

引用格式:张耀峰,邵祖亮,王涛,等.基于FEMM的径向井压裂裂缝扩展模拟研究[J].油气藏评价与开发,2020,10(1):102-107.

ZHANG Y F, SHAO Z L, WANG T, et al. Research on fracture propagation of radial well fracturing based on finite element-meshfree method[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1): 102-107.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.01.016

# 基于FEMM的径向井压裂裂缝扩展模拟研究

张耀峰<sup>1</sup>,邵祖亮<sup>1</sup>,王涛<sup>2</sup>,伯音<sup>1</sup>

(1.武汉大学土木建筑工程学院,湖北武汉430072;2.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛266580)

**摘要:**径向井可用于引导水力压裂裂缝定向扩展,达到沟通非常规储层中的天然裂隙或溶洞,提高油气资源采收率的目的。径向井压裂技术已经在低渗透、浅埋藏油气田中得到了初步的应用和发展,但其机理仍不明确。因此,介绍了FEMM(Finite Element-Meshfree Method)的基本原理,并基于FEMM和现场数据建立了不同布井角度的径向井水力压裂模型,研究了不同方位角对径向井压裂裂缝扩展的影响规律。结果表明:利用FEMM验证了径向井对水力裂缝的扩展有一定的引导作用;水力裂缝首先沿着径向井方向扩展,扩展一段距离后沿着最大水平主应力方向扩展;径向井与最大水平主应力的夹角越大,径向井引导水力裂缝扩展的距离越短,径向井对裂缝的引导作用越小。研究成果对径向井压裂技术的应用具有一定的意义。

**关键词:**径向井;水力压裂;FEMM;引导扩展;裂缝路径

**中图分类号:**TE357

**文献标识码:**A

## Research on fracture propagation of radial well fracturing based on finite element-meshfree method

ZHANG Yaofeng<sup>1</sup>, SHAO Zuliang<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>2</sup>, BO Yin<sup>1</sup>

(1.School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

2.School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao, Shandong 266580, China)

**Abstract:** Radial wells can be used to guide the propagation of hydraulic fractures in order to connect the natural fractures or caves in unconventional reservoirs and improve the recovery of oil and gas resources. Fracturing technology of radial wells has been preliminarily applied and developed in low permeability and shallow reservoirs, but its mechanism is still not very clear. Therefore, the basic principle of FEMM(Finite Element-Meshfree Method) is introduced. Besides, based on the FEMM and the field data, the radial well fracturing model with different well angles is established, and the effect of different azimuth angles on fracture propagation of radial well fracturing is studied. The results show that by using FEMM, it can be verified that radial wells play a guiding role in hydraulic fracturing. In addition, the hydraulic fracture firstly propagates along the direction of radial wells. After extending a certain distance, it turns to the direction of maximum horizontal stress. The bigger the angle between the radial wells and the horizontal maximum principal stress, and the shorter the length of fracture extending along the radial wells, the weaker the guiding ability of radial wells will be. The research results contribute to the application of radial well fracturing technology.

**Key words:** radial well, hydraulic fracturing, FEMM, orientated propagation, fracture path

径向井压裂是一种新兴的油气增产技术,其将径向井技术与水力压裂技术高效结合,在一定程度上可以使水力裂缝定向扩展。目前,水力压裂技术

已广泛应用于煤层气开发中,但由于储藏条件复杂,无法达到预期效果<sup>[1]</sup>。为达到更好的压裂效果,径向井压裂技术开始应用于煤层气开发<sup>[2-3]</sup>,且已经在部

收稿日期:2019-08-01。

第一作者简介:张耀峰(1993—),男,在读硕士研究生,缝洞型油气藏的水力裂缝扩展机理研究。通讯地址:湖北省武汉市武昌区珞珈山街道八一路299号武汉大学,邮政编码:430072。E-mail:283276158@qq.com

基金项目:国家自然科学基金“页岩气开采水力压裂过程中裂缝网络形成机理及模拟分析方法”(41602296)。

分低渗透、浅埋藏油气田中进行了先导性试验<sup>[4-6]</sup>,但径向井引导水力裂缝扩展的机理仍不是十分明确。现阶段,国内部分学者初步探索了径向井引导水力裂缝扩展的机理。田雨等<sup>[7]</sup>基于多分支径向井压裂裂缝起裂压力分析和塑性区理论,推导出了多分支径向井在地应力条件下引导裂缝定向扩展的准则。李小龙等<sup>[8]</sup>基于扩展有限元(XFEM, Extended Finite Element Method)研究了径向井压裂裂缝起裂与扩展的规律,明确了多个径向井沿垂向分布或水平分布时水力裂缝的形态。刘海龙等<sup>[9]</sup>建立了一个新模型,这个模型同时考虑套管和水泥环的井周应力分布新,并利用新模型研究了不同条件下起裂压力的变化。曲占庆等<sup>[10]</sup>在多分支径向井压裂裂缝形态研究的基础上,揭示了径向井排列方式对水力压裂裂缝扩展的影响。刘晓强等<sup>[11]</sup>利用ABAQUS建立了径向井辅助水力压裂模型,分析了水平地应力差、压裂液排量、杨氏模量、压裂液黏度和泊松比等因素对水力压裂裂缝扩展的影响。郭天魁等<sup>[12-13]</sup>研究了垂向井距对径向井引导水力裂缝扩展的作用,为径向井的钻取提供了理论支持。

目前有限元法已经广泛应用于工程模拟中,然而在模拟水力压裂的过程中,裂缝面需要沿着单元面和单元节点,这导致裂缝尖端附近的网格需重新划分,降低了计算速度。因此,有学者在有限元方法中引入了统一分割概念,衍生出了广义有限元(GFEM, Generalized Finite Element Method)<sup>[14]</sup>,XFEM(Extended Finite Element Method)<sup>[15]</sup>,FEMM(Finite Element–Meshfree Method)<sup>[16]</sup>等数值方法,其中FEMM是一种结合了有限元法和无网格法的方法。

2007年RAJENDRAN等<sup>[6]</sup>首次提出了FEMM。FEMM结合了有限元法和无网格法两种数值方法的优势<sup>[17]</sup>,主要包括:①能够得到清晰的三维裂缝扩展形态;②相对有限元法,模拟过程中无需重新划分网格,算法稳定快速;③单元的尺寸不影响非平面裂缝的扩展精度;④相对于商业软件ABAQUS中的XFEM,FEMM在模拟裂缝扩展过程中无需改变总体矩阵和自由度。

目前国内外学者利用FEMM进行的研究相对较少,因此首先介绍了FEMM的基本理论,然后基于FEMM和现场数据开展了不同角度的径向井压裂模拟,研究了水力裂缝在径向井作用下的扩展规律。

## 1 FEMM的基本原理

一个具有4个节点 $P=(P_1, P_2, P_3, P_4)$ 的岩石四面体单元 $\Omega$ 被水力裂缝面 $S$ 切割,如图1所示。裂缝面切割四面体单元的剖面图如图2所示,图中存在3种不同类型的单元和2种不同类型的节点。3种单元包括:裂缝单元、桥接单元和有限元单元。被裂缝面穿过的四面体单元称为裂缝单元,桥接单元为紧邻裂缝单元的四面体单元,其余四面体单元为有限元单元。节点有2种类型,包括单位分解节点和有限元节点。构成裂缝单元的节点称为单位分解节点,其余的节点为有限元节点<sup>[18]</sup>。

在模型计算过程中,对于任意一个节点 $x=\{x, y, z\}$ ,在单元域 $\Omega$ 内的全局近似函数 $u^h(x)$ 定义为:

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

其中 $\omega_i(x)$ 为与节点 $i$ 相关的权函数,有 $\omega_1(x)+\omega_2$

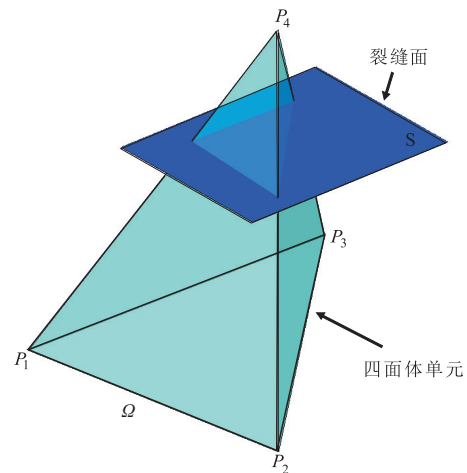


图1 裂缝面切割四面体单元

Fig. 1 A tetrahedral element intersected with a fracture surface

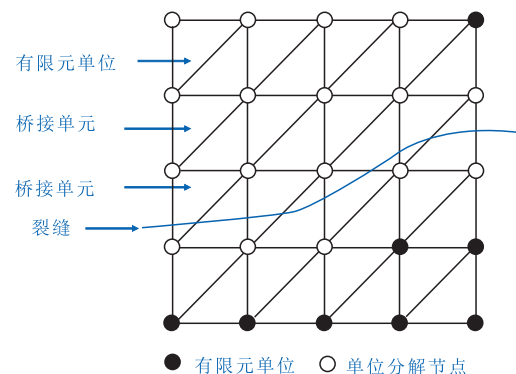


图2 单元与节点

Fig. 2 Elements and nodes

$(x)+\omega_3(x)+\omega_4(x)=1$ ,  $u_i(x)$ 是与节点  $i$  相关的局部近似函数。与有限元节点相关的局部近似函数等于1,与单位分解节点相关的局部近似函数采用最小二乘法计算得到<sup>[19]</sup>。

对于裂缝单元,为表达裂缝面穿过部分的单元剖面的非连续位移场,首先定义  $\Psi$  是一个与单元域相关的节点集合。基于可视化准则<sup>[14]</sup>,定义可见区域  $\Psi_{\Omega}^{vis}$  为:

$$\Psi_{\Omega}^{vis} = \{x_i \in \Psi_{\Omega} \mid [x - x_i] \cap \text{crack surface} = \emptyset\} \quad (2)$$

其中  $x_i$  为节点  $i$  的坐标。为了构造沿裂缝面的非连续性近似函数,采用 Shepard 公式<sup>[20]</sup>作为与裂缝单元相关的权函数。因此,根据可见性区域,在节点  $i$  相对应的子权函数  $\varphi_i'(x)$  定义为:

$$\varphi_i'(x) = \begin{cases} \varphi_i(x) & x \in \Psi_{\tau}^{vis} \\ 0 & x \notin \Psi_{\tau}^{vis} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $\varphi_i(x)$  由四面体单元上的传统有限元形函数构成的,  $\varphi_i(x)$  具体形式如下:

$$\varphi_1(x) = \frac{\text{vol}(P(x)P_2P_3P_4)}{\text{vol}(P_1P_2P_3P_4)} \quad (4)$$

$$\varphi_2(x) = \frac{\text{vol}(P(x)P_3P_4P_1)}{\text{vol}(P_1P_2P_3P_4)} \quad (5)$$

$$\varphi_3(x) = \frac{\text{vol}(P(x)P_4P_1P_2)}{\text{vol}(P_1P_2P_3P_4)} \quad (6)$$

$$\varphi_4(x) = \frac{\text{vol}(P(x)P_1P_2P_3)}{\text{vol}(P_1P_2P_3P_4)} \quad (7)$$

其中  $\text{vol}(P_1P_2P_3P_4)$  是四面体单元的体积,  $\text{vol}(P(x)P_iP_jP_k)$  是由点  $P(x)$  及四面体单元中3个顶点  $\{P_i, P_j, P_k\}$  组成的新的四面体单元的体积。

与节点  $i$  对应的裂缝单元权函数为:

$$\omega_i(x) = \frac{\varphi_i'(x)}{\varphi_1'(x) + \varphi_2'(x) + \varphi_3'(x) + \varphi_4'(x)} \quad (8)$$

对于桥接单元,其权函数与标准有限元定义的形函数相同,可以通过下式计算得到:

$$\omega_i(x) = \varphi_i(x) \quad (9)$$

对于有限元单元,其形函数与传统有限元单元的形函数相同。

## 2 径向井引导水力裂缝扩展模拟

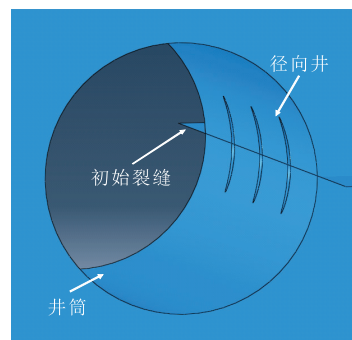
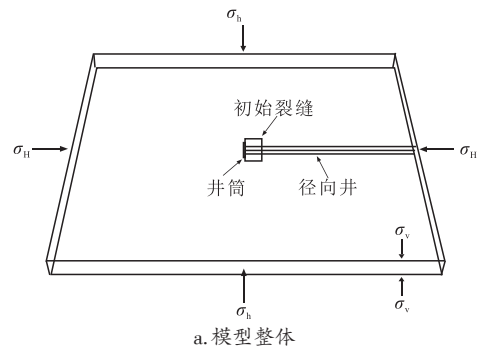
在多场耦合模拟平台 CoFrac 上进行径向井压裂数值模拟。CoFrac 多场耦合模拟平台以 FEMM 为基础进行创建,能够模拟“应力场—渗流场—温度场”作用下的裂缝扩展问题。

刘晓强等<sup>[11]</sup>已经通过真三轴物理实验和扩展有限元法数值模拟的结果对照验证了径向井对裂缝的扩展具有一定的引导作用。因此,利用 FEMM 模拟地层中径向井压裂裂缝扩展,验证径向井可以引导水力裂缝扩展,进一步研究径向井与最大水平主应力的夹角对裂缝扩展的影响。

### 2.1 模型建立

径向井与最大水平主应力的夹角定义为径向井方位角,用  $\theta$  表示。建立了7种不同方位角的水力压裂模型,方位角分别是  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ ,以研究不同方位角的径向井对水力裂缝扩展的影响。图3是方位角为  $0^\circ$  时的径向井压裂模型,  $\sigma_H, \sigma_h, \sigma_v$  分别是最大水平主应力、最小水平主应力、垂向应力。

依据工程中井筒和径向井的实际尺寸,选用直径为  $0.1397 \text{ m}$ ,高度为  $2 \text{ m}$  的井筒,和直径为  $0.05 \text{ m}$ ,长  $20 \text{ m}$  的径向井。模型中含有3个间距为  $0.5 \text{ m}$  的径向井眼,在同一垂直面上相互平行排列。基于径向井的尺寸与排布方式,储层尺寸设定为长  $40 \text{ m}$ ,宽  $40 \text{ m}$ ,高  $2 \text{ m}$ 。初始裂缝的长度均为  $2 \text{ m}$ ,高度为  $3 \text{ m}$ ,缝宽为  $0 \text{ m}$ 。初始裂缝位于预计的起裂点,且穿过径向井眼轴线同时与井筒轴线平行。压裂液采用恒压



b. 井筒周围

图3 裂缝扩展计算模型

Fig. 3 Calculation model of fracture propagation

注入方式泵注,并且在每个分析步后,水力裂缝的扩展长度均为2 m。储层力学参数采用某个低渗透油气地质资料中的实际储层参数。使用的储层力学参数与径向井尺寸如表1所示。

### 2.2 结果与讨论

根据表1中的参数,在多场耦合模拟平台 CoFrac 上进行模拟。图4为径向井方位角为0°(径向井方向与最大水平主应力方向相同)时的水力裂缝扩展模拟结果。图中第n步表示数值模拟计算的第n个计算步,X和Y分别是横纵坐标轴,示意图均以此表示。由图可知,水力裂缝沿着径向井方向扩展。本案例验证了以FEMM法为基础的CoFrac平台能够处理地层中的径向井压裂问题。

其他条件不变,径向井方位角为15°,30°,45°,

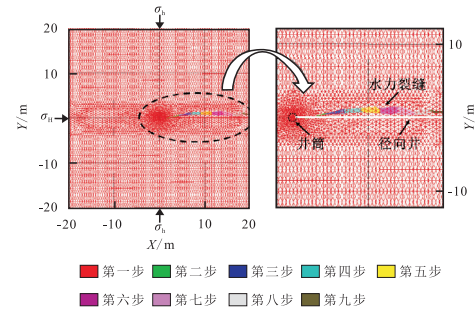


图4 径向井方位角为0° 时水力裂缝起裂及扩展  
Fig. 4 Hydraulic fracture initiation and propagation with radial well azimuth of 0°

60°,75°,90°时的模型裂缝扩展模拟结果如图5所示。由六组实验结果分析可知,水力裂缝首先沿着径向井方向扩展,扩展一定的距离后,在径向井和地应力的共同作用下,水力裂缝逐渐偏离径向井方向,

表1 裂缝扩展模型基础参数

Table 1 Basic parameters of fracture propagation model

储层尺寸/m	井筒直径/m	径向井长度/m	径向井直径/m	岩石泊松比	岩石孔隙度/%
40×40×2	0.139 7	20	0.05	0.25	16
岩石渗透率/10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup>	岩石杨氏模量/GPa	垂向地应力/MPa	最大水平主应力/MPa	最小水平主应力/MPa	泵注压力/MPa
30	13	45	41	36	41

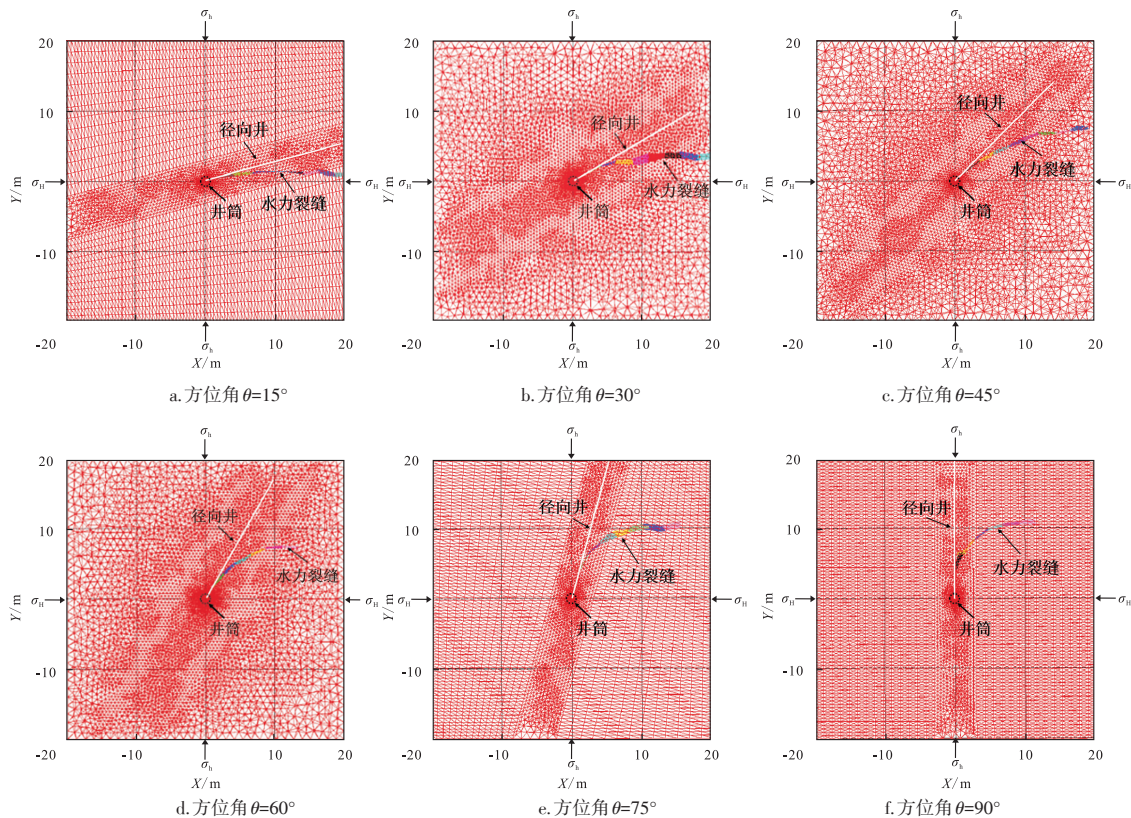


图5 不同方位角下水力裂缝起裂及扩展

Fig. 5 Hydraulic fractures initiation and propagation under different azimuths

偏向最大水平主应力方向。结果表明:径向井对水力裂缝的扩展有一定的引导作用,不同方位角的径向井对水力裂缝的引导效果不同。

为了进一步量化不同方位角的径向井对水力裂缝的引导作用,采用如下方法定义引导距离:从水力裂缝开始沿水平方向扩展的点作径向井轴线的垂线,将井筒圆心与垂足之间的距离定义为径向井引导水力裂缝的距离,用 $h$ 表示,如图6所示,其中 $h_{15}$ ,

$h_{30}, h_{45}, h_{60}, h_{75}, h_{90}$ 分别表示径向井方位角为 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 时的引导距离。

不同条件下径向井的引导距离变化趋势见图7。特别地,当径向井方位角为 $0^\circ$ 时,裂缝沿着径向井方向扩展,因此引导距离与径向井长度相同, $h_0=20$  m。由图7可知,径向井的方位角越大,引导距离越小。由此分析,径向井的方位角越大,径向井对水力裂缝扩展的引导作用越小。

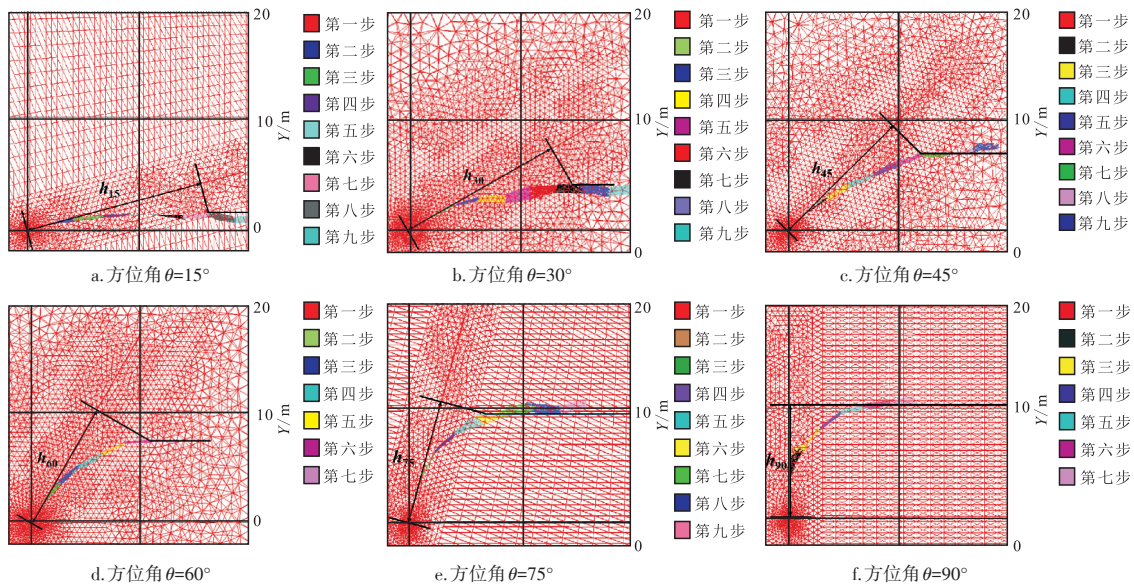


图6 水力裂缝起裂及扩展

Fig. 6 Hydraulic fractures propagation

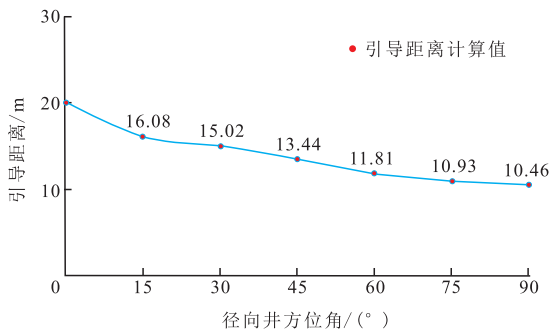


图7 不同径向井方位角对引导距离的影响

Fig. 7 Effect of different radial well azimuths on guiding distance

### 3 结论

用FEMM法,模拟了不同方位角下径向井水力压裂裂缝扩展,得到了以下结论:

1) 基于FEMM的CoFrac模拟平台能够模拟地层中径向井压裂裂缝扩展。

2) 利用FEMM验证了径向井可引导水力裂缝扩展,即在径向井的引导下,水力裂缝沿着径向井方向扩展,扩展一段距离后,最终沿着最大水平主应力方向进行扩展。

3) 径向井方位角对引导作用的影响为:径向井的方位角越大,裂缝越早地沿着最大水平主应力扩展,径向井对水力裂缝的引导作用越小,研究结果对径向井压裂技术的应用具有一定的意义。

#### 参考文献

- [1] 吴信波,王谦,张俊. 彬长矿区煤层气井水力压裂效果影响因素分析[J]. 非常规油气, 2017, 4(6): 100-104.  
WU X B, WANG Q, ZHANG J. Analysis on influencing factors of hydraulic fracturing effect of coalbed methane wells in Binchang[J]. Unconventional Oil and Gas, 2017, 4(6): 100-104.
- [2] 张守仁,胡彦林,李贵川,等. 煤层气短水平段径向钻井压裂技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(5): 50-53.  
ZHANG S R, HU Y L, LI G C, et al. Short horizontal sectional radial drilling and fracturing technology of coalbed methane and application[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 50-53.
- [3] 郝春生,季长江. 基于径向井技术的煤储层高效增透工艺研

- 究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(5): 39-42.  
HAO C S, JI C J. Study on high efficient permeability improved technique of coal reservoir based on radial well technology[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 39-42.
- [4] 马开良, 吴福才, 杨永印, 等. 径向井技术在韦5井的应用[J]. 钻采工艺, 2005, 28(5): 17-20.  
MA K L, WU F C, YANG Y Y, et al. Application of radial horizontal drilling technology in W5 well[J]. Drilling and Production Technology, 2005, 28(5): 17-20.
- [5] 钱国全, 储明来, 刘子龙, 等. 水力喷射径向钻孔技术在江苏油田的应用研究[J]. 复杂油气藏, 2012, 5(4): 62-64.  
QIAN G Q, CHU M L, LIU Z L, et al. Research of the application of hydraulic jet radial drilling technique in Jiangsu Oilfield[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2012, 5(4): 62-64.
- [6] 党文辉, 马宏伟, 陈建林, 等. 套管内钻孔深穿透径向井技术[J]. 石油钻采工艺, 2013, 35(1): 45-47.  
DANG W H, MA H W, CHEN J L, et al. Research on deep penetration of radial well hole-drilling in casing[J]. Oil Drilling and Production Technology, 2013, 35(1): 45-47.
- [7] 田雨, 曲占庆, 郭天魁, 等. 径向井引导水力压裂裂缝定向扩展技术[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(20): 154-159.  
TIAN Y, QU Z Q, GUO T K, et al. Theoretical research on radial wells orientating hydraulically created fracture directional extended[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(20): 154-159.
- [8] 李小龙, 李建雄, 王涛, 等. 基于数值模拟的径向井压裂裂缝形态[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(3): 90-95.  
LI X L, LI J X, WANG T, et al. Crack morphology of the radial well fracturing based on the numerical simulation[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(3): 90-95.
- [9] 刘海龙, 张磊, 谢涛, 等. 定向射孔水力压裂起裂压力研究[J]. 石油机械, 2018, 46(9): 63-68.  
LIU H L, ZHANG L, XIE T, et al. Study on hydraulic fracturing initiation pressure of oriented perforating[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(9): 63-68.
- [10] 曲占庆, 李小龙, 李建雄, 等. 基于扩展有限元法的多径向井压裂裂缝形态[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(1): 73-81.  
QU Z Q, LI X L, LI J X, et al. Crack morphology of multiple radial well fracturing based on extended finite element method[J]. Journal of China University of Petroleum, 2018, 42(1): 73-81.
- [11] 刘晓强, 曲占庆, 郭天魁, 等. 径向井辅助水力压裂引导裂缝扩展数值模拟[J]. 特种油气藏, 2018, 25(5): 156-162.  
LIU X Q, QU Z Q, GUO T K, et al. Numerical simulation of fracture propagation oriented by radial well assisted hydraulic fracturing[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2018, 25(5): 156-162.
- [12] GUO T K, LIU B Y, QU Z Q, et al. Study on initiation mechanisms of hydraulic fracture guided by vertical multi-radial boreholes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(7): 1767 - 1785.
- [13] GUO T K, QU Z Q, GONG D G, et al. Numerical simulation of directional propagation of hydraulic fracture guided by vertical multi-radial boreholes[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 35: 175-188.
- [14] DUARTE C A, HAMZEH O N, LISZKA T J. A generalized finite element method for the simulation of three-dimensional dynamic crack propagation[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2001, 190(15-17): 2227-2262.
- [15] MOES N, DOLBOW J, BELYTSCHKO T. A finite element method for crack growth without remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 46: 131-150.
- [16] RAJENDRAN S, ZHANG B R. A "FE-Meshfree" QUAD4 element based on partition of unity[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2007, 197(1-4): 128-147.
- [17] YANG Y, CHEN L, TANG X H, et al. Corrigendum to A partition-of-unity based 'FE-Meshfree' hexahedral element with continuous nodal stress[J]. Computers and Structures, 2017, 178: 17-28.
- [18] HU M, WANG Y, RUTQVIST J. On continuous and discontinuous approaches for modeling groundwater flow in heterogeneous media using the numerical manifold method: model development and comparison[J]. Advances in Water Resources, 2015, 80: 17-29.
- [19] YANG Y T, TANG X H, ZHENG H. A three-node triangular element with continuous nodal stress[J]. Computers and Structures, 2014, 141: 46-58.
- [20] SUKUMAR N, MOES N, MORAN B, et al. Extended finite element method for three-dimensional crack modelling[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000, 48: 1549-1570.

(编辑 徐佩)