

基于 FEMM-Fracflow 研究缝洞型油藏中裂缝扩展问题

王 慧, 刘泉声

WANG Hui, LIU Quansheng

武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072

School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China

WANG H, LIU Q S, 2020. Investigation on fracture propagation in fractured-cavity reservoirs based on FEMM-fracflow modelling [J]. Journal of Geomechanics, 26 (1): 55-64 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.01.006

Abstract: The propagation path of hydraulic fractures is critical to oil recovery in fractured-cavity reservoirs. Based on Hybrid Finite-element and Mesh-free Method-Fracflow (FEMM-Fracflow) numerical simulation platform, this paper explores the influence of natural caves, in-situ stress and injection velocity on the propagation path of hydraulic fractures in reservoirs. The simulation results show that when there are caves, the fracture propagates toward the cave. When the horizontal confining pressure is changed, the fracture propagates toward the cave obviously without applying horizontal confining pressure, and eventually connects with the cave; when the horizontal confining pressure of 50 MPa is applied, the trend of hydraulic fracture propagating toward the cave is obviously weakened; when injection velocity is changed, the fracture propagates toward the cave with the injection velocity of 0.05 kg/s, while the tendency of fracture propagating toward the cave is weakened with the injection velocity of 0.2 kg/s.

Key words: fractured-cavity reservoir; hydraulic fracturing; FEMM-Fracflow; fluid-structure coupling; connectivity

摘 要: 在缝洞型油藏中, 水力裂缝的偏转路径对石油的开采量有重要的影响。Hybrid Finite-element and Mesh-free Method-Fracflow (FEMM-Fracflow) 数值模拟平台, 通过数值实验, 文章分析了缝洞型油藏中自然溶洞、水平地应力以及注水流速三种因素对水力裂缝偏转路径的影响。结果表明, 在存在溶洞时, 裂缝明显向溶洞方向偏转; 在改变水平围压时, 不施加水平围压条件下, 裂缝明显偏向溶洞方向扩展, 并且最终与溶洞连通; 而在施加 50 MPa 水平围压时, 水力裂缝偏向溶洞的趋势明显减弱; 在改变流速时, 当流速为 0.05 kg/s, 裂缝明显向溶洞方向偏转, 而当流速为 0.2 kg/s, 裂缝向溶洞方向偏转的趋势则减弱。

关键词: 缝洞型油藏; 水力压裂; FEMM-Fracflow; 流固耦合; 连通性

中图分类号: P618.13 **文献标识码:** A

0 引言

缝洞型油藏在自然界广泛分布 (Khvatova et

al., 2012; 祖克威等, 2018), 这种油藏中包含着大量的从厘米级到米级的溶洞, 这造成了缝洞型油藏很强的地质复杂性 (Zhao et al., 2015; 王璐等, 2017)。在这种油藏中, 溶洞是主要的储油空

基金项目: 国家自然科学基金 (41602296)

第一作者简介: 王慧 (1994-), 女, 在读硕士, 研究方向为多物理场裂缝扩展问题。E-mail: huiwangwhu@163.com

通讯作者: 刘泉声 (1962-), 男, 教授, 从事岩石力学方面研究。E-mail: 2992464906@qq.com

收稿日期: 2019-01-11; **修回日期:** 2019-06-16; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 王慧, 刘泉声, 2020. 基于 FEMM-Fracflow 研究缝洞型油藏中裂缝扩展问题 [J]. 地质力学学报, 26 (1): 55-64 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.01.006

间 (Gao et al., 2016)。近年来, 水力压裂技术 (谢军等, 2015; 付金伟等, 2017) 被广泛应用于水利工程、岩土工程、地热开发和石油工程等领域, 许多学者对不同条件下的水压致裂机理、裂纹扩展机理进行了研究。在室内试验方面, 杨潇等 (2017) 研究了水力裂缝扩展过程中裂缝宽度的变化过程; 武鹏飞等 (2017) 对煤岩复合体水压致裂裂缝扩展规律进行了试验研究; 赵子江等 (2019) 研究了注水方式 (循环注水和一次性注水) 对水力压裂的影响。在数值模拟方面, 龚迪光等 (2016) 采用 ABAQUS 研究了水平应力差、注水速度和液体粘度对水力压裂过程的影响; 刘国威等 (2017) 提出了相场模拟方法, 为水力压裂提供了一种新的数值模拟方法; 姚池等 (2017) 提出了改进刚体弹簧方法模拟各向同性岩体水压致裂过程, 并研究了 Biot 系数对水力压裂的影响; 严成增等 (2016) 采用有限元离散元耦合数值模拟方法 FDEM 研究了地应力对水力压裂的影响。通过总结已有研究成果发现, 无论是室内试验还是数值模拟, 对各向同性、均质完整岩体或含天然小型裂隙 (指开度较小) 岩体的水力压裂研究较为丰富; 对水力压裂过程、裂纹扩展机理和水力压裂影响因素的研究等也取得了丰富的成果。然而, 对于天然大型溶洞 (开度米级以上) 对水力裂缝扩展路径的影响研究相对较少; 而在石油工程中, 除了小型裂隙、孔隙外, 大型溶洞也是主要的储油空间, 水力裂缝的扩展路径关系到能否从溶洞中顺利抽采石油, 因此, 对含大型溶洞岩体中水力裂缝扩展规律和影响因素的研究显得十分重要。水力裂缝的扩展路径受到多种因素的影响, 如溶洞、围压 (伍亚等, 2014) 和注入流速等。根据与溶洞的连接关系, 水力裂缝可分为三种不同的类型: 连接型裂缝, 即裂缝与溶洞相连接; 偏向型裂缝, 即裂缝向溶洞方向偏转; 偏离型裂缝, 即裂缝向远离溶洞方向偏转。

有限元 (Zienkiewicz and Taylor, 2000) 是一种广泛使用的方法, 但是在涉及到裂缝扩展 (Adachi et al., 2007) 问题时, 有限元方法需要重新划分网格, 三维结构网格的划分更加复杂。近些年来, 一系列可以用来模拟裂缝扩展的数值方法相继提出, 如无网格法 (Rajendran and Zhang, 2007)、基于单位分解法 (Melenk Babuška, 1996) 的广义有限元法 (Strouboulis et al., 2000)、扩展

有限元法 (郝志勇和岳立新, 2018)、有限差分法 (Belytschko et al., 2009; 王雄等, 2017) 和数值流形法 (Shi, 1991) 等。这些方法通过构造高阶函数, 而不用增加额外的节点, 因此具有较高的精度和收敛率。对于无网格法而言, 其近似函数建立在一系列离散点上, 不需要借助于网格, 克服了有限元对网格的依赖性。由于不需要用网格离散计算区域, 可以用来解决流固耦合问题。为了利用不同数值方法的优点, Rajendran and Zhang (2008) 结合了无网格法和有限元法的思想, 提出了杂交无网格-有限元法 FEMM, 这种方法不需要重新划分网格, 具有较高的精度, 可以用来模拟岩体中的裂缝扩展问题。随后, 在 Rajendran and Zhang 工作的基础上, 学者们相继提出了基于连续节点应力的四节点四边形单元 (Tang et al., 2009) 和三节点三角形单元 (Yang et al., 2014) 用来分析裂缝扩展问题, 如 Liu et al. (2018) 利用 FEMM 模拟三维裂缝扩展问题。

水力压裂过程是一个典型的流固耦合过程。文章基于 Liu et al. (2018) 提出的流固耦合数值方法模拟水力压裂过程。岩石块体变形和裂缝扩展采用固体部分计算 (FEMM), 该方法基于单位分解法, 使用有限元形函数构造单位分解函数, 同时该方法不需要重新划分网格, 能够克服对网格的依赖性; 而流体的流动过程采用流体部分计算 (文中命名为 Fracflow), 其基本原理是基于平行板模型 (Witherspoon et al., 1980) 的立方定律。岩石变形和裂缝扩展会影响流体的流动, 而流体的流动反过来促进裂缝的扩展, 二者相互耦合。

1 FEMM-Fracflow 基本理论

1.1 FEMM 基本理论

1.1.1 单位分解函数的形成

考虑任意一个四面体单元 Ω , 其四个顶点为 $\{n_1, n_2, n_3, n_4\}$, 如图 1 所示。 $p(x) = \{x, y, z\}$ 代表四面体中的任意一点。根据单位分解法的原理, 位移函数 $u(x)$ 可以表示为:

$$u(x) = \sum_{i=1}^4 w_i(x) u_i(x) \quad (1)$$

其中, $w_i(x)$ 是节点的非零单位分解函数, $u_i(x)$ 是节点的位移, 单位分解函数满足单位分解条件:

$$\sum_{i=1}^4 w_i(x) = 1 \quad (2)$$

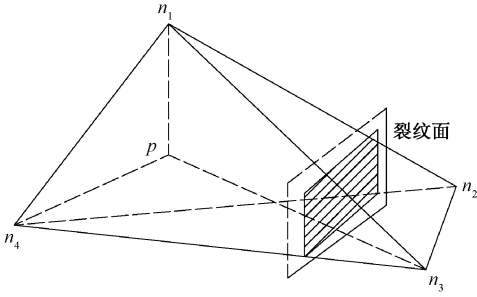


图 1 被裂缝平面穿过的四面体
Fig. 1 Tetrahedral element passed by a planar fracture

为方便覆盖域的描述, 这里选取二维平面进行说明。如图 2 所示, 网格中存在 3 种单元: ①裂缝单元——被裂缝穿过的单元; ②桥单元——与裂缝单元有公共节点的单元; ③普通单元——其余单元。裂缝单元上所有的节点为 PU 节点, 其他节点为普通的有限元节点。桥单元中既有 PU 节点, 也有普通有限元单元。

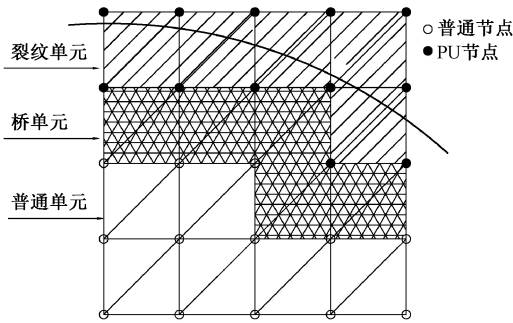


图 2 网格覆盖域中裂缝单元、桥单元和普通单元示意图
Fig. 2 Schematic of the FE, bridge, fracture elements

构造单位分解函数的方法很多, 包括 MLS 形函数、有限元形函数和 SHEPARD 函数等。文中选择 SHEPARD 函数构造各覆盖区域的单位分解函数。共享该节点的所有单元构成一个覆盖, 该覆盖中所有单元的权函数取有限元形函数。则单位分解函数可以写为:

$$w_i(x) = \frac{N_i(x)}{\sum_i N_i(x)} = N_i(x), \quad i \in I \quad (3)$$

其中, $N_i(x)$ 是节点 i 对应的有限元法的形函数, 分别为:

$$N_1(x) = \frac{V_{n_2 n_3 n_4 p}}{V_{n_1 n_2 n_3 n_4}}$$

$$N_2(x) = \frac{V_{n_3 n_4 n_1 p}}{V_{n_1 n_2 n_3 n_4}}$$

$$N_3(x) = \frac{V_{n_4 n_1 n_2 p}}{V_{n_1 n_2 n_3 n_4}} \quad (4)$$

其中, $V_{n_i n_j n_k p}$ 是点 n_i, n_j, n_k, p 组成的四面体的体积。

1.1.2 裂缝单元近似函数构造

当某单元被裂缝穿过时, 裂缝两侧为不连续位移场, 因此该单元的单位分解函数有所不同, 此时应该对权函数进行修正。定义 I_τ 是该单元区域中节点索引集合, 基于可视化准则构造不连续位移场, 定义可视化区域 $I_\tau^{\text{vis}}(x) \subset I_\tau$ 。

$$I_\tau^{\text{vis}}(x) = \{i \in I_\tau \mid [x - x_i] \cap f = \emptyset\} \quad (5)$$

其中, x_i 是节点 n_i 的坐标, $[x - x_i]$ 表示连接这两点的线段。

则修正后的权函数为:

$$\alpha'_i(x) = \begin{cases} \frac{N_i(x)}{\sum_i N_i(x)} & i \in I_\tau^{\text{vis}}(x) \\ 0 & i \notin I_\tau^{\text{vis}}(x) \end{cases} \quad (6)$$

则在裂缝单元上, 修正后的单位分解函数为:

$$w'_i(x) = \begin{cases} \frac{\alpha'_i(x)}{\alpha'_1(x) + \alpha'_2(x) + \alpha'_3(x) + \alpha'_4(x)} & i \in I_\tau^{\text{vis}}(x) \\ 0 & i \notin I_\tau^{\text{vis}}(x) \end{cases} \quad (7)$$

1.1.3 岩体本构关系及裂缝扩展条件

该文假设岩体为各项同性, 岩体应力应变行为符合弹性关系, 同时文章采用最大拉应力准则判断裂缝是否扩展, 公式如下:

$$\sigma^{\text{tip}} = T_0 \quad (8)$$

其中, σ^{tip} 是裂缝尖端的最大拉应力, T_0 是岩体的抗拉强度。当最大拉应力值超过抗拉强度时, 裂缝便会垂直于最大拉应力方向扩展。

1.2 Fracflow 基本理论

1.2.1 流体计算控制方程

裂缝单元中的流动假定为平行板流。节点 i 的影响区域是跟节点相连的所有裂缝单元。如图 3 所示, 选取任意一个裂缝单元 $V_{\Delta ijk}$, o 是裂缝单元的中心点, 裂缝单元被中心点 o 分为三个子区域。 S_{i-j} 为节点 i 和节点 j 之间的水流路径。假设水压呈线性分布, 则流动路径上的压力梯度为:

$$J_{i-j} = \frac{p_i - p_j + \rho g(z_i - z_j)}{l_{i-j}} \quad (9)$$

其中, P_i, p_j 分别为节点 i, j 的水压; z_i, z_j 分别是

节点 i 和节点 j 竖坐标, l_{i-j} 是节点 i 和节点 j 之间的距离, ρ 为密度, g 为重力加速度。

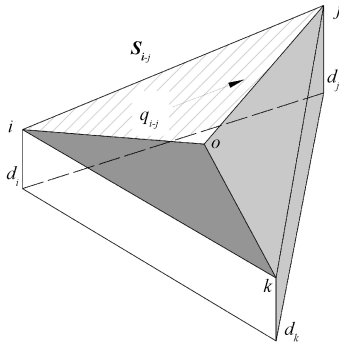


图3 裂缝单元流体流动路径

Fig. 3 Flow path associated with a fracture-element

流体流速 q 计算如下:

$$q_{i-j} = \left(\frac{f_{si} + f_{sj}}{2} \right) \cdot \frac{\delta_{i-j}^2 J_{i-j}}{12\mu} \cdot b_{i-j} \quad (10)$$

$$b_{i-j} = \frac{S_{i-j}}{l_{i-j}} \quad (11)$$

$$f_s = s^2(3 - 2s) \quad 0 \leq s \leq 1 \quad (12)$$

其中, s 代表节点饱和度, μ 是流体的黏度, b_{i-j} 是节点 i 到节点 j 的流体路径的等效宽度, δ_{i-j} 是等效开度。

1.2.2 流体压力的更新

在任意时步, 流体的压力为:

$$p^n = \begin{cases} p^{n-1} + K_w Q \frac{\Delta t}{V^n} - K_w \frac{\Delta V}{V_m} & s = 1 \\ 0 & s < 1 \end{cases} \quad (13)$$

其中, p^n , p^{n-1} 分别代表当前时步和上一时步的流体压力, K_w 为流体的体积模量, Q 为每秒总流量, 为时间步增量, V^n 是当前时步节点的体积, V^{n-1} 是上一时步节点的体积。 ΔV 、 V_m 分别为相邻时步之间节点体积差、相邻时步节点体积之和的一半, 如下:

$$\Delta V = V^n - V^{n-1} \quad (14)$$

$$V_m = \frac{V^n + V^{n-1}}{2} \quad (15)$$

对于一个裂缝单元 Δ_{ijk} , 各节点对应的体积 $V_{\Delta_{ijk}}^i$, 如图4所示。节点 i 的饱和度更新如下:

$$s^n = s^{n-1} + Q \frac{\Delta t}{V} - \frac{\Delta V}{V_m} \quad (16)$$

其中, s^n 和 s^{n-1} 分别代表当前时步和上一时步节点 i 的饱和度。

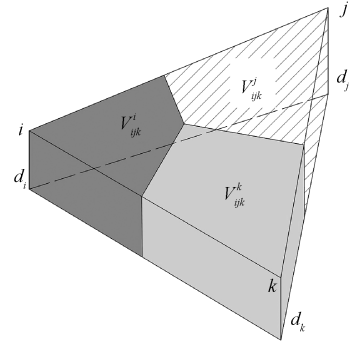


图4 裂缝单元子区域体积定义

Fig. 4 The volume of node associated with a fracture-element

1.3 FEMM 与 Fracflow 耦合

该文将固体计算模块 FEMM 与流体计算模块 Fracflow 耦合, 用于求解缝洞型油藏中裂缝扩展的流固耦合问题, 如图5所示。具体步骤如下: ①在 FEMM 中求解岩体的应力应变场, 裂缝扩展方向及长度; ②更新的裂缝方向和长度数据传递到 Fracflow 中, 计算裂缝面上的水压分布; ③计算所得水压传递到 FEMM 中, 再次计算应力应变场, 更新裂缝扩展方向及扩展长度。

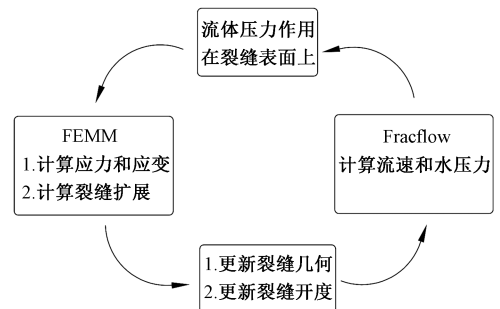


图5 FEMM 与 Fracflow 耦合原理示意图

Fig. 5 Scheme of coupling principle between FEMM and Fracflow

2 数值算例

2.1 裂缝开度计算验证

通过比较 FEMM 和 ABAQUS 的裂缝开度计算结果, 验证数值平台中固体模块计算的有效性。数值模型的几何示意图如图6所示, 模型大小为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 。模型正中间预制一条水平的裂缝, 长 17 m , 宽 2 m , 模型六个表面采用位移约束, 裂缝面上施加恒定的水压力 10 kPa 。模型其他的材料参数如表1所示。在 FEMM 中, 裂缝为一个厚度可当作 0 的平面, 模型的网格划分与裂缝

的位置和形态无关, 而在 ABAQUS 中, 裂缝附近的模型网格划分依赖于裂缝的存在。

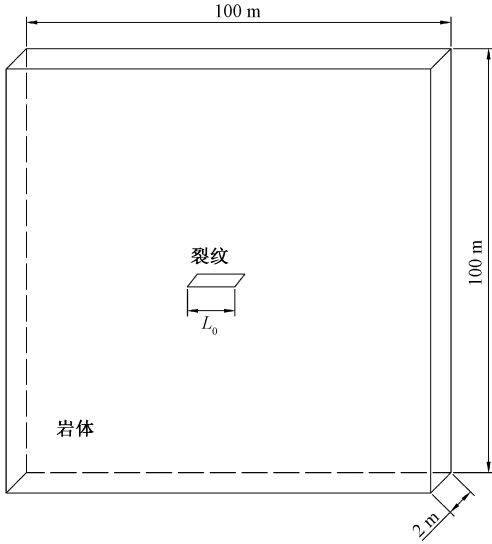


图 6 裂缝开度验证模型几何示意图
Fig. 6 A cubic rock with a central fracture

表 1 裂缝开度验证模型输入参数

输入参数	数值
杨氏模量 E/GPa	10
泊松比 ν	0.25
恒定水压 p/kPa	10

为了定量地比较两者的计算结果, 通过选取裂缝上表面的开度, 绘制了图 7 的拟合图。其中, 在 FEMM 中, 裂缝上表面的最大开度值为 0.0177 m, 在 ABAQUS 中, 该值为 0.0179 m, 两者的结果存在较小的误差, 计算结果具有较好的一致性。

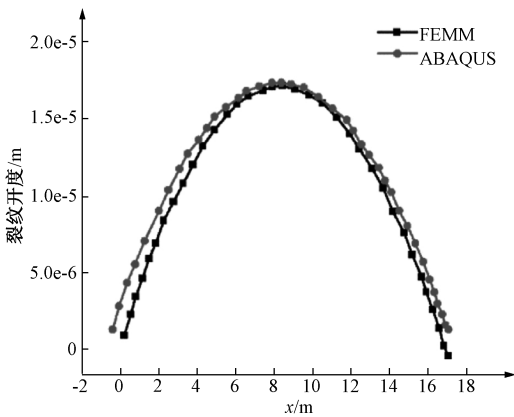


图 7 裂缝开度验证模拟结果
Fig. 7 Simulation results of fracture aperture

2.2 裂缝扩展路径验证

在不考虑流体的情况下, 模拟一个带空洞的

平板中的裂缝扩展路径, 并与 Yang and Zhang (2016) 的模拟结果进行比较。几何模型如图 8 所示, 模型的力学和材料参数如下: 杨氏模量 $E = 30 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.2$, 顶端拉力 $P = 5 \text{ kPa}$, 空洞半径 $d = 0.20 \text{ m}$, 空洞中心距离平板底端垂直距离 $D_f = 1.50 \text{ m}$ 。一条人工裂缝位于平板左侧, 初始长度为 0.1 m。

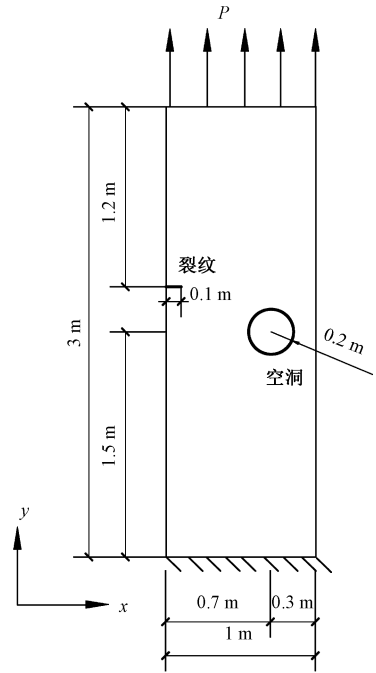


图 8 带空洞平板几何图
Fig. 8 Geometry of a thin plate with a hole and an edge fracture

从裂缝扩展示意图可以看出 (图 9), 裂缝逐渐偏向空洞方向扩展, 直至与空洞连通。将文中裂缝沿 y 方向的偏转位移与文献中的偏转位移进行比较, 如图 10 所示, 可以看到, 两者结果具有较好的一致性。

2.3 溶洞对裂缝扩展的影响研究

同时考虑流体流动的情况下模拟裂缝扩展路径, 为了探究溶洞对裂缝扩展路径的影响规律, 分别建立两个数值模型: 完整岩体和带溶洞岩体, 以比较两者裂缝扩展路径的区别。如图 11 所示, 模型几何尺寸为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$, 溶洞的半径为 3 m。溶洞顶端与裂缝右侧的水平距离 $d_2 = 2 \text{ m}$, 垂直距离 $d_1 = 2 \text{ m}$ 。模型 1 和模型 2 中裂缝面上注水速度恒定。模型 1 与模型 2 的材料参数均相同, 如表 2 所示。

模型的竖向位移云图及裂缝偏转轨迹如图 12 所示, 在考虑渗流时, 完整岩体的竖向变形是对

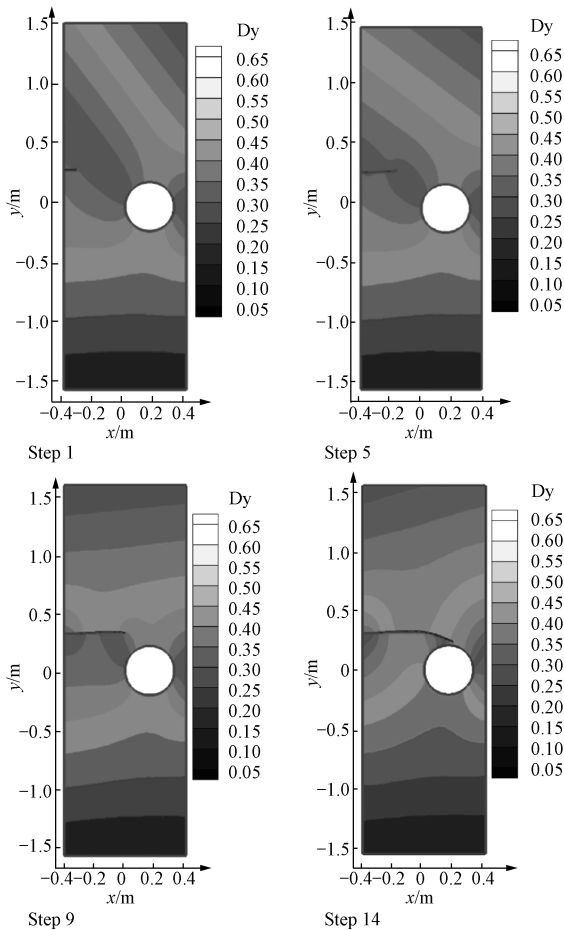


图9 带空洞平板裂纹偏转示意图

Fig. 9 Fracture propagation near a hole without fluid

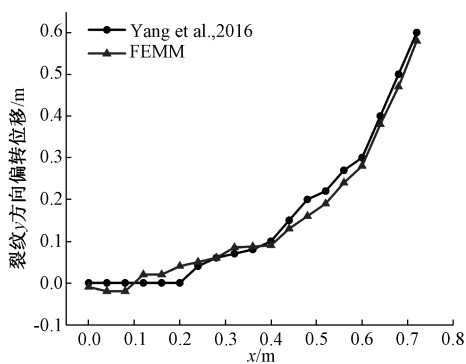


图10 裂缝沿y方向扩展位移比较

Fig. 10 Comparison of the calculated path along the y direction for the fracture propagation near a hole without fluid with that of the reference

称的, 裂缝沿水平方向扩展, 符合一般性规律。而存在溶洞的岩体, 其位移场明显受到扰动, 同时裂缝左侧基本沿水平方向扩展, 而裂缝右侧由于应力集中, 导致裂缝偏向溶洞方向扩展, 最后与溶洞连通。由此可以看出, 溶洞的存在会改变

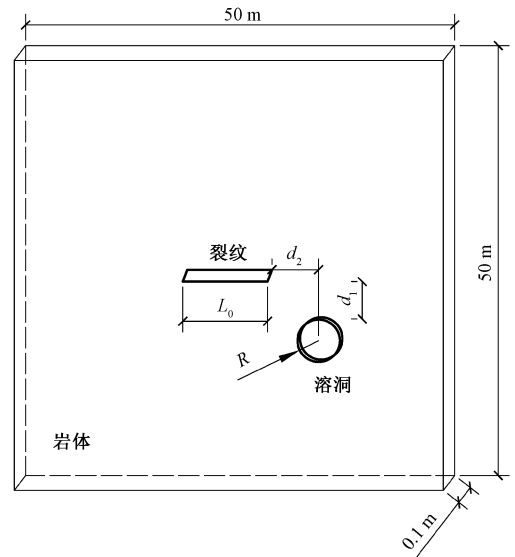


图11 带溶洞立方体几何图

Fig. 11 A cubic domain with a cavity and a central fracture

表2 带溶洞模型输入参数

Table 2 Input parameters for a cubic domain

输入参数	值
杨氏模量 E/GPa	9
泊松比 ν	0.25
抗拉强度 f_t/MPa	1
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1100
材料孔隙度	0.1
裂缝孔隙度	0.25
岩体渗透率 $/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	1.0×10^{-20}
裂缝渗透率 $/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	1.0×10^{-10}
流体黏度 $/(\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1})$	1.0×10^{-3}
流体注入速率 $/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	6.0×10^{-2}

岩体中裂缝的偏转路径, 并且会使裂缝偏向溶洞方向扩展。

在对水力压裂的相关研究中发现, 围压和注入流速是影响裂缝扩展路径的两个重要因素。基于此, 下文将分别讨论围压和注入流速对缝洞型油藏中裂缝扩展路径的影响。

2.4 围压对缝洞型油藏中裂缝扩展路径影响

为探究不同围压对缝洞型油藏中裂缝扩展路径的影响, 建立两个数值模型, 模型尺寸与图 11 相同。模型 1 中围压为 0 MPa, 模型 2 中围压为 50 MPa, 输入参数如表 2 所示。

模型的竖向位移云图如图 13 所示。从图 13a、13b 中可以看出, 由于溶洞的存在, 裂缝右侧附近的应力场被改变, 从而导致裂缝扩展路径的改变。然而随着围压的增大, 溶洞对裂缝扩展路径的影响减弱。从 13c 可以看到, 当岩体水平

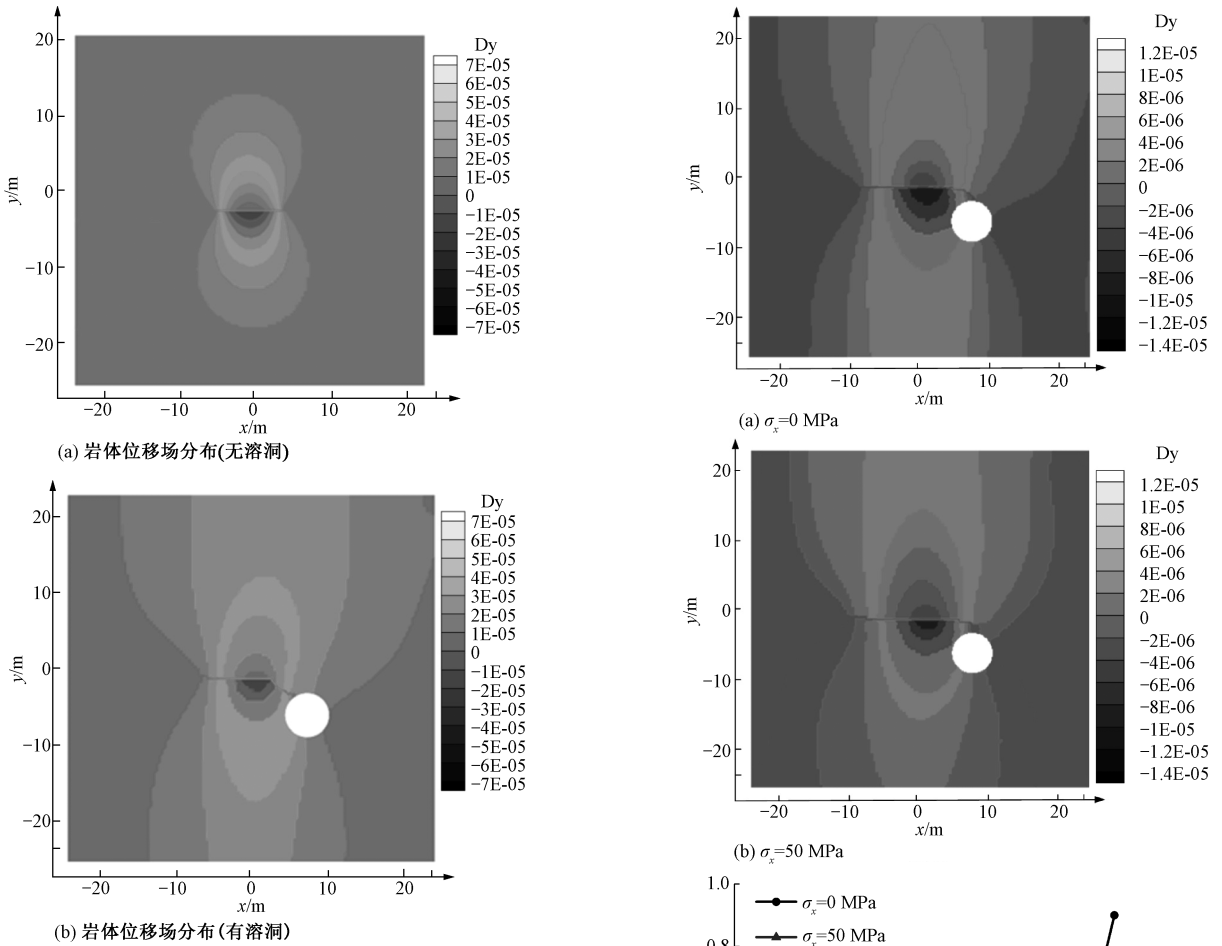


图 12 岩体位移场分布

Fig. 12 Vertical displacement distribution of the reservoir for hydraulic fracture propagation

方向施加较大的围压时, 裂缝沿 y 方向的位移较小, 即裂缝偏向溶洞方向扩展的趋势减弱。因此, 从数值模拟结果中可以看到, 水平单向围压对缝洞型油藏水力裂缝扩展路径有重要影响, 且随着围压的增大, 裂缝由连接型裂缝转化为偏向型裂缝, 说明围压增大时, 对溶洞中石油的采出是不利的。

2.5 注水速度对缝洞型油藏中裂缝扩展路径影响

为了研究注水速度对缝洞型油藏中裂缝扩展路径的影响, 分别采用了注水速度 $v=0.05 \text{ kg/s}$ 和 $v=0.2 \text{ kg/s}$ 的计算模型, 得到如图 14 所示的模拟结果。

从图 14a、14b 中可以看出, 溶洞的存在改变了位移场的对称分布, 裂缝右侧附近的应力场被改变, 导致了裂缝扩展路径改变。从图 14c 可以看出, 当注水速度较小时, 水力裂缝沿 y 方向的偏转位移更大, 即水力裂缝偏向溶洞方向的趋势更强

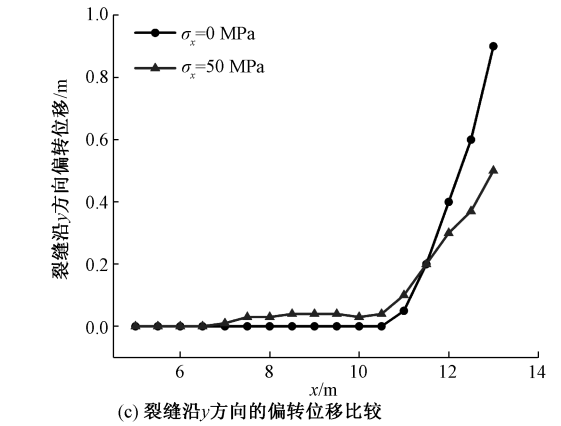
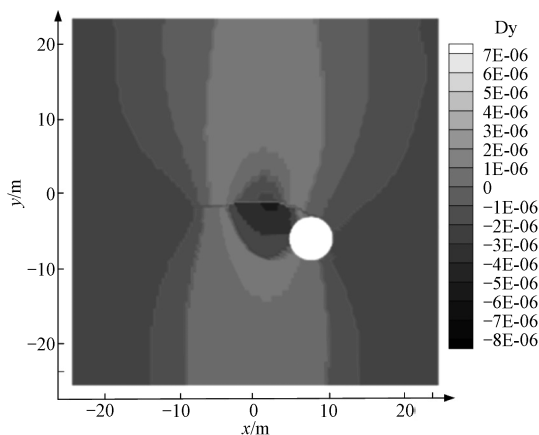
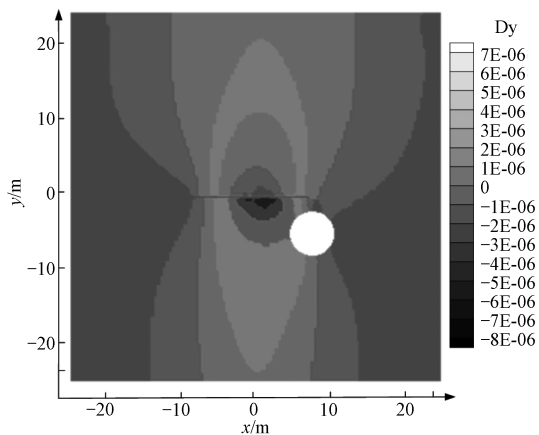
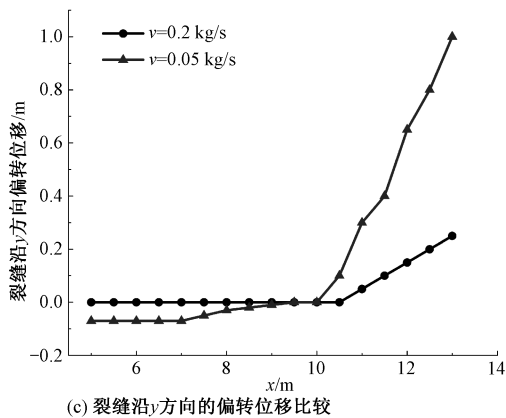


图 13 不同围压下岩体竖向位移图及裂缝沿 y 方向的偏转位移比较

Fig. 13 Comparison of vertical displacement of the reservoir and fracture propagation path along the y direction under different confining pressures

烈, 而当注水速度增加时, 裂缝沿 y 方向的偏转位移较小, 即偏向溶洞方向扩展的趋势减弱, 即注水速度越大, 溶洞对水力裂缝扩展路径的影响越弱, 水力裂缝由连接型裂缝转化为偏向型裂缝。因此, 为了能从溶洞中顺利采出石油, 不宜采用很大的注水速度, 因为大的注水速度可能导致水力裂缝无法与溶洞连通。

(a) $v=0.05$ kg/s(b) $v=0.2$ kg/s

(c) 裂缝沿y方向的偏转位移比较

图 14 不同注水速度下岩体竖向位移场分布

Fig. 14 Vertical displacement distribution of the reservoir under different water injection velocities

2.6 真三维球体溶洞对裂缝扩展路径的影响

为了反映工程中的实际情况，即溶洞储集空间通常是一个三维的封闭空间，试考虑真三维球体溶洞对裂缝扩展路径的影响，如图 15 所示，模型的几何尺寸为 xy 平面为 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ ， z 平面为 25 m 。模型中心预制一条人工裂缝，长为 25 m ，宽为 11 m 。溶洞在岩体的右下部分，半径为 3 m 。

岩体的 8 个角点在 3 个方向的位移为 0，裂缝面上同样施加恒定水压力 $P=100\text{ kPa}$ 。其他相关参数见表 3。数值模拟结果如图 16 所示。从该图可以看出，远离溶洞一侧的裂缝基本沿水平方向偏转，而靠近溶洞一侧的裂缝却沿偏向溶洞的方向偏转，说明溶洞的存在干扰了裂缝附近的应力场和位移场，影响了水力裂缝的偏转轨迹。这样的偏转规律可以为缝洞型油藏的开采起到一定的指导作用。

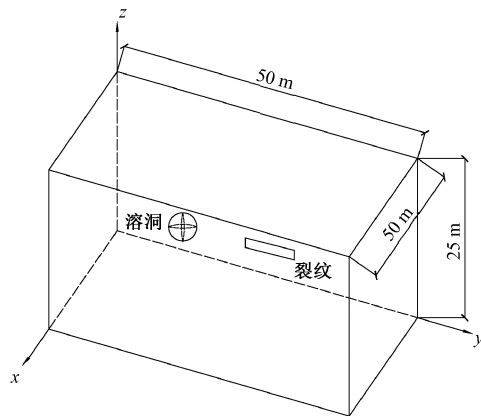


图 15 缝洞型油藏三维模型

Fig. 15 Geometry of the 3D model of the fractured-cavity reservoir

表 3 三维模型输入参数

Table 3 Input parameters for the 3D model

输入参数	值
杨氏模量 E/GPa	1
泊松比 ν	0.20
抗拉强度 f_t/MPa	1
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1100
岩体孔隙度	0.06
岩体渗透率/ m^2	1.0×10^{-20}
裂缝处渗透率/ m^2	1.0×10^{-10}
黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1})$	1.0×10^{-3}

3 结论

文章在 FEMM-Fracflow 数值平台的基础上，研究缝洞型油藏中水力裂缝扩展规律。首先，通过比较裂缝开度在 FEMM 和 ABAQUS 中的计算结果，验证 FEMM 数值计算结果的有效性；然后，通过模拟带空洞平板中裂缝扩展路径，将扩展路径与相关文献的模拟结果进行比较，结果具有较好的一致性；最后，依次探究单向围压和注水速度对缝洞型油藏中水力裂缝扩展路径的影响规律，并模拟了真三维情况下裂缝扩展规律。文章得到的主要结论如下：

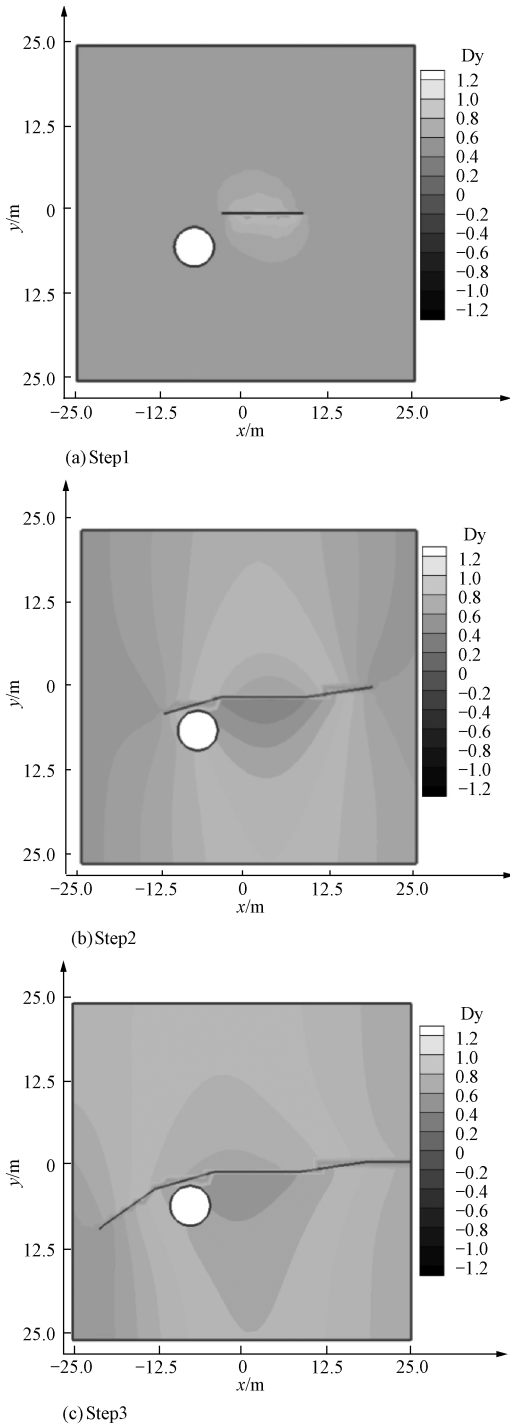


图 16 三维缝洞型油藏裂缝偏转示意图

Fig. 16 Fracture propagation for the 3D hydraulic fracture propagation near a spherical cavity

(1) 在缝洞型油藏中, 溶洞的存在会显著改变裂缝的扩展路径。水力裂缝在溶洞的影响下, 裂缝附近的应力场和位移场均受到干扰, 从而导致了裂缝端部的扩展方向改变。

(2) 单向围压对缝洞型油藏中裂缝的偏转路径有显著的影响。当施加较大的单向围压时, 裂

缝向溶洞方向偏转的趋势较弱; 而当减少围压时, 水力裂缝向溶洞方向偏转的趋势增强, 此时裂缝更容易与溶洞连接, 从而更有利于提高石油的开采量。

(3) 注水流速对缝洞型油藏中裂缝偏转路径有显著的影响。当注水流速较大时, 裂缝向溶洞方向偏转的趋势较弱; 而当注水流速较小时, 裂缝偏向溶洞扩展的趋势较强, 此时裂缝更容易与溶洞连接, 从而更有利于石油开采。

References

- ADA CHI J, SIEBRITS E, PEIRCE A, et al., 2007. Computer simulation of hydraulic fractures [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44 (5): 739-757.
- BELYTSCHKO T, GRACIE R, VENTURA G, 2009. A review of extended/generalized finite element methods for material modeling [J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 17 (4): 043001.
- FU J W, ZHU W S, ZHANG X Z, et al., 2017. Fracturing experiment and numerical simulation study on new material containing a hollow internal crack under internal water pressure [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 49 (4): 78-85. (in Chinese with English abstract)
- GAO B, HUANG Z Q, YAO J, et al., 2016. Pressure transient analysis of a well penetrating a filled cavity in naturally fractured carbonate reservoirs [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 145: 392-403.
- GONG D G, QU Z Q, LI J X, et al., 2016. Extended finite element simulation of hydraulic fracture based on ABAQUS platform [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 37 (5): 1512-1520. (in Chinese with English abstract)
- HAO Z Y, YUE L X, 2018. Thermo-fluid-solid coupling model and numerical simulation of supercritical CO₂ antireflection coal [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 50 (4): 228-236. (in Chinese with English abstract)
- KHVATOVA I E, RENAUD A, MALYUTINA G, et al., 2012. Simulation of complex carbonate field; double media vs. single media Kharyaga field case (Russian) [R]. Moscow: Society of Petroleum Engineers.
- LIU G W, LI Q B, LIANG G H, 2017. A phase-field description of dynamic hydraulic fracturing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36 (6): 1400-1412. (in Chinese with English abstract)
- LIU Q S, SUN L, TANG X H, et al., 2018. Simulate intersecting 3D hydraulic cracks using a hybrid "FE-Meshfree" method [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 91: 24-43.
- MELENK J M, BABUŠKA I, 1996. The partition of unity finite element method; basic theory and applications [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139 (1-4): 289-314.
- RAJENDRAN S, ZHANG B R, 2007. A "FE-Meshfree" QUAD4 element based on partition of unity [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197 (1-4): 128-147.
- RAJENDRAN S, ZHANG B R, 2008. Corrigendum to "A 'FE-

- Meshfree' QUAD4 element based on partition of unity" [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197 (13-16): 1430.
- SHI G H, 1991. Manifold method of material analysis [C] // *Proceedings of the transactions of the ninth army conference on applied mathematics and computing*. Minnesoda; U. S. Army Research Office: 57-76.
- STROUBOULIS T, BABUŠKA I, COPPS K, 2000. The design and analysis of the generalized finite element method [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 181 (1-3): 43-69.
- TANG X H, ZHENG C, WU S C, et al., 2009. A novel four-node quadrilateral element with continuous nodal stress [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 30 (12): 1519-1532.
- WANG L, YANG S L, LIU Y C, et al., 2017. Experiments on gas supply capability of commingled production in a fracture-cavity carbonate gas reservoir [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 44 (5): 779-787. (in Chinese with English abstract)
- WANG X, ZHU Z M, WANG X M, et al., 2017. Effect of integral paths on the accuracy of finite difference method [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 49 (S2): 141-149. (in Chinese with English abstract)
- WITHERSPOON P A, WANG J S Y, IWAI K, et al., 1980. Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture [J]. *Water Resources Research*, 16 (6): 1016-1024.
- WU P F, 2017. Experimental investigation on the crack propagation of hydraulic fracturing in coal-rock combination [D]. Shanxi: Taiyuan University of Technology: 1-50. (in Chinese)
- WU Y, DAI J S, GU Y C, et al., 2014. Numerical simulation of present geo-stress field and its effect on hydraulic fracturing of Fuyu reservoir in Gaotai oilfield [J]. *Journal of Geomechanics*, 20 (4): 363-371. (in Chinese with English abstract)
- XIE J, ZHU Z M, HU R, 2015. Propagation criterion and application of sandstone reservoir fractures under hydraulic fracturing [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 47 (5): 38-45. (in Chinese with English abstract)
- YAN C Z, ZHENG H, SUN G H, 2016. Effect of in-situ stress on hydraulic fracturing based on FDEM-Flow [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 37 (1): 237-246. (in Chinese with English abstract)
- YANG X, ZHANG G Q, LIU Z B, et al., 2017. Experimental research on the variation of fracture width in hydraulic fracturing process [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36 (9): 2232-2237. (in Chinese with English abstract)
- YANG Y T, TANG X H, ZHENG H, 2014. A three-node triangular element with continuous nodal stress [J]. *Computers & Structures*, 141: 46-58.
- YANG Y T, ZHENG H, 2016. A three-node triangular element fitted to numerical manifold method with continuous nodal stress for crack analysis [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 162: 51-75.
- YAO C, ZHAO M, YANG J H, et al., 2017. Improved method of rigid body spring for 2D hydraulic fracturing simulation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 36 (9): 2169-2176. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO K Z, ZHANG L J, ZHENG D M, et al., 2015. A reserve calculation method for fracture-cavity carbonate reservoirs in Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 42 (2): 277-282.
- ZHAO Z J, LIU D A, CUI Z D, et al., 2019. Cyclic progressive pressure on the fracturing effect of shale [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 38 (S1): 2779-2789. (in Chinese with English abstract)
- ZIENKIEWICZ O C, TAYLOR R L, 2000. *The finite element method* [M]. 5th ed. Oxford, Boston: Butterworth-Heinemann.
- ZU K W, CHENG X S, LUO Z L, et al., 2018. The comparative analysis of different methods for fracture prediction in complex carbonate rock reservoir [J]. *Journal of Geomechanics*, 24 (4): 465-473. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 付金伟, 朱维申, 张新中, 等, 2017. 内水压下含中空裂隙新型材料的压裂试验及数值模拟研究 [J]. *工程科学与技术*, 49 (4): 78-85.
- 龚迪光, 曲占庆, 李建雄, 等, 2016. 基于 ABAQUS 平台的水力裂缝扩展有限元模拟研究 [J]. *岩土力学*, 37 (5): 1512-1520.
- 郝志勇, 岳立新, 2018. 超临界 CO₂ 增透煤热流固耦合模型与数值模拟 [J]. *工程科学与技术*, 50 (4): 228-236.
- 刘国威, 李庆斌, 梁国贺, 2017. 动力水力压裂的相场模拟方法 [J]. *岩石力学与工程学报*, 36 (6): 1400-1412.
- 王璐, 杨胜来, 刘义成, 等, 2017. 缝洞型碳酸盐岩气藏多层合采供气能力实验 [J]. *石油勘探与开发*, 44 (5): 779-787.
- 王雄, 朱哲明, 汪小梦, 等, 2017. 不同积分路径对动态有限差分法计算精度的影响效应 [J]. *工程科学与技术*, 49 (S2): 141-149.
- 武鹏飞, 2017. 煤岩复合体水压致裂裂纹扩展规律试验研究 [D]. 山西: 太原理工大学: 1-50.
- 伍亚, 戴俊生, 顾玉超, 等, 2014. 高台子油田扶余油层现今地应力数值模拟及对水力压裂的影响 [J]. *地质力学学报*, 20 (4): 363-371.
- 谢军, 朱哲明, 胡荣, 2015. 砂岩储层裂缝在水力压裂作用下扩展准则及其应用 [J]. *四川大学学报 (工程科学版)*, 47 (5): 38-45.
- 严成增, 郑宏, 孙冠华, 等, 2016. 基于 FDEM-Flow 研究地应力对水力压裂的影响 [J]. *岩土力学*, 37 (1): 237-246.
- 杨潇, 张广清, 刘志斌, 等, 2017. 压裂过程中水力裂缝动态宽度实验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 36 (9): 2232-2237.
- 姚池, 赵明, 杨建华, 等, 2017. 基于改进刚体弹簧方法的二维水压致裂模型 [J]. *岩石力学与工程学报*, 36 (9): 2169-2176.
- 赵子江, 刘大安, 崔振东, 等, 2019. 循环渐进升压对页岩压裂效果的影响 [J]. *岩石力学与工程学报*, 38 (S1): 2779-2789.
- 祖克威, 程秀申, 罗周亮, 等, 2018. 复杂碳酸盐岩储层裂缝预测方法对比性研究 [J]. *地质力学学报*, 24 (4): 465-473.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

