

基于扩展有限元的水平井改进拉链式压裂数值模拟

冯其红¹, 李东杰¹, 时 贤¹, 王 森¹, 徐世乾¹, 秦 勇², 安 杰³

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 中国石油长庆油田公司油气工艺研究院, 陕西西安 710018)

摘要: 为了研究水平井改进拉链式压裂的裂缝扩展规律, 根据水力压裂流-固耦合理论, 采用扩展有限元方法分析改进拉链式压裂过程中簇间距、地应力等因素对各条裂缝扩展形态和缝间诱导应力场的影响。结果表明: 裂缝间距越大, 簇间应力干扰作用越小, 但对每条裂缝的影响程度不同; 较大的裂缝间距能够保证压裂后形成的各条裂缝具有相似的形态, 且压裂缝的长度更长并能从射孔处向两侧均匀延伸, 从而实现储层的均衡开发; 地应力差越大, 各条裂缝的扩展越均匀, 减少了裂缝发生偏转的可能, 并能在一定程度上降低邻井裂缝发生沟通的风险。

关键词: 水平井; 改进拉链式压裂; 数值模拟; 扩展有限元; 缝间干扰

中图分类号: TE 357.1 **文献标志码:** A

引用格式: 冯其红, 李东杰, 时贤, 等. 基于扩展有限元的水平井改进拉链式压裂数值模拟 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 105-112.

FENG Qihong, LI Dongjie, SHI Xian, et al. Numerical simulation of modified zipper-type hydraulic fracture propagation in horizontal wells based on extended finite element method [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(2): 105-112.

Numerical simulation of modified zipper-type hydraulic fracture propagation in horizontal wells based on extended finite element method

FENG Qihong¹, LI Dongjie¹, SHI Xian¹, WANG Sen¹, XU Shiqian¹, QIN Yong², AN Jie³

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

3. Oil & Gas Technology Research Institute, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, China)

Abstract: In order to study the crack propagation of modified zipper-type fractures in horizontal wells, based on the fluid-solid interaction theory, an extended finite element method was utilized to study the influences of fracture cluster spacing, crustal stress, and other factors on the pattern of fracture propagation and the induced rock stress in the process of modified zipper-type fracturing. The results show that large crack spacing can decrease the stress interferences between fracture clusters, while its influence to each crack is different. Large cluster spacing can cause the zipper-type fracturing cracks which have more similar morphology and long length. It also can make the cracks evenly extending from the perforation to both sides in the rock matrix, thus leading to stable development of the reservoirs. Large crustal stress can make the crack propagation more uniformly and reduce the risks of crack deflection. To some extent, it can decrease the risk of crack mergence between two horizontal wells.

Keywords: horizontal well; modified zipper-type hydraulic fracture; numerical simulation; extended finite element; fracture interference

收稿日期: 2018-04-24

基金项目: 国家自然科学基金石油化工联合基金(A类)重点支持项目(U1762213); 国家“973”重点基础研究发展计划(2015CB250905); 国家重大科技专项(2017ZX05071007); 国家自然科学基金项目(51704312, 51704324); 中国博士后创新人才支持计划(BX201600153); 山东省自然科学基金项目(ZR2017BEE009, ZR2016EL07)

作者简介: 冯其红(1969-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为油藏工程。E-mail: fengqihong@126.com。

水平井分段压裂是目前商业化开发非常规油气资源的主流技术。常见的水平井分段压裂改造方式主要包括同步压裂、交替压裂和拉链式压裂等。其中同步压裂改造体积有限且井间窜流风险大,交替压裂容易在近井地带引起应力转向并形成纵向裂缝,从而导致油气井砂堵,而常规拉链式压裂则不易控制井间诱导应力场,因此改进拉链式压裂受到了越来越多的重视^[1-3]。改进拉链式压裂能够在井间形成较为充分的裂缝网络,从而达到提高压裂效率和采收率的双重目的^[4]。数值模拟是掌握裂缝扩展规律的重要手段。扩展有限元方法可以有效解决常规有限元方法的网格重构及裂缝转向等问题,是目前水力裂缝数值模拟方法中的研究热点^[5]。前期学者已经采用扩展有限元法对不同射孔角度下近井筒裂缝扩展、水平井同步压裂、顺序压裂、交替压裂等问题进行了系列研究,并取得了良好效果^[6-8],但尚未见到有关水平井改进拉链式压裂模拟的相关报道。为了深入分析水平井改进拉链式压裂模式下的多裂缝起裂及扩展规律和复杂应力场对其干扰规律,采用 ABAQUS 软件,基于扩展有限元方法和虚拟节点法模拟改进拉链式压裂的裂缝扩展过程,分析簇间距和应力差等关键参数对裂缝延伸规律的影响,为改进拉链式压裂的缝间距优化设计提供指导。

1 扩展有限元水力压裂模拟基础理论

1.1 水力压裂流固耦合模拟

饱和多孔介质在水力压裂时,作用在裂缝壁面上的流体会使多孔介质中的固相变形,而压裂液注入引起的岩石孔隙压力改变将导致裂缝形态和渗透率的变化,因此裂缝扩展是黏性流体流动与岩体变形的动态耦合过程^[9-11]。ABAQUS 可以有效模拟水力压裂裂缝扩展的渗流-应力耦合问题,其岩石应力平衡方程为

$$\int_V (\sigma'_{ij} - p_p \mathbf{I}) : \delta \varepsilon dV = \int_S t \delta \varepsilon dS + \int_V f \delta \varepsilon dV. \quad (1)$$

式中, σ'_{ij} 为有效应力,MPa; p_p 为孔隙压力,MPa; $\mathbf{I}$ 为二阶单位矩阵; $\delta \varepsilon$ 为虚应变率,m; dV 和 dS 分别为载荷作用面积和计算微元的体积; t 和 f 分别为单位面积的表面外力和岩体骨架的体积力,N。

通过对每个节点施加孔隙压力模拟压裂液的流动,多孔介质内连续性流动方程的弱形式为

$$\frac{d}{dt} \left(\int_V \rho_w \varphi_w dV \right) + \int_S \rho_w \varphi_w n q_w dS = 0. \quad (2)$$

式中, ρ_w 为流体的密度, kg/m^3 ; φ_w 为基质孔隙度; q_w 为流体在基质中的平均流速, m^3/s ; n 为表面 S 的外法向方向。

式(2)中流动方程满足达西方程,

$$q_w = -\frac{1}{n_w g \rho_w} k' (\nabla p_w - \rho_w g). \quad (3)$$

其中

$$k' = \frac{k \rho g}{\mu}.$$

式中, k' 为渗透系数, m/s ; k 为渗透率, m^2 ; μ 为流体的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; n_w 为流体体积与总体积的比率; ∇p_w 为压裂液流动方向的压力梯度; g 为自由落体加速度, m/s^2 。

1.2 扩展有限元方法

扩展有限元法是在不改变计算网格结构的前提下,引入两个局部加强函数(阶跃增强函数 $H(x)$ 和渐近裂纹尖端函数 $F_\alpha(x)$) 反映裂缝面的不连续性。其中 $H(x)$ 用来表征间断位移场,

$$H(x) = \text{sgn}(\varphi(x)) = \begin{cases} 1, & \varphi(x) > 0; \\ -1, & \varphi(x) < 0. \end{cases} \quad (4)$$

$F_\alpha(x)$ 用来表征奇异位移场,描述裂尖应力的奇异性^[12],在极坐标下的表达式为

$$F_\alpha(x) = \left[\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \right], \alpha = 1, 2, 3, 4. \quad (5)$$

基于扩展有限元的位移插值形式为

$$\mathbf{u} = \sum_{I=1}^N N_I(x) [\mathbf{u}_I + H(x) \mathbf{a}_I + \sum_{\alpha=1}^4 F_\alpha(x) \mathbf{b}_I^\alpha]. \quad (6)$$

式中, N 为所有普通节点的集合; $\mathbf{u}_I$ 为常规的节点自由度,即节点的位移; $N_I(x)$ 为对应节点的标准有限元形函数; $\mathbf{a}_I$ 和 $\mathbf{b}_I^\alpha$ 为节点位移扩充自由度,分别代表 $H(x)$ 阶跃增强函数和 $F_\alpha(x)$ 函数对贯穿单元和裂尖单元位移场的扩充。

压力场的插值和位移场的插值具有同样形式,表达式为

$$p = \sum_{I=1}^N N_I(x) [p_I + \varphi(x) p_I + \sum_{\alpha=1}^4 P_\alpha(x) p_I^\alpha]. \quad (7)$$

式中, p_I 和 p_I^α 为节点压力扩充自由度; $\varphi(x)$ 和 $P_\alpha(x)$ 为压力节点的增强函数。

1.3 扩展有限元方法模拟裂缝扩展及延伸准则

在应用 ABAQUS 软件中的扩展有限元技术进行水力裂缝扩展模拟时,水力裂缝的起裂和扩展采用基于黏聚单元损伤力学的拉伸-分离准则^[13-14]。岩石

未损伤之前的本构关系为线弹性,单元开始损伤后刚度逐渐退化直至完全失效。在数值模拟中,采用最大主应力准则作为水力裂缝的起裂准则,即

$$f = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\max c}} \quad (8)$$

式中, $\sigma_{\max c}$ 为岩石承受的最大临界应力, MPa; $\sigma_{\max}$ 为岩石所承受的最大主应力, MPa。

为考虑法向扩展和切向扩展的结合,将裂缝扩展考虑为 Benzeggagh-Kenane (BK) 混合扩展模式,即

$$G = G_n + (G_s - G_n) \left(\frac{G_s}{G_T} \right)^\eta \quad (9)$$

式中, G_n 为法向断裂能量释放率, N/mm; G_s 为剪切能量释放率, N/mm; G_T 为总能量释放率, N/mm; η 为混合常数。

1.4 水平井拉链式压裂叠加应力场

水平井压裂过程中,水平井井筒的形成会影响原有的地应力场,之后压裂液的注入将导致井筒周围孔隙压力升高,并与地层孔隙压力之间产生差异而引起附加应力。当压裂出人工裂缝时,水力裂缝周围会产生一定的诱导应力作用,同时先压裂缝对后压裂缝也会造成应力扰动。对于链式压裂,每条裂缝会同时受到同井和邻井相邻水力裂缝的综合作用。除此之外,考虑开采储层所处井深的温度差异,注入的钻井液和压裂液对井壁和裂缝产生的热效应也会带来附加的应力作用。将岩石看作是无穷小变形多孔弹性体,按照应力叠加原理,水平井压裂扰动应力场就是初始地应力、井筒内压、压裂液渗滤、裂缝诱导应力以及热效应引起的附加应力的总和,即

$$\sigma_{\text{sum}} = \sigma_{\text{ini}} + \sigma_w + \sigma_l + \sigma_t + \sigma_T \quad (10)$$

式中, σ_{sum} 为压裂扰动总应力; σ_{ini} 为初始地应力; σ_w 为钻井后井筒周围应力; σ_l 为压裂液渗滤应力; σ_t 为裂缝诱导应力; σ_T 为热应力。

2 数值模拟的基本假设和条件

在进行水平井改进拉链式压裂扩展模拟时,两口水平井共设置了 8 条裂缝,每口水平井分别设置了 4 条裂缝,各缝之间的间距相等,其中水平井井筒方向为最小水平主应力方向,以保证形成的水力裂缝为横向裂缝。数值模拟模型尺寸为 90 m × 60 m,相关的地质力学参数和压裂施工参数:岩石弹性模量为 15 GPa,泊松比为 0.25,渗透系数为 1×10^{-7} m/s,初始孔隙比为 0.1,滤失系数为 1×10^{-14} m/(Pa ·

s),储层初始孔隙压力为 20 MPa,岩石抗拉强度为 6 MPa,压裂液排量及黏度为 0.12 m³/min 和 10 mPa · s,井间距为 19 m,射孔长度为 0.5 m,每条裂缝压裂时长为 60 s,所建立的几何模型如图 1 所示。

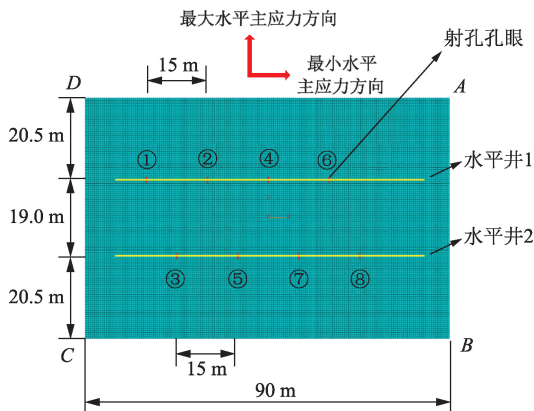


图 1 改进拉链式压裂几何模型

Fig. 1 Geometric model of modified zipper fracture

在 ABAQUS 中进行水力压裂扩展数值模拟时,基本分析步主要包括:平衡模型地应力、泵入压裂液使裂缝起裂和扩展、停止注入压裂液泄压至水力裂缝停止扩展。因此在改进拉链式压裂中,共采用了 16 个分析步模拟每段裂缝起裂扩展的全过程,其中第 1 个分析步是利用 Geostatic 模块施加地应力,其余 15 个分析步则是按照水平井改进拉链式压裂的施工模式进行压裂,每段压裂包含注入和泄压两个分析步(其中注入时间设置为 60 s,泄压时间设置为 3600 s)。在模型 x 和 y 方向的边界上分别施加位移约束,整个地层初始孔隙压力设置为 20 MPa,边界 AB 、 BC 、 AD 和 CD 的孔隙压力也设置为 20 MPa,并在压裂过程中保持不变。分别采用 CPE4P 单元和 T2D2 单元模拟岩石基质和水力裂缝,并在水力裂缝周围采用局部网格加密技术进行处理。

3 结果讨论

3.1 不同时刻下的裂缝形态变化

图 2 为对水平井进行改进拉链式压裂过程中不同施工时间下的裂缝几何形态分布。可以发现,由于缝间诱导应力场的影响,压裂裂缝出现了一定的转向,但转向幅度并不大,其中第 5 条裂缝偏转角度最大,约为 9°,第 7 条裂缝偏转角度约为 6°,其余裂缝偏转较小,可以较好地保证每个压裂段形成的裂缝沿最大水平主应力方向扩展。但在压裂过程中,裂缝的几何形态受缝间诱导应力场的影响发生了明显的改变。

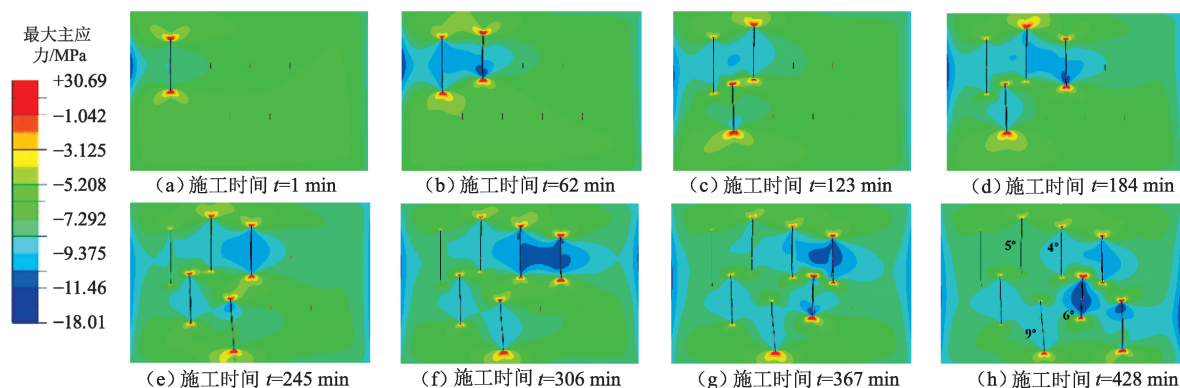


图 2 改进拉链式压裂裂缝的几何形态分布

Fig.2 Fracture distributions in modified zipper fracturing

图 3 和图 4 分别为改进拉链式压裂各条裂缝宽度和缝口压力随时间的变化曲线。结合图 3 的缝宽

变化可以发现,诱导应力场对缝宽的影响较小,但对缝长的影响十分明显。在第 2 口水平井中,第 3 条和第 7 条裂缝更倾向于均匀扩展,即水平井两侧裂缝半长近似相等,但第 5 条和第 8 条裂缝则明显倾向于向外侧扩展,即水平井外侧缝长要远大于内侧缝长。因此,在改进拉链式压裂的设计过程中,要充分考虑缝间距和段间距的优化问题,以保证压裂改造区内裂缝复杂度和扩展范围的统一。由图 4 可以发现,由于压裂过程中各条裂缝间的应力干扰导致缝口压力随压裂的进行逐渐升高。

3.2 不同射孔间距下的裂缝形态变化

射孔间距是影响诱导应力场的关键参数。一般情况下,射孔间距越小,裂缝间的干扰作用越严重,裂缝越容易发生偏转,裂缝形态也更加的复杂^[15-16]。通过数值模拟得到了 3 种射孔间距下的裂缝几何形态,如图 5 所示。由图 5 可以看出,当裂缝间距为 15 m 时,裂缝间的应力干扰作用非常强烈,使中间第 5 条和第 7 条裂缝在扩展过程中发生了明显的偏转。而随着射孔间距逐渐增大,裂缝间的应力干扰作用逐渐减弱。当射孔簇间距增大到 25 m 时,中间裂缝的缝长和缝宽与两侧裂缝基本一致。因此射孔间距是影响裂缝簇间应力干扰度的重要因素,当射孔簇间距较小时,裂缝间应力干扰作用较强,此时中间裂缝的扩展将会受到强烈的抑制作用。随着射孔簇间距的增大,裂缝簇间的应力干扰作用逐渐减小,压裂后所形成的各条裂缝形态接近,且可以保证裂缝从射孔处向两侧均匀延伸。同时结合缝底压力变化图 6 可以看出,内侧裂缝和外侧裂缝受缝间距的影响不同(第 1 条和第 3 条裂缝代表外侧裂缝,第 4 条和第 5 条裂缝代表内侧裂缝)。随缝间距的增大,第 1 条与第 3 条裂缝内的压力逐渐增大,而第 5 条裂缝则在缝间距为 20 m 时井底压力

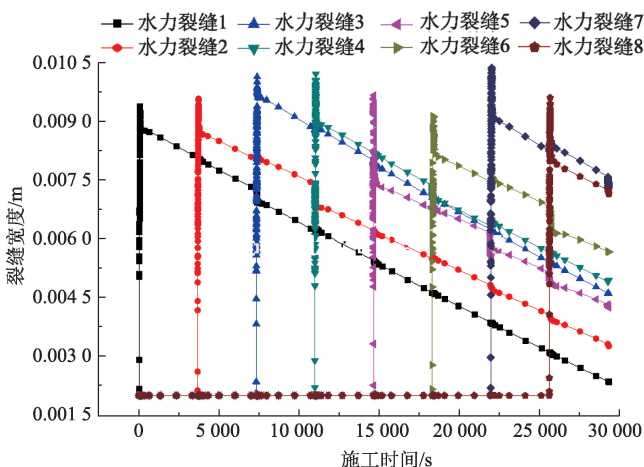


图 3 改进拉链式压裂各条裂缝宽度随时间的变化

Fig.3 Change of fracture aperture with time in modified zipper fracturing

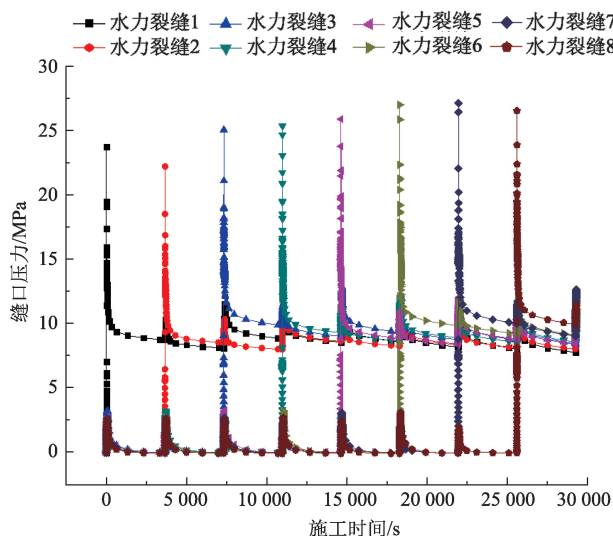


图 4 改进拉链式压裂各条裂缝缝口压力随时间的变化

Fig.4 Change of fracture pressure with time in modified zipper fracturing

最高。与常规单水平井同步压裂和顺序压裂相比，改进拉链式压裂的应力干扰规律更为复杂。

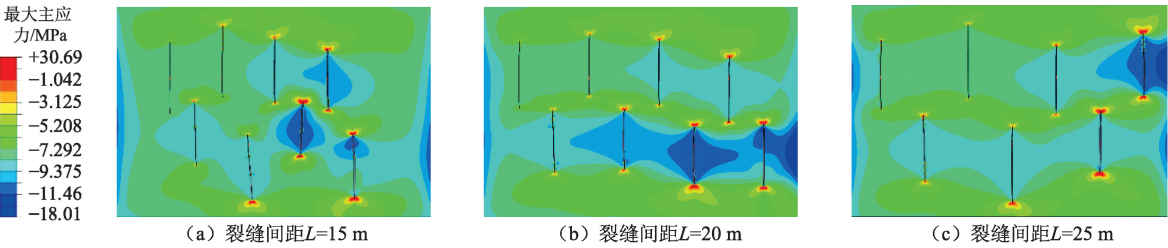


图 5 不同间距下的水平井改进拉链式压裂裂缝几何形态分布

Fig. 5 Fracture distributions under different spacing in modified zipper fracturing

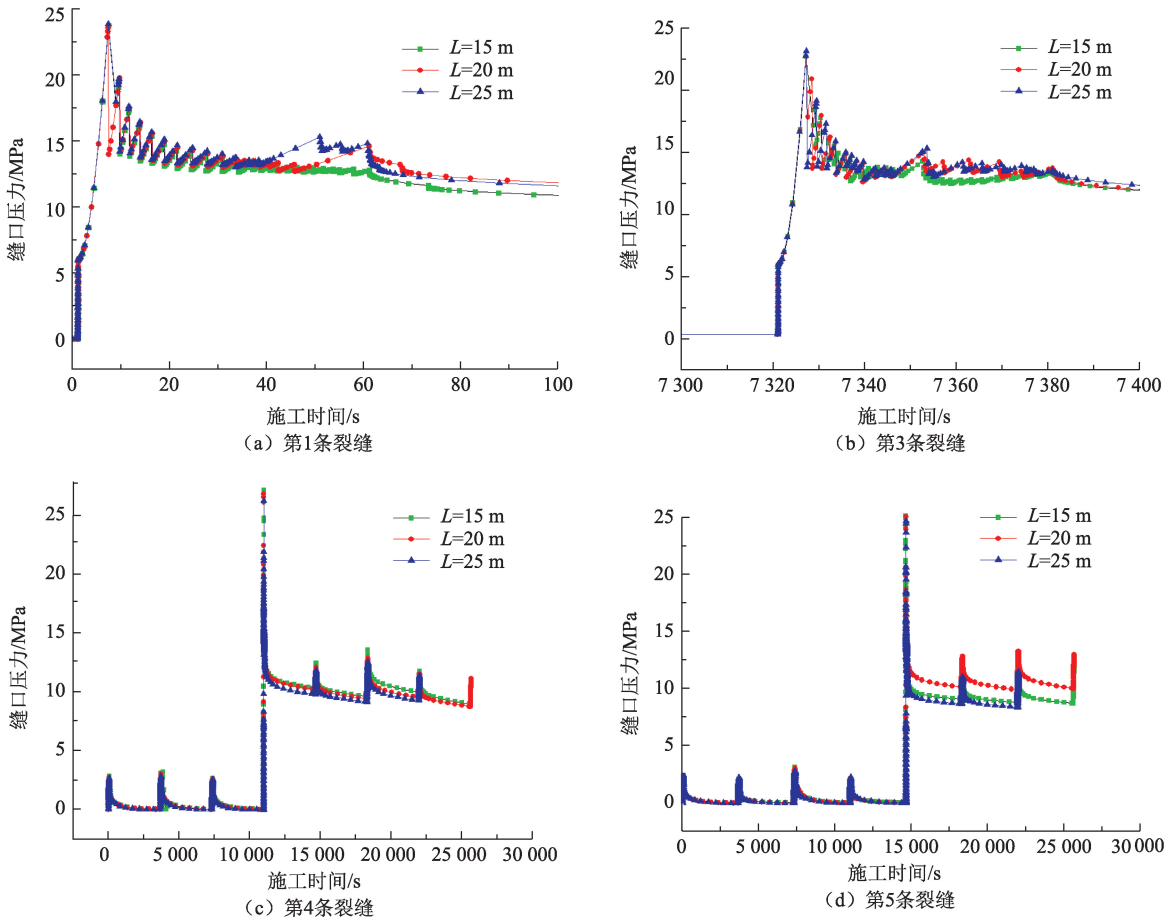


图 6 裂缝缝口压力在不同间距条件下随时间的变化

Fig. 6 Changes of fracture pressures with time under different spacing

3.3 不同地应力条件下的裂缝形态变化

为了分析地应力差异对水平井改进拉链式压裂中水力裂缝扩展方向的影响,选取 4 组不同的地应力差(分别为 2、4、6 和 8 MPa)进行对比研究,结果如图 7、8 所示。从图 7 可以看出,当地应力差为 2 MPa 时,大多数水力裂缝的扩展延伸都出现了一定偏离,且中间裂缝的偏转程度最大,表明此时裂缝扩展方向受缝间应力场干扰的影响最为明显。以第 8 条裂缝为例,其裂缝形态主要受到第 6 条和第 7 条裂缝的叠加应力干扰作用,裂缝一端

出现最大主应力较低的情况,因此倾向另一端进行扩展,造成裂缝之间的长度和扩展方向都存在差异。当地应力差等于 8 MPa 时,水力裂缝几乎沿最大主应力方向扩展,且各个射孔簇的裂缝几何形态更为接近,表明在高地应力差情况下,水力裂缝的扩展方向主要由初始地应力差决定。因此随地应力差的增大,裂缝偏转程度减弱,表明原地应力差和缝间应力场同时对裂缝的扩展起作用。从缝内压力对比图 8 可以看出,当地应力差越小时,裂缝偏转越严重,流体在裂缝内流动的阻碍增

大,因此导致缝内压力升高。最大和最小水平主应力的比值会直接影响裂缝的净压力和裂缝的扩展方向,从而影响力阴影效应的作用效果。水

平主应力之比越小,应力阴影效应对相邻裂缝的影响越强,压裂时裂缝越易转向并与天然裂缝沟通形成复杂缝网。

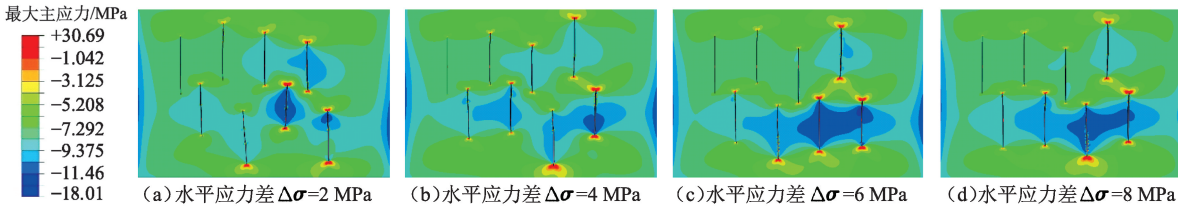


图 7 不同应力差条件下的水平井改进拉链式压裂裂缝几何形态分布

Fig. 7 Fracture distributions under different stress differences in modified zipper fracturing

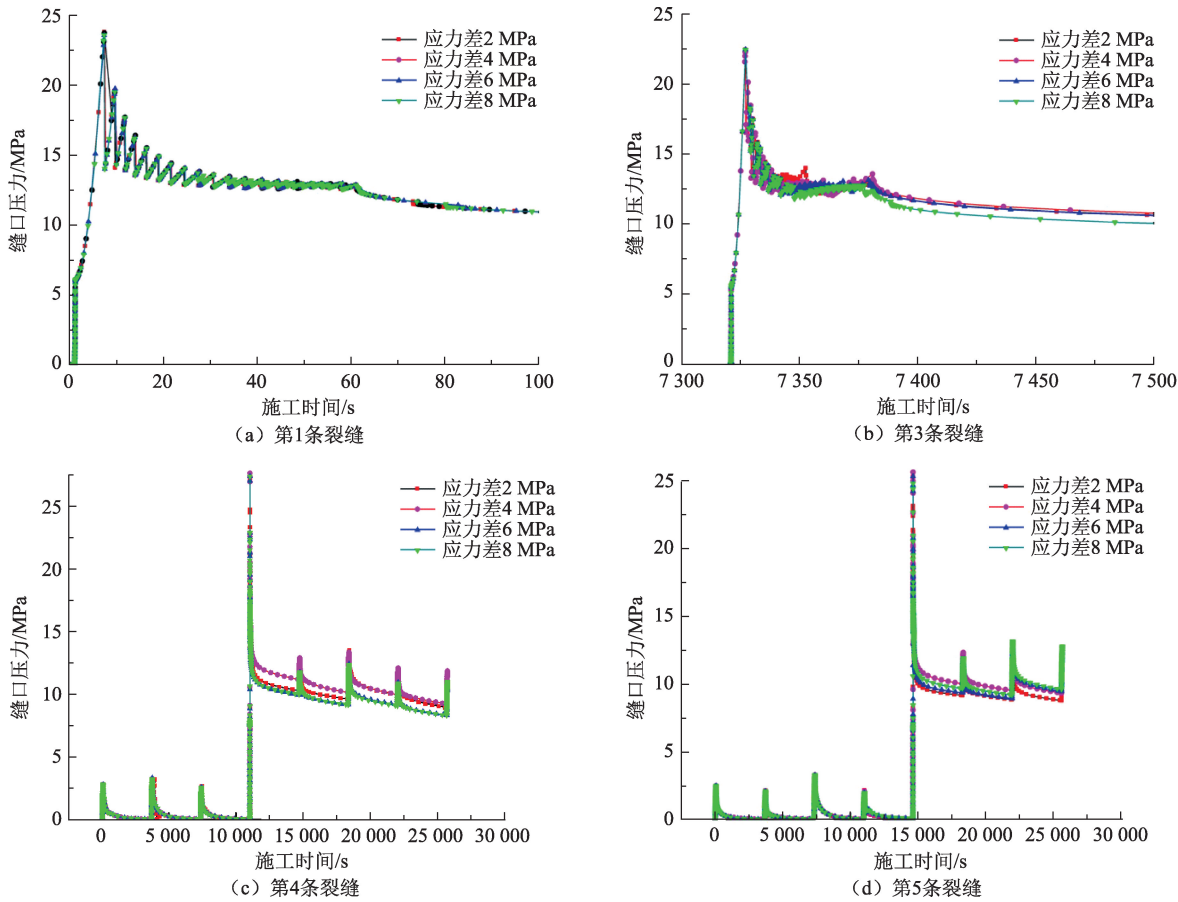


图 8 裂缝缝口压力在不同地应力条件下随时间的变化

Fig. 8 Changes of fracture pressures with time under different stress differences

4 实例应用

以美国 Bakken 油田某页岩储层的改进拉链式压裂水平井为例进行验证,其中水平井所在的目标储层厚度为 26 m,井深为 2 291 m,井间距为 150 m,泊松比为 0. 23,最大水平主应力为 34. 80 MPa,最小水平主应力为 28. 80 MPa。采用滑溜水作为压裂液,以套管固井滑套压裂工艺共进行 17 段分段压裂,以第 1 个压裂段为例进行分析,其中水平井改造长度约为 90 m,1号水平井含有 4 个射孔簇,2 号水

平井含有 3 个射孔簇,簇间距为 15 m。采用现场物性参数,对两口水平井第 1 个压裂段进行改进拉链式压裂数值模拟,同时将模拟的裂缝形态导入多物理场耦合数值模拟软件 COMSOL Multiphysics 中进行产量预测,结果如图 9 所示。结合现场微地震数据发现,拉链式压裂后的微地震云反映每条主裂缝长度约为 180 m,同水力压裂数值模拟结果基本吻合,数值模拟生产 30 d,计算累积产油量为 931 m³,而实际压裂施工后累积产油量平均每个压裂段约为 856 m³,微地震检测和产量数值模拟

的结果证明了所建立的改进拉链式水力压裂数值模型的准确性和适用性,对现场页岩油开发应用具有一定的指导意义。

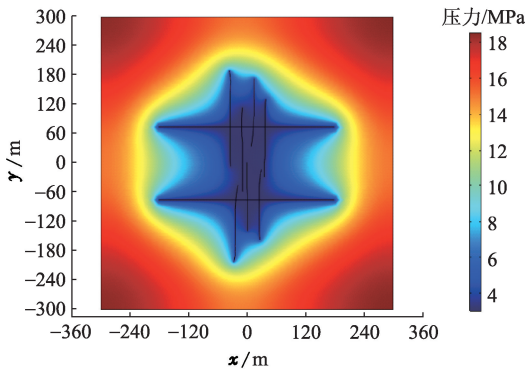


图9 基于 COMSOL Multiphysics 的页岩油产能数值模拟结果

Fig.9 Numerical simulation of shale oil production by COMSOL Multiphysics software

5 结 论

(1) 在水平井改进拉链式压裂设计中,要充分考虑裂缝间距的优化问题,以保证压裂改造体积复杂度和扩展范围的统一。裂缝受应力干扰影响的程度各不相同,处在内部的裂缝更易发生转向,且偏转角度存在差异。

(2) 受改进拉链式压裂缝间诱导应力场的影响,不同位置处的裂缝两侧扩展距离并不相同。裂缝间距越大,簇间应力干扰作用越小,压裂后形成的各条裂缝形态越接近,且可以保证裂缝从射孔处向两侧均匀的延伸。地应力差增大会促使裂缝宽度减小,长度增长,同时会降低缝间应力干扰对裂缝扩展的影响。

(3) 利用扩展有限元法实现了水平井改进拉链式压裂的数值模拟,所建立的数值模型和分析方法可用于确定水平井改进拉链式压裂的最优裂缝间距和分析裂缝形态,对现场的压裂施工设计具有重要的指导意义。

参考文献:

[1] 周健,陈勉,金衍,等.多裂缝储层水力裂缝扩展机理实验[J].中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(4):51-59.
ZHOU Jian, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experiment of propagation mechanism of hydraulic fracture in multi-fracture reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(4):51-59.

[2] 闫相祯,李向阳.基于裂缝干涉模型的非常规油气井压裂优化设计软件的开发与应用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5):120-128.
YAN Xiangzhen, LI Xiangyang. Development and application of unconventional oil and gas well fracturing optimization design software based on fracture network interference model[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(5): 120-128.
[3] RAFIEE M, SOLIMAN M Y, PIRAYESH E. Hydraulic fracturing design and optimization: a modification to zipper fracture[R]. SPE 159786-MS, 2012.
[4] 陈勉.页岩气储层水力裂缝转向机制[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5):88-94.
CHEN Mian. Re-orientation and propagation of hydraulic-fractures in shale gas reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(5):88-94.
[5] NAGEL N B, SANCHEZ-NAGEL M A, ZHANG F, et al. Coupled numerical evaluations of the geomechanical interactions between a hydraulic fracture stimulation and a natural fracture system in shale formations[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2013,46(3):581-609.
[6] 张广明,刘合,张劲,等.油井水力压裂流固耦合非线性有限元数值模拟[J].石油学报,2009,30(1):113-116.
ZHANG Guangming, LIU He, ZHANG Jin, et al. Simulation of hydraulic fracturing of oil well based on fluid-solid coupling equation and non-linear finite element[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009,30(1):113-116.
[7] 王素玲,姜民政,刘合.基于损伤力学分析的水力压裂三维裂缝形态研究[J].岩土力学,2011,32(7):2205-2210.
WANG Suling, JIANG Minzheng, LIU He. Study of hydraulic fracturing morphology based on damage mechanics analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2205-2210.
[8] WU K. Simultaneous multi-frac treatments: fully coupled fluid flow and fracture mechanics for horizontal wells[J]. SPE Journal, 2013,20(2):337-346.
[9] ZIENKIEWICZ O C, TAYLOR R L. The finite element method: an introduction with differential equations[M]. Burlington: Elsevier, 2005:42-45.
[10] ZHU H, DENG J, JIN X, et al. Hydraulic fracture initiation and propagation from wellbore with oriented perforation[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2015,48(2):585-601.
[11] KRESSE O, WENG X W, GU H R, et al. Numerical

- modeling of hydraulic fractures interaction in complex naturally fractured formations[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(3):555-568.
- [12] 张广明, 刘勇, 刘建东, 等. 页岩储层体积压裂的地应力变化研究[J]. 力学学报, 2015, 47(6):965-972.
ZHANG Guangming, LIU Yong, LIU Jiandong, et al. Research on the geostress change of shale reservoir volume fracturing[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(6):965-972.
- [13] SALEHI S, NYGAARD R. Full fluid-solid cohesive finite-element model to simulate near wellbore fractures[J]. Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME, 2015, 137(1):1-9.
- [14] 郭建春, 尹建, 赵志红. 裂缝干扰下页岩储层压裂形成复杂裂缝可行性[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(8):1589-1596.
- GUO Jianchun, YIN Jian, ZHAO Zhihong. Feasibility of formation of complex fractures under cracks interference in shale reservoir fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(8):1589-1596.
- [15] HUNSWECK M J, SHEN Y, LEW A J. A finite element approach to the simulation of hydraulic fractures with lag[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(9):993-1015.
- [16] FRIES T P, BELYTSCHKO T. The extended/generalized finite element method: an overview of the method and its applications[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, 84(3):253-304.

(编辑 李志芬)