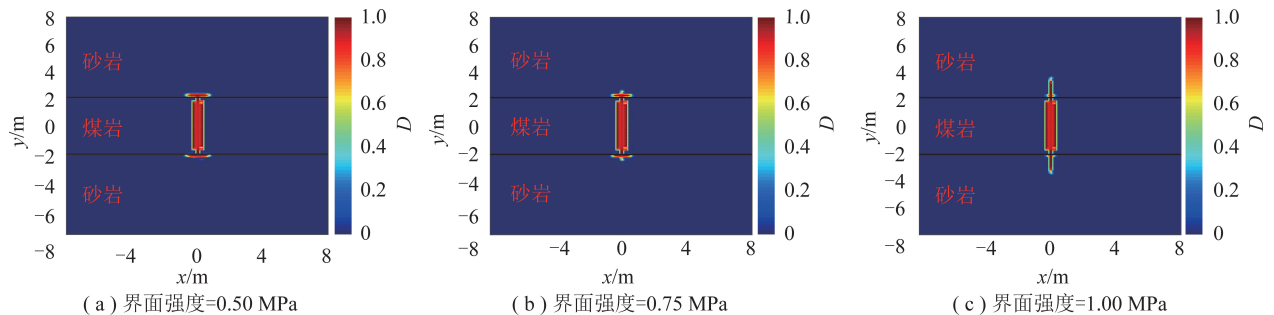


图 11 3 种不同界面强度下注入结束时损伤程度云图

Fig. 11 Damage distribution contours at the end of injection time in three different interface strength cases

3.4 压裂液黏度对裂缝扩展的影响

算例中,垂直方向地应力设为 17 MPa,模拟压裂液黏度分别为 0.1,0.5,1.0 mPa·s 时的裂缝纵向扩展情况(图 14)。

结果显示,压裂液黏度越大,水力裂缝越有可能穿过界面延伸到上下砂岩层,且黏度越大,穿层后裂缝高度越大;压裂液黏度的增加,注入点压力随之增大(图 12(c))。

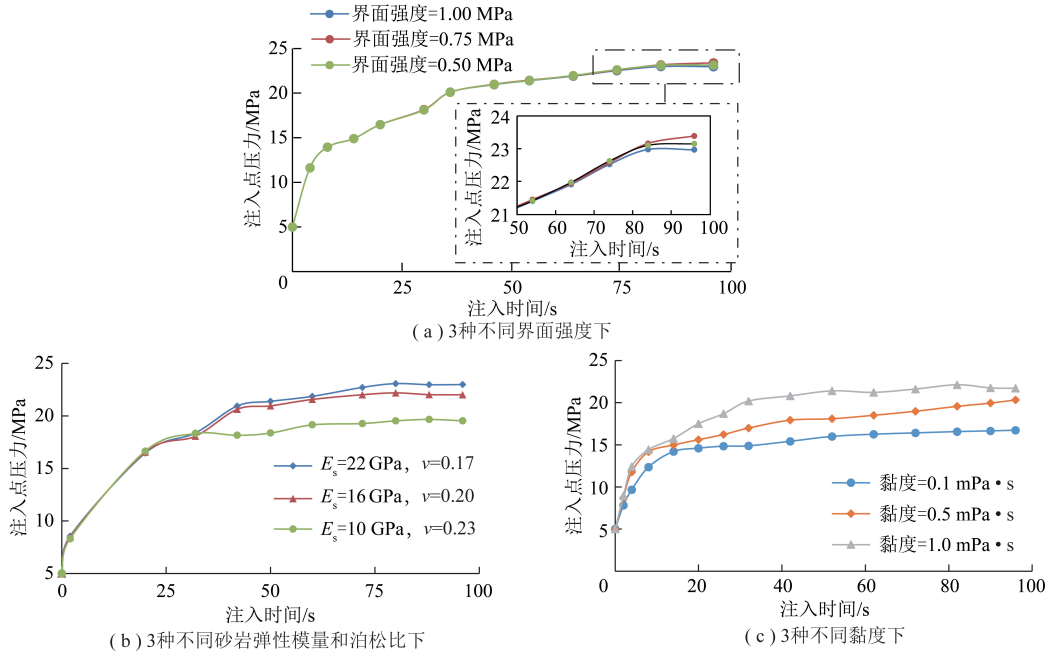


图 12 注入点压力变化

Fig. 12 Pressure at the injection point versus injection time

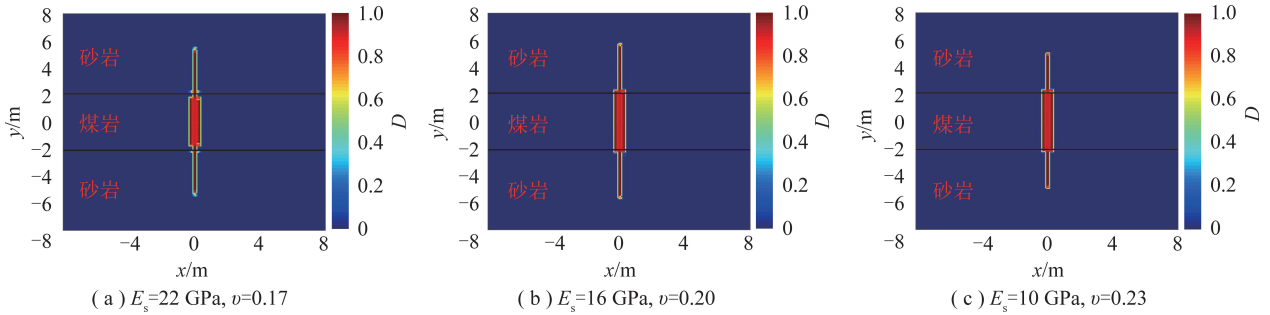


图 13 3种不同砂岩弹性模量和泊松比下注入结束时损伤程度云图

Fig. 13 Damage distribution contours at the end of injection time in three different young modulus and poisson ratio of sandstone cases

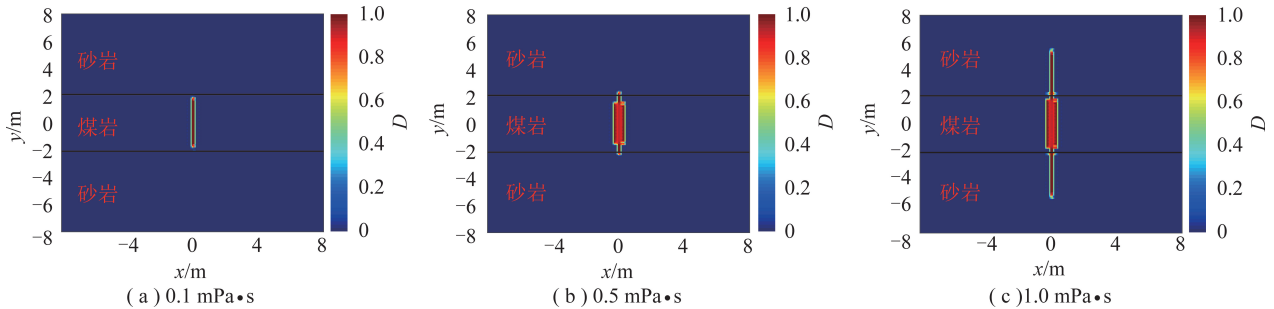


图 14 3种不同黏度下注入时间结束时损伤程度云图

Fig. 14 Damage distribution contours at the end of injection time in three different injection rate cases

4 结 论

穿过界面并在砂岩层中扩展;砂岩层弹性模量越大裂缝穿层后高度越大。

(1)较高的原地应力差、界面强度将使水力裂缝

(2)压裂液黏度越大,压裂裂缝越容易穿过层间

界面延伸到上下隔层,且黏度越大,穿层后裂缝高度越大。

(3)虽然在某些情况下水力裂缝会打开砂煤岩界面,但界面处的裂缝宽度比煤岩中的裂缝宽度小得多。

(4)水力裂缝沿层间界面转向延伸的缝内流体压力高于直接穿过界面延伸到上下隔层的缝内流体压力。

参考文献(References):

- [1] 孟宪武,刘诗荣,石国山,等. 滇东黔西地区煤层气开发试验及储层改造效果分析与建议[J]. 中国煤层气,2006,3(4):31-34.
MENG Xianwu, LIU Shirong, SHI Guoshan, et al. Results of CBM testing and remoulding of reservoir in Eastern Yunnan and Western Guizhou and related problems and suggestions[J]. China Coalbed Methane, 2006, 3(4): 31-34.
- [2] 秦勇,申建,沈玉林. 叠置含气系统共采兼容性——煤系“三气”及深部煤层气开采中的共性地质问题[J]. 煤炭学报,2016,41(1):14-23.
QIN Yong, SHEN Jian, SHEN Yulin. Joint mining compatibility of superposed gas-bearing systems: A general geological problem for extraction of three natural gases and deep CBM in coal series[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 14-23.
- [3] 秦勇,吴建光,张争光,等. 基于排采初期生产特征的煤层气合采地质条件分析[J]. 煤炭学报,2020,45(1):241-257.
QIN Yong, WU Jianguang, ZHANG Zhengguang, et al. Analysis of geological conditions for coalbed methane co-production based on production characteristics in early stage of drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 241-257.
- [4] 孟尚志,侯冰,张健,等. 煤系“三气”共采产层组压裂裂缝扩展物模试验研究[J]. 煤炭学报,2016,41(1):221-227.
MENG Shangzhi, HOU Bing, ZHANG Jian, et al. Experimental research on hydraulic fracture propagation through mixed layers of shale, tight sand and coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 221-227.
- [5] 杨兆中,刘云锐,张平,等. 滇东黔西地区多层叠置煤层压裂分层决策方法研究[J]. 煤炭科学技术,2017,45(9):7-12.
YANG Zhaozhong, LIU Yunrui, ZHANG Ping, et al. Study on fracturing and slicing decision method of multi layer overlay seam in East Yunnan and West Guizhou[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 7-12.
- [6] 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.
- [7] 杨兆彪,秦勇,张争光,等. 基于聚类分析的多煤层煤层气产层组合选择[J]. 煤炭学报,2018,43(6):1641-1646.
YANG Zhaobiao, QIN Yong, ZHANG Zhengguang, et al. Production

layer combination selection for coalbed methane development in multi-coal seams based on cluster analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1641-1646.

- [8] 申建,秦勇,张兵,等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴区块煤系叠置含气系统及其兼容性[J]. 煤炭学报,2018,43(6):1614-1619.
SHEN Jian, QIN Yong, ZHANG Bing, et al. Superimposing gas-bearing system in coal measures and its compatibility in Linxing block, east Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1614-1619.
- [9] DANESHY A A. Hydraulic fracture propagation in layered formations[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1978, 18(1): 33-41.
- [10] 曾义金,周俊,王海涛,等. 深层页岩真三轴变排量水力压裂物理模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(9):1758-1766.
ZENG Yijin, ZHOU Jun, WANG Haitao, et al. Research on true triaxial hydraulic fracturing in deep shale with varying pumping rates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1758-1766.
- [11] 杨焦生,王一兵,李安启,等. 煤岩水力裂缝扩展规律试验研究[J]. 煤炭学报,2012,37(1):73-77.
YANG Jiaosheng, WANG Yibing, LI Anqi, et al. Experimental study on propagation mechanism of complex hydraulic fracture in coalbed[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 73-77.
- [12] 许耀波,郭盛强. 软硬煤复合的煤层气水平井分段压裂技术及应用[J]. 煤炭学报,2019,44(4):1169-1177.
XU Yaobo, GUO Shengqiang. Technology and application of staged fracturing in coalbed methane horizontal well of soft and hard coal composite coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 1169-1177.
- [13] HE S, ZHOU J, CHEN Y, et al. Research on wellbore stress in under-balanced drilling horizontal wells considering anisotropic seepage and thermal effects[J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2017, 45: 338-357.
- [14] 高杰,侯冰,谭鹏,等. 砂煤互层水力裂缝穿层扩展机理[J]. 煤炭学报,2017,42(S2):428-433.
GAO Jie, HOU Bing, TAN Peng, et al. Propagation mechanism of hydraulic fracture in sand coal interbedding[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S2): 428-433.
- [15] 张帆,马耕,冯丹. 大尺寸真三轴煤岩水力压裂模拟试验与裂缝扩展分析[J]. 岩土力学,2019,40(5):1890-1897.
ZHANG Fan, MA Geng, FENG Dan. Hydraulic fracturing simulation test and fracture propagation analysis of large-scale coal rock under true triaxial conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1890-1897.
- [16] 孟召平,雷钧焕,王宇恒. 基于Griffith强度理论的煤储层水力压裂有利区评价[J]. 煤炭学报,2020,45(1):268-275.
MENG Zhaoping, LEI Junhuan, WANG Yuheng. Evaluation of favorable areas for hydraulic fracturing of coal reservoir based on Griffith strength theory[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 268-275.
- [17] BEHNIA M, GOSHTASBI K, ZHANG G Q, et al. Numerical modeling of hydraulic fracture propagation and reorientation[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2015, 19(2):

- 152-167.
- [18] 纪禄军,胡永全,赵金洲,等. 一种考虑滤失的水平裂缝延伸新模型[J]. 西南石油学院学报,2000,22(1):12-15.
JI Lujun,HU Yongquan,ZHAO Jinzhou,et al. a new model simulating horizontal fracture extension with leakoff effects[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute,2000,22(1):12-15.
- [19] 刘顺,何衡,王俊奇,等. 水力压裂的天然裂缝延伸简单模型[J]. 断块油气田,2016,23(4):488-491,513.
LIU Shun,HE Heng,WANG Junqi,et al. Simple model for natural fracture propagation through hydraulic fracturing[J]. Fault-Block Oil & Gas Field,2016,23(4):488-491,513.
- [20] SETTARI A,CLEARY M P. Development and testing of a pseudo-three-dimensional model of hydraulic fracture geometry[J]. SPE Production Engineering,1986,1(6):449-466.
- [21] ZHOU D,ZHENG P,HE P,et al. Hydraulic fracture propagation direction during volume fracturing in unconventional reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2016;82-89.
- [22] 侯冰,陈勉,张保卫,等. 裂缝性页岩储层多级水力裂缝扩展规律研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(6):1041-1046.
HOU Bing,CHEN Mian,ZHANG Baowei,et al. Propagation of multiple hydraulic fractures in fractured shale reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(6):1041-1046.
- [23] 王强,贺甲元. 基于 ABAQUS 的压裂裂缝扩展模拟研究[J]. 油气藏评价与开发,2014,4(5):48-51.
WANG Qiang,HE Jiayuan. Fracture spread simulation research based on ABAQUS[J]. Reservoir Evaluation and Development,2014,4(5):48-51.
- [24] LI Y,WEI C,QIN G,et al. Numerical simulation of hydraulically induced fracture network propagation in shale formation[A]. International Petroleum Technology Conference[C]. Beijing,2013.
- [25] 李浩哲,姜在炳,舒建生,等. 水力裂缝在煤岩界面处穿层扩展规律的数值模拟[J]. 煤田地质与勘探,2020,48(2):106-113.
- LI Haozhe,JIANG Zaibing,SHU Jiansheng,et al. Numerical simulation of layer-crossing propagation behavior of hydraulic fractures at coal-rock interface[J]. Coal Geology & Exploration,2020,48(2):106-113.
- [26] 许江文,韩少博,罗兆,等. 水平井薄互层大段多缝纵向扩展影响因素分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(7):2667-2673.
XU Jiangwen,HAN Shaobo,LUO Zhao,et al. The analysis of influence factors on vertical propagation of multi-fractures of large segment in thin interlayers of horizontal well[J]. Science Technology and Engineering,2020,20(7):2667-2673.
- [27] 汪忠明. 基于非局部增强梯度模型的混凝土断裂损伤研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2010.
WANG Zhongming. Research on fracture and damage of concrete based on the enhanced damage model[D]. Hefei:Hefei University of Technology,2010.
- [28] 易良平,胡滨,李小刚,等. 基于相场法的煤砂互层水力裂缝纵向延伸计算模型[J]. 煤炭学报,2020,45(S2):706-716.
YI Liangping,HU Bin,LI Xiaogang,et al. Calculation model of hydraulic crack vertical propagation in coal-sand interbedded formation based on the phase field method[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(S2):706-716.
- [29] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. Journal of Applied Physics,1941,12(2):155-164.
- [30] EMDADI A,FAHRENHOLTZ W G,HILMAS G E,et al. A modified phase-field model for quantitative simulation of crack propagation in single-phase and multi-phase materials[J]. Engineering Fracture Mechanics,2018,200:339-354.
- [31] 赵金洲,彭瑀,林啸,等. 考虑复杂应力分布的数值缝宽计算模型及其应用[J]. 石油学报,2016,37(7):914-920.
ZHAO Jinzhou,PENG Yu,LIN Xiao,et al. Numerical fracture width model considering complex stress distribution and its application[J]. Acta Petrolei Sinica,2016,37(7):914-920.