

# 有限元分析径向水力压裂裂缝扩展影响因素

褚春波<sup>1</sup>, 郭 权<sup>1</sup>, 黄小云<sup>1</sup>, 黄振萍<sup>1</sup>, 何 宇<sup>2</sup>, 王亚辉<sup>2</sup>

1. 中国石油大庆油田试油试采分公司 黑龙江大庆 163412

2. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司 河北廊坊 065007

通讯作者: Email: chuchunbo@petrochina.com.cn

项目支持: 中国石油科技创新基金“孔压下超临界 CO<sub>2</sub> 压裂液对页岩气储层力学特性影响”(2017D-5007-0313)

引用: 褚春波, 郭权, 黄小云, 等. 有限元分析径向水力压裂裂缝扩展影响因素[J]. 油气井测试, 2018, 27(2): 59-66.

Cite: CHU Chunbo, GUO Quan, HUANG Xiaoyun *et al.* Finite-element analysis on influencing factors for propagation of fractures induced in radial jet hydraulic fracturing [J]. Well Testing, 2018, 27(2): 59-66.

**摘要** 径向水射流辅助压裂的裂缝起裂和扩展机理尚不明确, 基于 ABAQUS 平台, 采用扩展有限元法对径向井水力压裂过程中裂缝的扩展过程进行数值模拟, 探索径向井方位角、井径、井长、水平地应力差、岩石杨氏模量、岩石泊松比、储层渗透率、压裂液黏度、排量等 9 个因素对径向井引导裂缝扩展效果的影响规律, 并利用灰色关联分析法研究各因素对径向井引导效果的影响能力大小。结果表明, 随井径、井长、岩石泊松比等参数增大, 径向井对裂缝引导效果增强; 随径向井方位角、水平地应力差值等参数增大, 径向井对裂缝引导效果减弱。各因素影响径向井对裂缝引导效果的程度由大至小顺序为: 水平地应力差值、径向井方位角、井径、岩石泊松比、压裂液排量、储层渗透率、井长、压裂液黏度、岩石杨氏模量。该分析为径向井辅助压裂技术在低渗油藏的应用具有指导意义。

**关键词** 压裂; 水力压裂; 径向井; 裂缝; 有限元; ABAQUS; 引导能力; 影响因素

中图分类号: TE353

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.02.010

## Finite-element analysis on influencing factors for propagation of fractures induced in radial jet hydraulic fracturing

CHU Chunbo<sup>1</sup>, GUO Quan<sup>1</sup>, HUANG Xiaoyun<sup>1</sup>, HUANG Zhenping<sup>1</sup>, HE Yu<sup>2</sup>, WANG Yahui<sup>2</sup>

1. Well Testing Company of PetroChina Daqing Oilfield Company Limited, Daqing, Heilongjiang 163412, China

2. Well Testing Branch of CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Langfang, Hebei 065007, China

**Abstract:** The initiation and propagation mechanism of fractures induced in radial jet fracturing (RJF) is unknown. In this paper, numerical simulation was performed for propagation of RJF fractures by using the extended finite element method on the ABAQUS platform to highlight the impacts of 9 factors, i.e. radial well azimuth, borehole diameter, well length, horizontal differential geostress, Young modulus, Poisson's ratio, reservoir permeability, fracturing fluid viscosity and flow rate, on the propagation of the hydraulic fractures. Moreover, the grey relational analysis was conducted to diagnose how the factors affect the propagation of RJF fractures. The study results show that the propagation capacity of RJF fractures enhances with the increase in borehole diameter, well length, and Poisson's ratio, but reduces with the increase in radial well azimuth, horizontal differential geostress and other factors. In view of the impacts, these factors present a descending order of horizontal differential geostress, radial well azimuth, borehole diameter, Poisson's ratio, fracturing fluid flow rate, reservoir permeability, well length, fracturing fluid viscosity, and Young modulus. The results provide necessary guidance for application of radial jet fracturing in low-permeability oil reservoirs.

**Keywords:** fracturing; hydraulic fracturing; radial jet; fracture; finite element; ABAQUS; conductivity; influencing factors

近年来,各油田对低渗储层的开发力度逐渐增大<sup>[1]</sup>。水平井技术不断发展,运用钻井手段形成径向水平井眼辅助压裂解决难动用储量的方法已越来越受到重视<sup>[2]</sup>。径向井辅助压裂技术是在高压水射流钻出径向水平井的基础上,进行水力压

裂<sup>[3]</sup>,在径向井井筒附近形成高导流能力的裂缝,以增加产油量的技术<sup>[4]</sup>。

目前,有关径向井压裂后裂缝扩展的机理研究较多。杨阳等依据水电相似原理,设计径向井远端压裂电模拟实验模型,研究在裂缝为横向裂缝且径

向井筒内摩阻较高的条件下,裂缝条数、裂缝间距、裂缝长度不同时径向井远端压裂的渗流场分布规律<sup>[5]</sup>。龚迪光等通过建立多分支径向井井壁稳定力学模型及有限元数值模拟,探究了径向井方位角、地应力差等参数对分支径向井井壁稳定性的影响<sup>[6]</sup>。曲占庆等通过 ABAQUS 扩展有限元法 (XFEM) 建立基于地层流-固耦合方程的储层模型,模拟分析单径向井、垂向多径向井、水平多径向井情况下的裂缝形态<sup>[7]</sup>。刘晓强等通过数模探究了径向井井径、井距等对裂缝扩展的影响规律,利用 Abaqus 软件模拟,并通过大型真三维物模实验验证了数模结果<sup>[8]</sup>。李建雄等研究了不同径向孔眼参数对裂缝扩展形态的影响规律<sup>[9]</sup>。通过调研可以看出,目前对径向井辅助压裂中裂缝扩展机理的研究相对较少<sup>[10]</sup>,更重要的是对影响因素的分析不全面,大部分文献只涉及了其中一部分参数,如李小龙等通过径向井压裂物理模拟实验研究压裂裂缝形态,发现径向井对压裂裂缝的扩展具有一定的引导作用,多径向井条件下会产生多裂缝形态<sup>[11]</sup>。

因此,深入探究各因素对径向井引导效果的影响规律具有必要性,对径向井辅助压裂改造具有重要的指导意义。数值模拟已经被广泛应用在诸多工程领域<sup>[12]</sup>,随着扩展有限元理论的深入研究,利用扩展有限元方法数值模拟水力压裂具有了一定的可操作性,李小龙等<sup>[13]</sup>和龚迪光等<sup>[14]</sup>均采用有限元方法研究了水力压裂裂缝的扩展规律。

本文在 Abaqus 有限元软件的基础上,建立了真实储层径向井三维模型,研究了径向井参数(井径、井长及方位角)、地层参数(渗透率、地应力差、泊松比及杨氏模量)、施工参数(压裂液黏度、排量)对径向井辅助压裂裂缝扩展的影响,从而为现场水力压裂措施的设计及施工提供参考。

## 1 有限元径向井眼模型描述

通过 Abaqus 软件建模并划分网格,采用 Soil 模块对水力压裂过程中的流固耦合规律进行模拟,利用 XFEM 模块模拟裂缝扩展<sup>[15]</sup>,并使用四边形平面应变双线性位移缩减积分,引进沙漏来控制计算的收敛性,进行多线程计算<sup>[16]</sup>。

### 1.1 模型假设

为了分析各参数对单径向井辅助压裂裂缝扩展的影响<sup>[17]</sup>,对模型做出以下假设:建立圆形定压边界模型,让径向井始终处于水平最大主应力方

向;压裂过程中,仅产生一条水力裂缝,裂缝起裂点位于径向井根部,最初沿着径向井方位起裂;地层岩石各向同性,模型中不存在天然裂缝;应用最大拉应力准则,判定径向井对储层岩石应力的影响程度,当储层岩石最大主应力大于岩石抗张强度时,岩石破裂<sup>[18]</sup>。

### 1.2 模型参数

以采油井 X6 井为例,建立半径  $R=75\text{ m}$  的三维数值模型,研究岩石物性参数以及施工参数对裂缝扩展的影响规律。油井 X6 井的基本参数为:套管内径 180 mm,套管外径 190 mm,水泥环内径 190 mm,水泥环外径 240 mm,井眼直径 240 mm,地层直径 100 m,地层厚度 0.5 m,径向孔眼直径 50 mm,径向孔眼长度 50 m,套管弹性模量 230 GPa,水泥环弹性模量 60 GPa,地层弹性模量 24.7 GPa,泊松比 0.2,孔隙压力 26 MPa,垂向压力 65 MPa,水平最大主应力 51 MPa,水平最小主应力 51 MPa,水平应力比 1.2,岩石抗拉强度 4.5 MPa,渗透率  $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,孔隙度 7%,抗剪强度 70.95 MPa。

## 2 数值模拟结果

径向井水力压裂裂缝的扩展与径向井参数(孔径、孔长、方位角)、地层参数(水平地应力差、杨氏模量、泊松比、渗透率)、施工参数(压力液黏度、排量)等各种复杂因素有关。径向井周围应力分布随径向井自身参数及储层参数的变化而呈现显著改变,以数值模拟结果为例分析这些因素对于压裂过程及最终裂缝形状的影响,从而在现有基础上进一步认识径向井的水力压裂特性。分析模拟结果时,径向井压裂裂缝形态以裂缝有效长度及裂缝偏转角为评价标准,前者指裂缝从直井段起裂点到开始偏离径向井延伸点的距离;后者是指过裂缝上点作裂缝线的切线与最大水平地应力的夹角。

另外,为使对径向井的引导效果描述更加直观,定义“引导因子  $G$ ”来表征径向井对水力裂缝的引导效果,其含义为:在二维平面上,水力裂缝与径向井以及圆形边界所围成的面积与整个平面面积的比值。数值模拟结果图的面积划分如图 1 所示。图中,  $S_p$  为水力裂缝与径向井围成的面积,  $S$  为二维平面总面积。

从图 1 中可以看出,根据上述定义,引导因子  $G$  则等于  $S_p/S$ ,其取值范围介于 0~0.25,该值越小,说明径向井引导水力裂缝效果越强,反之,说明径

向井引导效果越弱。理论上,如果水力裂缝沿径向井轴线扩展,则  $G$  值为 0,引导因子最小,引导效果最佳;当引导裂缝与径向井夹角为  $90^\circ$  时,  $G$  取到极大值 0.25,此时认为径向井对水力裂缝没有引导效果。大量数值模拟结果显示,利用引导因子  $G$  来判断径向井对水力裂缝的引导能力具有较高的可信度。

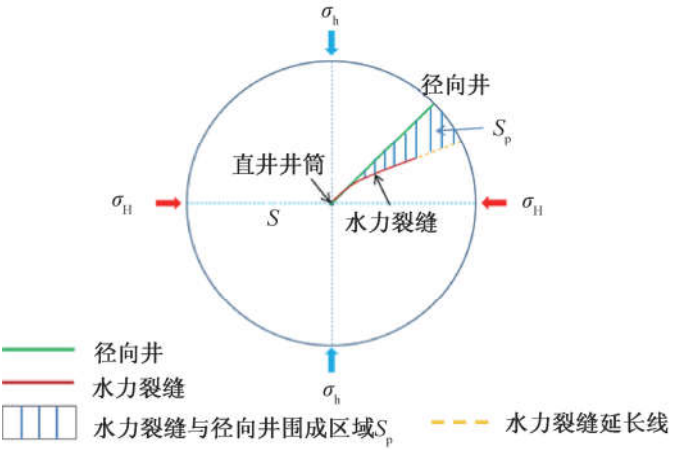


图 1 定义引导因子  $G$  示意图  
Fig.1 Schematic definition of steering factor  $G$

2.1 径向井方位角对裂缝扩展的影响规律

径向井方位角指的是径向井方向与水平最大主应力方向夹角<sup>[6]</sup>。依照 X6 井现场基本参数,建立数值模型,在直井段垂向方向组建井径  $\Phi=0.05$  m 的一口径向井,研究不同径向井方位角对水力裂缝的引导作用。数模结果如图 2 所示,其中图 2 中蓝色粗线所在圆直径代表径向井,黑色细实线表示水力裂缝,不同颜色代表储层各部位的孔隙压力(下同),通过观察细实线走向、云图变化及计算引导因子来判断径向井引导效果的变化。

根据图 2,利用引导因子  $G$  来判断模型中不同射孔方位角的径向井对水力裂缝的引导能力。分析结果显示,对于井长  $L=75$  m,井径  $\Phi=0.05$  m,水平地应力差值为 8 MPa 的模型,  $30^\circ\sim 60^\circ$  径向井方位角情况下,径向井对裂缝都产生了一定的引导效果。

从图 2 可以看到,径向井方位角为  $30^\circ$  时,水力裂缝基本沿着径向井方向扩展,裂缝有效长度长且偏转角稳定性好,求得其引导因子为 0.018 4,说明其引导强度大,引导效果好;当方位角变为  $45^\circ$  时,裂缝向前延伸一段距离后偏转角开始减小,趋于最大水平地应力方向,总体来看,裂缝有效长度及裂缝偏转角稳定性较之前均下降,且算得引导因子为 0.040 7,说明径向井的引导强度下降;最后当方位角增至  $60^\circ$  时,裂缝

沿径向井向前延伸一小段距离便明显转向最大主应力方向,裂缝有效长度较短,再加上其引导因子增加至 0.044 6,说明其引导效果变差。

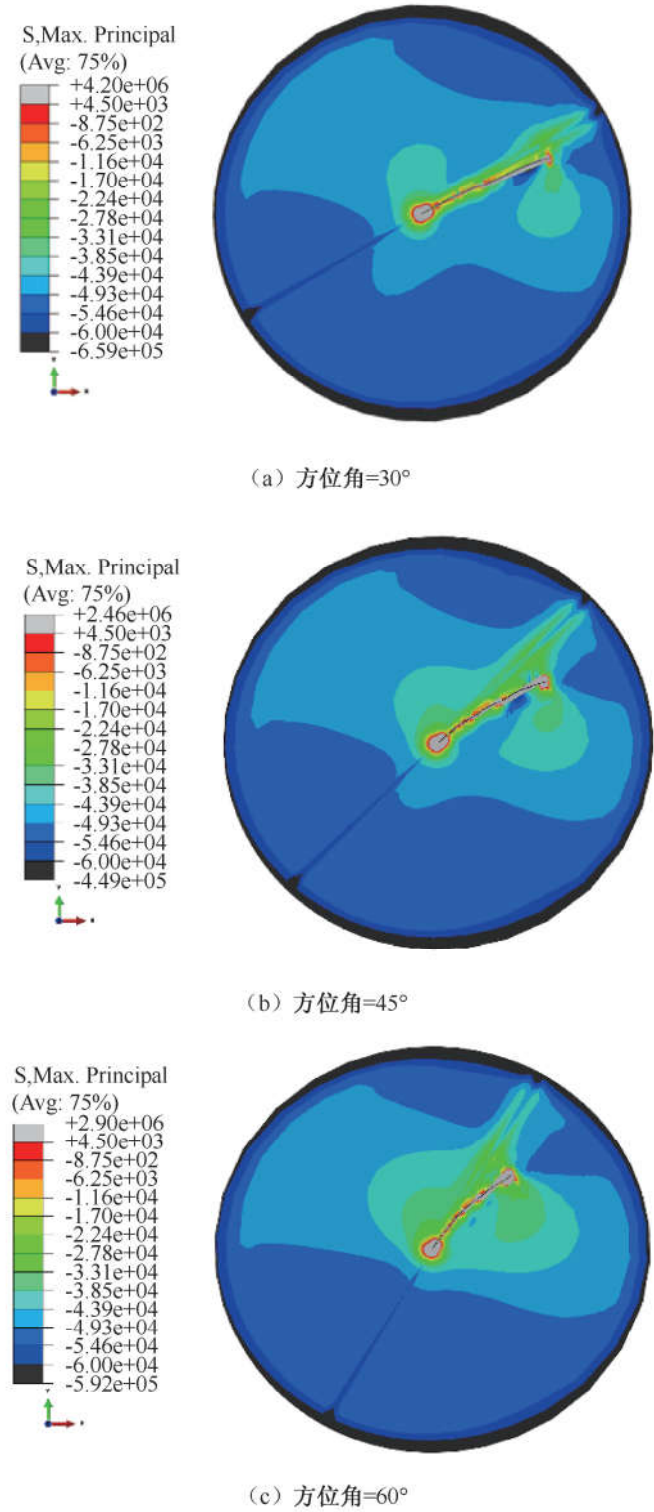


图 2 径向井方位角对单孔引导强度的影响  
Fig.2 Effect of radial well azimuth on single-hole steering intensity

由此可见,当径向井方位角逐渐增加时,引导因子逐渐变大,径向井对裂缝的引导控制能力减弱,裂缝越不易沿径向井方向扩展,即径向井对裂缝的引导效果变差。

2.2 径向井井径对裂缝扩展的影响规律

保持井长  $L=75$  m,径向井方位角为  $30^\circ$ ,水平

主应力差值为 8 MPa, 其它参数保持不变, 建立径向井直径为 0.075 m 的模型, 与之前井径为 0.05 m 的模型进行对比, 研究不同井径条件下径向井对水力裂缝的引导能力, 模拟结果如图 3。

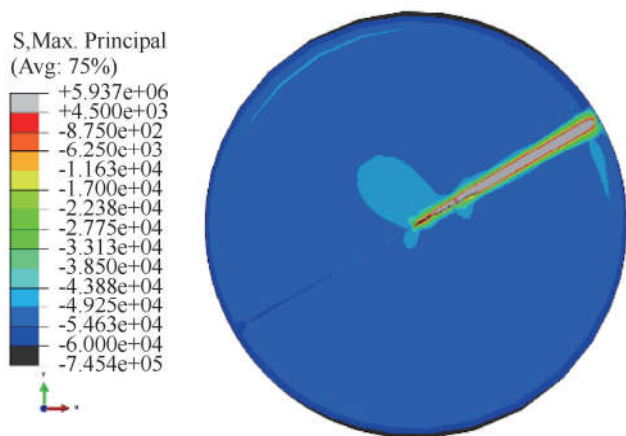


图3 径向井井径为 0.075 m 时径向井对裂缝的引导强度模拟图

Fig.3 Steering strength simulation of a radial well on fractures at the radius of 0.075 m

对比图 2(a) 和图 3 可以看到, 在其他参数不变的情况下, 当井径由 0.05 m 增加至 0.075 m 后, 其裂缝有效长度及偏转角稳定性与 0.05 m 相比明显增加, 其引导因子为 0.008 1, 引导强度比 0.05 m 井径大, 引导效果更好。

由此可见, 随着径向井井径的增加, 径向井改变储层应力分布的能力增强。径向井井径越大, 径向井附近储层高应力场范围就越大, 其所受的有效压应力及储层岩石强度越低, 则裂缝越易沿径向井起裂, 即径向井对裂缝的引导效果越好。

### 2.3 径向井长度对裂缝扩展的影响规律

令径向井井径  $\Phi = 0.05$  m, 水平主应力差值为 8 MPa, 径向井方位角取  $30^\circ$ , 其它参数保持不变, 模拟了径向井长度为 50 m 时径向井对裂缝的引导能力, 模拟结果如图 4。

对比图 2(a) 和图 4 可以看到, 当径向井井长由 50 m 增加到 75 m 后, 对水力裂缝的有效引导距离也明显增加。当径向井井长为 50 m 时, 水力裂缝在接近孔眼端部后, 由于缺少径向钻孔的有效引导, 开始沿水平最大地应力方向偏转, 引导因子为 0.039 2。而孔长增加到 75 m 后, 水力裂缝明显地沿着径向井延伸了更长的距离, 引导因子降低为 0.018 4。说明径向井的长度越长, 其改变储层应力的能力越强, 引导效果越好。

### 2.4 水平地应力差对裂缝扩展的影响规律

利用数值模拟分析径向井方位角、井径和井长

对裂缝扩展的影响规律时发现, 影响径向井引导裂缝扩展效果的主要因素之一为水平地应力差, 水平地应力差在一定的范围内, 径向井才可以产生足够的引导力, 确保裂缝引导成功。为此, 进行了单因素数值模拟实验, 研究了不同水平地应力差值对水力裂缝的引导效果。令井长  $L = 75$  m, 井径  $\Phi = 0.05$  m, 径向井方位角为  $30^\circ$ , 保持最大水平主应力值  $\sigma_H = 59$  MPa, 其它参数不变, 依次改变最小水平主应力  $\sigma_h$  为 51 MPa、47 MPa、43 MPa, 分析水平地应力差分别为 8 MPa、12 MPa 和 16 MPa 时对裂缝形态的影响规律, 模拟结果见图 5。根据图 5 分别计算不同水平地应力差情况的引导因子  $G$ 。

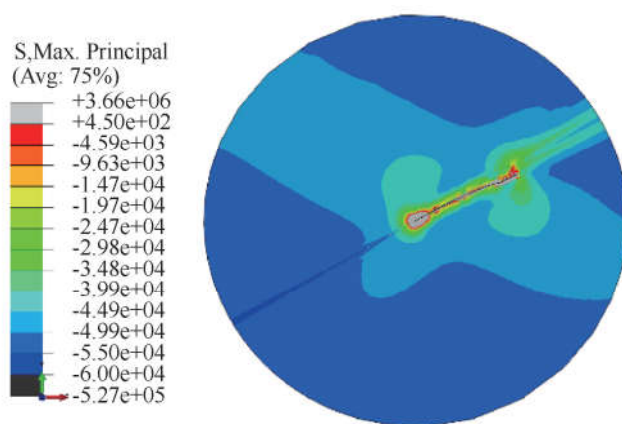


图4 径向井井长为 50 m 时径向井对裂缝的引导强度模拟图

Fig.4 Steering strength simulation of a radial well on fractures at the length of 50 m

对比图 2(a) 和图 5 的模拟结果可以看出, 在保持最大水平主应力值不变的情况下, 依次降低最小水平主应力值, 对应的水平地应力差依次增大。当水平地应力差为 8 MPa 时, 引导因子为 0.018 4, 径向井对水力裂缝的引导作用明显, 裂缝基本沿着径向井方向扩展, 有效长度大且偏转角稳定性好; 当应力差增至 12 MPa 时, 引导因子增加为 0.037 3, 径向井对裂缝的引导作用变差, 裂缝有效长度变短且扩展一段距离后偏转角减小; 而当应力差为 16 MPa 时, 引导因子变为 0.063 7, 径向井的引导作用变得更差, 裂缝只扩展了一小段便开始就偏离井眼轴线方向。由此可见, 随着水平地应力差的增大, 引导因子增大, 说明径向井对水力裂缝的引导强度减弱, 引导效果变差。

### 2.5 储层岩石杨氏模量对裂缝扩展的影响规律

地层岩石参数也会影响径向井对水力裂缝的引导效果。令径向井井径  $\Phi = 0.05$  m, 水平主应力差值为 8 MPa, 径向井方位角取  $30^\circ$ , 其它参数保持不变, 分析了岩石的杨氏模量参数分别为 24.7 GPa

和 50 GPa 时裂缝扩展的规律。

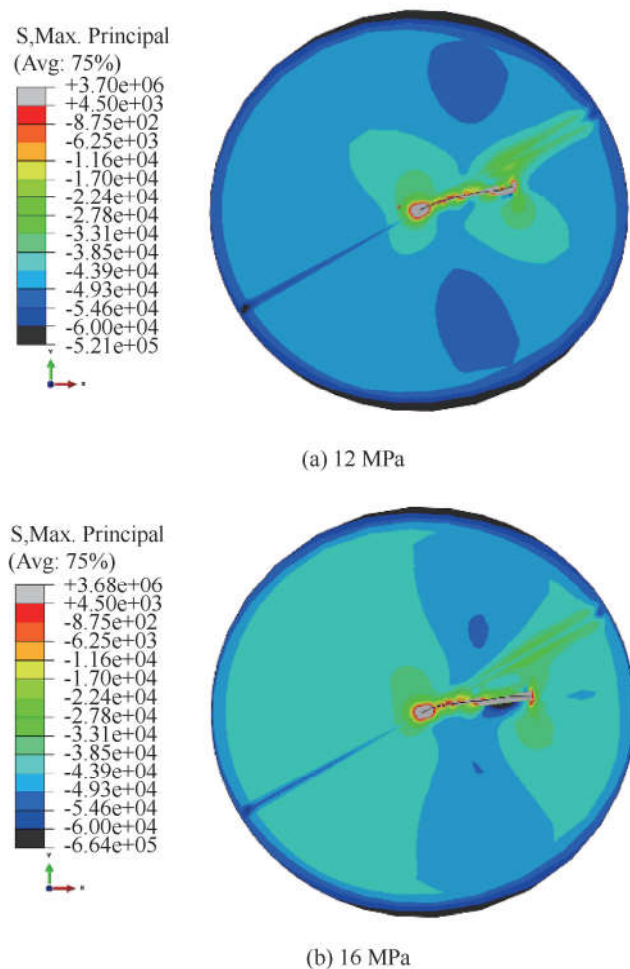


图 5 水平地应力差为 12 MPa 和 16 MPa 时对径向井对裂缝的引导强度模拟图

Fig.5 Steering strength simulation of a radial well on fractures at the horizontal stress differences of 12 MPa and 16 MPa

当杨氏模量为 24.7 GPa 时,水力裂缝引导强度最强。当杨氏模量为 50 GPa 时,水力裂缝沿着径向井方向扩展一段距离后偏向最大主应力方向,但其裂缝有效长度较之前有所减小,算得引导因子为 0.020 9,引导强度居中。可见,杨氏模量的增加会削弱径向井的引导作用,但削弱程度较小。

## 2.6 储层岩石泊松比对裂缝扩展的影响规律

径向井井径  $\Phi = 0.05$  m, 水平主应力差值为 8 MPa, 径向井方位角取  $30^\circ$ , 其它参数保持不变, 考察岩石的泊松比分别为 0.1 和 0.2 时裂缝扩展的规律。

当泊松比为 0.1 时, 径向井延伸一段距离后开始偏转, 计算引导因子为 0.032 7, 说明其引导强度弱, 引导效果差。当岩石泊松比增加至 0.2 后, 引导强度变强, 引导效果变好。可见, 泊松比的增加会增强径向井对水力裂缝的引导作用。

## 2.7 储层渗透率对裂缝扩展的影响规律

径向井井径  $\Phi = 0.05$  m, 水平主应力差值为 8 MPa, 径向井方位角取  $30^\circ$ , 其它参数保持不变, 考

察储层的渗透率为  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  和  $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时径向井对裂缝扩展的规律。

在渗透率为  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的数值模型中, 水力裂缝首先沿径向井向前延伸一段距离, 然后偏转角开始减小, 裂缝有效长度较短, 且算得引导因子为 0.018 4。而在渗透率为  $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的数值模型中, 水力裂缝基本沿着径向井方向扩展, 偏转角稳定性好, 裂缝有效长度大, 引导因子为 0.005 3, 相比前者, 径向井的引导效果明显增强。由此可见, 渗透率的增加会增强径向井的引导作用。

## 2.8 压裂液黏度对裂缝扩展的影响规律

除了储层岩石参数以外, 压裂施工参数比如压裂液黏度、压裂液排量也会对裂缝扩展形态产生影响。因此, 分析施工参数对裂缝形态的影响规律显得同样重要。令径向井井径  $\Phi = 0.05$  m, 水平主应力差值为 8 MPa, 径向井方位角取  $30^\circ$ , 其它参数保持不变, 考察压裂液黏度为 1 mPa·s 和 50 mPa·s 时裂缝扩展的规律。

当压裂液黏度为 50 mPa·s 时引导因子为 0.018 4。而在黏度降低至 1 mPa·s 时, 水力裂缝向前扩展一小段距离后便开始偏转, 其裂缝有效长度和偏转角稳定性明显下降, 且计算得引导因子为 0.029 5, 说明其引导强度变弱, 引导效果较前者变差。由此可见, 随压裂液黏度的增大, 径向井的引导强度增加, 引导效果变好。

## 2.9 压裂液排量对裂缝扩展的影响规律

令径向井井径  $\Phi = 0.05$  m, 水平主应力差值为 8 MPa, 径向井方位角取  $30^\circ$ , 其它参数保持不变, 考察压裂液排量为  $1 \text{ m}^3/\text{min}$  和  $2 \text{ m}^3/\text{min}$  时裂缝扩展的规律, 模拟结果如图 2(a) 和图 6 所示。

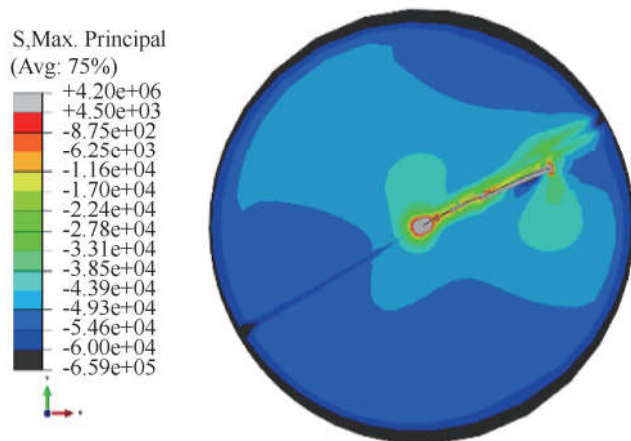


图 6 压裂液排量为  $1 \text{ m}^3/\text{min}$  时径向井对水力裂缝的引导强度

Fig.6 Steering strength of a radial well on hydraulic fractures at the displacement of  $1 \text{ m}^3/\text{min}$

从图 6 可以看出,当排量为 1 m<sup>3</sup>/min 时,水力裂缝沿径向井扩展一小段距离后开始偏转,且偏转角减小幅度较大,算得其引导因子为 0.0359,说明其引导强度弱,引导效果差。当压裂液排量增加到 2 m<sup>3</sup>/min 后(如图 2(a)),计算求得引导因子为 0.0184。由此可见,压裂液排量的增加会增强径向井的引导作用,排量越大引导水力裂缝效果越好。

3 引导因素的灰色关联分析

灰色关联分析方法是一种根据各研究因素之间变化趋势的相似或相异程度衡量因素间关联程度的数学方法<sup>[19-23]</sup>。

3.1 灰色关联分析法步骤

(1)确定引导因子为参考序列  $X_0(k)$ , 径向井方位角,井径,水平地应力差,渗透率等为比较序列  $X_i(k)$ 。

(2)模拟中各参数的数量级及量纲不同,对其进行标准化处理:

①计算每一个比较序列的期望  $\bar{X}_i(k)$  与标准差  $S_i(k)$ 。

②进行标准化处理,即

$$X_i(k) = \frac{X_i(k) - \bar{X}_i(k)}{S_i(k)} \tag{1}$$

③将逆向指标前的正负号对调。

(3)求灰色关联系数  $\zeta_i$ 。灰色关联系数是指第  $i$  个比较序列与  $k$  时刻的参考序列之间的关联程度。

$$\zeta_i = \frac{\min_t |X_0(t) - X_i(t)| + \rho \max_t |X_0(t) - X_s(t)|}{|X_0(t) - X_s(t)| + \rho \max_t |X_0(t) - X_s(t)|} \tag{2}$$

式中: $\rho$  为分辨系数(一般取 0.5)。

(4)计算关联度。因为各时刻比较序列的关联系数较多,需要求关联系数的平均值,即

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_i(k) \tag{3}$$

(5)排序。根据关联度的大小对各比较序列进行排序。比较序列关联度的大小直接反映着对参考序列的影响。其值越大,对参考序列的影响也越大<sup>[24-27]</sup>。

3.2 径向井引导能力灰色关联分析

采用灰色关联分析方法对影响径向井水力裂缝引导强度的因素进行无量纲均值化处理,计算各

因素与“引导因子”的关联系数,并对影响效果进行综合分析,评价结果见表 1。

表 1 不同参数对应的灰色关联系数  
Table 1 Gray correlation coefficients for different parameters

序号	参数	关联系数
1	径向井方位角	0.753 6
2	径向井井径	0.751 9
3	径向井井长	0.735 6
4	水平地应力差	0.776 0
5	岩石杨氏模量	0.702 5
6	岩石泊松比	0.747 8
7	储层渗透率	0.736 9
8	压裂液黏度	0.721 2
9	压裂液排量	0.743 6

由表 1 可知,水平地应力差与引导因子的关联度最高,其关联系数为 0.776 0,说明水平地应力差的改变对引导效果影响最明显。其次是径向井方位角,关联系数为 0.753 6,反映出径向井方位角也是影响引导效果的一个非常重要的因素。再其次为径向井井径,也是影响引导效果的重要因素,其关联系数为 0.751 9。对引导效果影响最小的因素为岩石杨氏模量,其关联系数为 0.702 5。说明岩石杨氏模量的改变比对径向井引导水力裂缝的能力影响程度最小。各因素对径向井引导水力裂缝的影响能力由大至小的顺序为:水平地应力差值、径向井方位角、径向井井径、岩石泊松比、压裂液排量、储层渗透率、径向井井长、压裂液黏度、岩石杨氏模量。

4 结论

(1)随井径、井长、岩石泊松比等参数增大,径向井对裂缝引导效果增强;随径向井方位角、水平地应力差值等参数增大,径向井对裂缝引导效果减弱。

(2)各因素对径向井引导水力裂缝的影响能力由大至小的顺序为:水平地应力差值、径向井方位角、径向井井径、岩石泊松比、压裂液排量、储层渗透率、径向井井长、压裂液黏度、岩石杨氏模量。

(3)该分析对径向井辅助压裂技术应用于在低渗油藏时的选井选层、工艺设计和施工参数优化具有重要的指导意义。

致谢:感谢大庆油田技术专家黄小云、郭权两位高级工程师多次细心审阅,提出修改意见。

参 考 文 献

[1] 张锋. 低渗透油藏压裂注水机理及工艺参数优化 [D].

- 青岛:中国石油大学(华东),2009.
- ZHANG Feng. The mechanism and parameters-optimization of injection fracture pressure propagation for low permeability oil field [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009.
- [2] 王冰.低渗透油藏径向井压裂工艺参数优化[D].青岛:中国石油大学(华东),2014.
- WANG Bing. The radial well fracturing parameters optimization in lowerpermeability reservoir [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009.
- [3] 袁淋,李晓平,刘建军.低渗透气藏气水同产压裂水平井产能计算方法[J].岩性油气藏,2016,28(4):88-94.
- YUAN Lin, LI Xiaoping, LIU Jianjun. Productivity calculation method of fractured horizontal wells with gas-water two-phase in low permeability gas reservoirs [J]. Lithologic Reservoirs, 2016,28(4):88-94.
- [4] 付宣,李根生,黄中伟,等.煤层气径向水平井压裂室内试验与产能数值分析[J].石油钻探技术,2016,44(2):99-105.
- FU Xuan, LI Gensheng, HUANG Zhongwei *et al.* Laboratory testing and productivity numerical simulation for fracturing CBM radial horizontal wells [J]. Petroleum Drilling Technologies, 2016, 44(2): 99-105.
- [5] 杨阳,曲占庆,曹砚锋,等.径向井远端压裂电模拟实验研究[J].断块油气田,2014,21(3):386-389.
- YANG Yang, QU Zhanqing, CAO Yanfeng *et al.* Experiment research on electrical simulation of distal fracturing for radial well [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2014,21(3):386-389.
- [6] 龚迪光,曲占庆,郭天魁,等.径向井水力压裂摩阻影响因素与计算公式[J].钻井液与完井液,2016,33(3):102-106.
- GONG Diguang, QU Zhanqing, GUO Tiankui *et al.* Factors affecting friction loss of hydraulic fracturing in ultra-short radius radial wells and the calculating equation thereof [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016,33(3):102-106.
- [7] 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 Zhanqing, LI Xiaolong, LI Jianxiong *et al.* Crack morphology of multiple radial well fracturing based on extended finite element method [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018,42(1):73-81.
- [8] 刘晓强,张习斌,许鹏,等.基于 ABAQUS 的径向井井壁稳定性分析[J].断块油气田,2016,23(4):523-527.
- LIU Xiaoqiang, ZHANG Xibin, XU Peng *et al.* Stability analysis of ultra-short radius radial wells using ABAQUS finite element method [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016,23(4):523-527.
- [9] 李建雄,刘茂林,郭天魁,等.径向井引导水力裂缝扩展机理[J].断块油气田,2016,23(6):803-806.
- LI Jianxiong, LIU Maolin, GUO Tiankui *et al.* Hydraulic crack propagation mechanism of radial well guidance [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016,23(6):803-806.
- [10] 李小龙,李建雄,周丽萍,等.径向井压裂定向起裂机理研究[J].西安石油大学学报(自然科学版),2017,32(2):46-52.
- LI Xiaolong LI Jianxiong ZHOU Liping *et al.* Research on directional initiation of crack in radial perforation fracturing [J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2017, 32(2):46-52.
- [11] 李小龙,许华儒,刘晓强,等.径向井压裂裂缝形态及热采产能研究[J].岩性油气藏,2017,29(6):154-160.
- LI Xiaolong, XU Huaru, LIU Xiaoqiang *et al.* Fracture morphology and production performance of radial well fracturing [J]. Lithologic Reservoirs, 2017,29(6):154-160.
- [12] 王辅圣.渗水条件下膨胀土隧道围岩湿度场演化规律数值模拟研究[J].铁道勘察,2018,44(1):49-55.
- WANG Fusheng. Numerical analysis of moisture field evolution in expansive soil around tunnel under infiltration condition [J]. Railway Investigation and Surveying, 2018, 44(1), 49-55.
- [13] 李小龙,肖雯,李建雄,等.径向孔眼辅助压裂裂缝形态[J].大庆石油地质与开发,2017,36(2):78-84.
- LI Xiaolong, XIAO Wen, LI Jianxiong *et al.* Fractured morphology assisted by the radial borehole [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017,36(2):78-84.
- [14] 龚迪光,曲占庆,李建雄,等.基于 ABAQUS 平台的水力裂缝扩展有限元模拟研究[J].岩土力学,2016,37(5):1512-1520.
- GONG Diguang, QU Zhanqing, LI Jianxiong *et al.* Extended finite element simulation of hydraulic fracture based on ABAQUS platform [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016,37(5):1512-1520.
- [15] 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 Yu, QU Zhanqing, GUO Tiankui *et al.* Theoretical research on radial wells orientating hydraulically created fracture directional extended [J]. Science Technology and Engineering, 2017,17(20):154-159.
- [16] 李小龙,李建雄,肖雯,等.径向孔眼对井壁稳定性影响的数值模拟[J].断块油气田,2016,23(6):829-834.
- LI Xiaolong, LI Jianxiong, XIAO Wen *et al.* Theoretical research on radial wells orientating hydraulically created fracture directional extended [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(6): 829-834.
- [17] GUO L, XIANG J, LATHAM J P *et al.* Numerical simulation of hydraulic fracturing using a three-dimensional fracture model coupled with an adaptive mesh fluid model [C]. Paper ARMA-2015-397 presented at 49th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 28 June - 1

- July, 2015, San Francisco, California.
- [18] 张汝生, 王强, 张祖国, 等. 水力压裂裂缝三维扩展 ABAQUS 数值模拟研究[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(6): 69-72.
- ZHANG Rusheng, WANG Qiang, ZHANG Zuguo *et al.* Research of ABAQUS numerical simulation of 3D fracture propagation in hydraulic fracturing process [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(6): 69-72.
- [19] 刘虹瑜, 杨向同, 袁学芳, 等. 塔中志留系储层重复改造选井和产能预测方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 55-61.
- LIU Jiangyu, YANG Xiangtong, YUAN Xuefang *et al.* Method of re-stimulation candidate selection and productivity prediction for Silurian reservoirs in Tazhong area [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 55-61.
- [20] 姬伟, 张育超, 史小亮, 等. 低渗透油藏体积压裂井产能主控参数灰色关联分析[J]. 油气井测试, 2015, 24(1): 34-37.
- JI Wei, ZHANG Yuchao, SHI Xiaoliang *et al.* Gray correlation analysis of main control parameters for productivity to volume fractured well in low permeability oil reservoir [J]. Well Testing, 2015, 24(1): 34-37.
- [21] 孙少伟. 基于变权与灰色关联决策的铁路线路方案评价模型研究 [J]. 铁道勘察, 2018, 44(2): 102-106, 118.
- SUN Shaowei. Evaluation model for railway route scheme based on variable weight and gray incidence decision [J]. Railway Investigation and Surveying, 2018, 44(2): 102-106, 118.
- [22] 刘世界, 赵俊, 段宝江, 等. 基于灰相关法的井间连通性评价研究[J]. 油气井测试, 2017, 26(3): 36-38.
- LIU Shijie, ZHAO Jun, DUAN Baojiang *et al.* Research and interpretation of inter-Well connectivity dynamic using grey correlation degree [J]. Well Testing, 2017, 26(3): 36-38.
- [23] OYEWOLE A. Extension of the gray correlation to inclination angles [C]. Paper SPE-178727-STU presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 28-30 September, 2015, Houston, Texas, USA.
- [24] FENG Y, JI B, GAO P *et al.* An improved grey relation analysis method and its application in dynamic description for a polymer flooding pilot of Xingshugang field, Daqing [C]. Paper SPE-128510-MS presented at the North Africa Technical Conference and Exhibition, 14-17 February, 2010, Cairo, Egypt.
- [25] ZHOU C, CAI Y, WEN Y. Wind-speed prediction based on grey fuzzy mean generating function model [C]. Paper ISOPE-I-16-079 presented at the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference, 26 June-2 July, 2016, Rhodes, Greece.
- [26] 刘二虎. 应用灰色关联法分析延长气田子长东区山2层产能影响因素[J]. 油气井测试, 2014, 23(2): 18-20.
- LIU Erhu. Application of gray correlation method to analyze capacity factor of the Zichang Eastern Mountain2 Gas Sub-Layer in Yanchang gas field [J]. Well Testing, 2014, 23(2): 18-20.
- [27] 毛东风, 段梦兰, 李新仲, 等. 基于灰色关联的深水浮式油气开发平台选择[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 743-746.
- MAO Dongfeng, DUAN Menglan, LI Xinzong *et al.* Selection of deepwater floating oil platform based on grey correlation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 743-746.

编辑 刘述忍

**第一作者简介:** 褚春波, 男, 1987年1月出生, 助理工程师, 2012年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业, 从事试油测试及试井评价工作。电话: 0459-5691945, 18246932960; Email: chuchunbo@petrochina.com.cn。地址: 黑龙江省大庆市让胡路区试油试采分公司地质大队, 邮政编码: 163412。