

基于扩展有限元的页岩水平井 多裂缝模拟研究*

陈军斌, 魏波, 谢青, 王汉青, 李涛涛, 王浩

(西安石油大学 石油工程学院, 西安 710065)

摘要: 页岩储层水平井分段多簇压裂簇间距优选是压裂技术的关键,建立了水力压裂流固耦合数学模型,基于扩展有限单元法模拟多条裂缝的扩展过程,研究多条裂缝同时扩展的转向规律,以及应力干扰、水平主应力差、裂缝间距等因素与裂缝转向角度的关系.结果表明:应力干扰作用对裂缝宽度具有限制作用,单条裂缝张开宽度比两条裂缝的大;裂缝转角随应力差的减小而增大,随压裂时间的增加而增大.簇间距越小,应力干扰越强,转角越大,综合主缝均匀扩展、支撑剂填充以及复杂裂缝网络形成等条件,确定最优簇间距为30~40 m.多条裂缝同时扩展时,中间裂缝会受到两边裂缝的限制作用,簇间距越小,限制作用越强,裂缝发育时间越长,扩展速度越慢.

关键词: 页岩储层; 水平井; 分段多簇水力压裂; 扩展有限元; 裂缝干扰

中图分类号: TE357; O343.1 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2016.01.006

引 言

页岩储层具有微米级、甚至纳米级的孔隙与基质渗透率,内部普遍含有天然的微裂纹,矿物含量普遍偏高等特点^[1-3].页岩气这些特点提供了水平井分段多簇水力压裂技术重要的发展空间,其中射孔簇数、簇间距等是技术关键.分段多簇射孔、多簇裂缝同时起裂扩展比单段射孔、单裂缝起裂扩展具有更强的应力干扰,裂缝形态更加复杂,为复杂缝网的实现提供可行性^[4].2011年,Roussel和Sharma^[5]基于有限差分法求解多裂缝周围的应力分布,预测裂缝的延伸方向.2011年,Dahi-Taleghani和Olson^[6]基于扩展有限元法求解了二维平面问题的裂缝扩展形态,耦合了流体流动与岩石变形.2013年,Castonguay等^[7]基于边界元法模拟多条水力压裂裂缝扩展时的相互干扰情况,求解了裂缝形态.2015年,Wu等^[8]基于位移不连续法模拟了多条裂缝的同时扩展过程,耦合水平井井筒、裂缝内的液体流动以及岩石力学变形,得出多条裂缝的扩展形态与压力分布.其中,扩展有限元法能够精细描述岩石内部裂缝的几何形态,有效克服裂缝尖端高应力区和变形集中区奇点网格划分困难等问题,并且具有计算速度快等其他方法无法比拟的优势^[9-11].这些优点使该方法的应用更加广泛.2012年,Keshavarzi等^[12]基于扩展有限元法模拟裂缝扩展过程,求解了单条裂缝形态.2013年,Chen^[13]建立了扩展有限元

* 收稿日期: 2015-07-08; 修订日期: 2015-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(51374170)

作者简介: 陈军斌(1963—),男,教授,博士(E-mail: chenjbxu@126.com);

魏波(1987—),男,硕士生(通讯作者. E-mail: xysuweibo131010097@163.com).

格式的水力压裂裂缝扩展数学模型,证明了扩展有限元法求解裂缝形态的准确性.2014年,曾青冬和姚军^[14]研究了基于扩展有限元法的裂缝扩展过程,发现页岩弹性模量、Poisson(泊松)比及注入速度对裂缝扩展长度都有重要影响.2015年,Sepehri等^[15]基于扩展有限元方法模拟水力裂缝自射孔孔眼延伸过程,研究了射孔参数对裂缝形态的影响.

以上研究大多集中在单条裂缝扩展过程,对多条裂缝同时扩展过程的研究还较少见.多裂缝扩展比单裂缝扩展的应力分布更加复杂,多裂缝同时扩展会由于应力干扰而发生转向,转向规律及其影响因素的研究对压裂施工射孔位置选择、簇间距优选均有重要工程实用价值.合适的转向,会提高裂缝的复杂程度,有利于页岩气的开采;但转角越大,流体流动的摩擦阻力越大,必将引起后期支撑剂的沉降,造成砂堵.针对上述问题,本文基于扩展有限元方法,考虑多物理场耦合、流体滤失以及应力干扰,开展多裂缝扩展模拟实验,分析应力差、簇间距对裂缝转向的影响,并量化裂缝间距与转向角度的关系,对压裂施工过程中簇间距的选择具有指导意义.

1 水力压裂控制方程

1.1 岩石变形

在一个均质、各向同性、线弹性的二维水力驱动裂缝扩展域 Ω 中,岩石变形控制方程满足

$$\begin{cases} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{f} = \mathbf{0}, \\ \boldsymbol{\varepsilon} = (\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^T) / 2, \\ \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{D} \boldsymbol{\varepsilon}, \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量, \boldsymbol{D} 为 Hooke 张量; \boldsymbol{f} 为体积力; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为应变张量.

岩石变形的应力边界与位移边界满足

$$\begin{cases} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{n} = \boldsymbol{F}, & \text{on } \Gamma_F, \\ \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{n}^- = -\boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{n}^+ = -p \boldsymbol{n}^+ = p \boldsymbol{n}^-, & \text{on } \Gamma_f, \\ \boldsymbol{u} = \boldsymbol{u}_0, & \text{on } \Gamma_u, \end{cases} \quad (2)$$

式中, \boldsymbol{n} 为单位法线向量; Γ_u , Γ_f 和 Γ_F 分别表示岩体的位移边界、裂缝边界和外力边界; \boldsymbol{u} 为位移张量; \boldsymbol{u}_0 为边界上的位移张量; \boldsymbol{F} 为牵引力.

1.2 流体流动控制方程

流体在裂缝内流动满足 Reynolds(雷诺)方程^[16]

$$q = -\frac{w^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + q_1 = 0, \quad (4)$$

式中, q_1 为裂缝中流体渗漏岩石基质中的流量; p 为流体压力; w 为裂缝张开宽度; μ 为流体粘度.

流体流动的边界条件为

1) 在入口处,流体流量等于注入量:

$$q(0) = Q_0, \quad (5)$$

式中, Q_0 为注入裂缝中的流量.

2) 在裂缝尖端,流体流量与裂缝开度为 0:

$$w(L/2) = 0, \quad q(L/2) = 0, \quad (6)$$

式中, $L/2$ 为裂缝半长, 为了研究方便, 在不影响研究结果的前提下, 取裂缝半长作为研究对象。

压裂裂缝扩展判据满足岩石失稳条件: 岩石应力强度因子 K_I 值达到其断裂韧性 K_{IC} 时岩石失稳扩展, 有

$$K_I \geq K_{IC}. \quad (7)$$

2 控制方程离散及数值求解

2.1 扩展有限近似

基于扩展有限元格式的裂缝周围位移场的近似式为

$$\mathbf{u}^h(\mathbf{x}) = \sum_{i \in I} N_i(\mathbf{x}) \mathbf{u}_i + \sum_{j \in I_{cr}} N_j(\mathbf{x}) H(\mathbf{x}) \mathbf{a}_j + \sum_{j \in I_{tip}} N_j(\mathbf{x}) \sum_{m=1}^4 B^m(\mathbf{x}) \mathbf{b}_j^m, \quad (8)$$

$$\{B^m(\mathbf{x})\}_{m=1}^4 = \left\{ \sqrt{r} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{r} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \sqrt{r} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin(\theta), \sqrt{r} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin(\theta) \right\}, \quad (9)$$

式中, I 为网格中所有单元节点的集合, I_{cr} 为被裂缝完全贯穿但不包括裂纹尖端的单元节点集合, I_{tip} 为含有裂缝尖端的单元节点集合; $N_i(\mathbf{x})$ 为单元节点形函数, $N_j(\mathbf{x})$ 为单元中含有间断节点的形函数, 二者是不同的; \mathbf{u}_i 为位移节点自由度, \mathbf{a}_j 与 \mathbf{b}_j^m 为扩充函数位移节点自由度; $H(\mathbf{x})$ 为阶跃扩充形函数; $B^m(\mathbf{x})$ 为裂尖扩充形函数。

由式(8)可知, 裂缝张开位移为

$$w(\mathbf{x}) = \mathbf{u}^+(\mathbf{x}) - \mathbf{u}^-(\mathbf{x}) = 2 \sum_{j \in I_{cr}} N_j(\mathbf{x}) \mathbf{a}_j + 2 \sum_{j \in I_{tip}} N_j(\mathbf{x}) B^1(\mathbf{x}) \mathbf{b}_j^1, \quad \mathbf{x} \in \Gamma_f. \quad (10)$$

裂缝内流体压力场近似为

$$\mathbf{p}^h(\mathbf{x}) = \sum_{i \in I} N_i(\mathbf{x}) p_i, \quad \mathbf{x} \in \Gamma_f. \quad (11)$$

2.2 控制方程离散

岩体变形方程的弱形式为

$$\int_{\Omega} \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega - \int_{\Omega} \delta \mathbf{u}^T \mathbf{f} d\Omega - \int_{\Gamma_F} \delta \mathbf{u}^T \mathbf{F} d\Gamma_F - \int_{\Gamma_f} \delta \mathbf{w}^T \mathbf{p} d\Gamma_f = 0, \quad (12)$$

式中, Ω 为二维裂缝域; \mathbf{F} 为 Γ_F 边界上的牵引力; $\delta \mathbf{u}$ 为虚位移; $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$ 为对应的虚应变, 与 $\delta \mathbf{u}$ 的关系为 $\delta \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{S} \delta \mathbf{u}$, \mathbf{S} 为应变算子。

将式(12)中的 $\delta \mathbf{u}$ 与 $\delta \mathbf{w}$ 通过扩展有限元格式进行近似, 引入了裂缝路径与尖端富集形函数来描述岩体在流体压力作用下的断裂扩展过程。

裂缝内流体流动控制方程的弱形式为

$$\int_{\Gamma_f} \frac{w^3}{12\mu} \nabla \mathbf{p} \nabla (\delta \mathbf{p}^T) d\Gamma_f = \left(\delta \mathbf{p}^T \frac{w^3}{12\mu} \nabla \mathbf{p} \right)_{\Gamma_f} - \int_{\Gamma_f} \delta \mathbf{p}^T \frac{\partial w}{\partial t} d\Gamma_f - \int_{\Gamma_f} \delta \mathbf{p}^T q_1 d\Gamma_f, \quad (13)$$

式中, $\delta \mathbf{p}$ 为虚压力, 用式(11)进行近似。

将式(12)与式(13)结合, 可得到基于扩展有限元格式的页岩储层水平井水力压裂裂缝扩展耦合模型。

2.3 模型数值求解

编写基于扩展有限元格式的页岩储层水平井水力压裂裂缝扩展流固耦合模型(12)与(13)的计算程序, 并通过扩展有限单元法耦合求解线性矩阵(14), 得到裂缝几何形态与流体

压力分布:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\tilde{\mathbf{u}}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{p}}} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & -\mathbf{Q} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{u}} \\ \tilde{\mathbf{p}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{f}^u \\ \mathbf{f}^p \end{pmatrix}, \quad (14)$$

其中, \mathbf{K} 为刚度矩阵; \mathbf{C} , \mathbf{Q} 与 \mathbf{H} 为计算的系数矩阵; \mathbf{f}^u 与 \mathbf{f}^p 为外力向量; $\tilde{\mathbf{u}}$ 与 $\dot{\tilde{\mathbf{u}}}$ 为节点位移向量; $\tilde{\mathbf{p}}$ 与 $\dot{\tilde{\mathbf{p}}}$ 为节点流体压力向量。

3 多条水力压裂裂缝扩展分析

水平井分段压裂技术中, 单段设计 2~6 簇射孔数, 在水压作用下, 多簇裂缝同时发生扩展比单簇裂缝应力分布更加复杂, 在应力干扰下形成的裂缝形态也更加复杂, 裂缝之间的相互作用会使裂缝路径发生转向。因此, 对多簇裂缝同时扩展规律的研究对页岩储层压裂设计具有重要的作用。

3.1 两条裂缝同时扩展模型

设计两条水力压裂裂缝同时扩展模型, 裂缝扩展步长受时间步长控制, 为了满足计算较好的收敛性, 本文将裂缝扩展分为 3 个阶段, 第一阶段为起裂阶段 0~3 min, 时间步长为 $\Delta t = 0.1$ min; 第二阶段为裂缝干扰转向扩展阶段 3~10 min, 时间步长为 $\Delta t = 0.05$ min; 第三阶段为稳定扩展阶段 10~40 min, 时间步长为 $\Delta t = 0.2$ min。水平井并筒与裂缝方位如图 1 所示, A 与 B 为两个射孔簇点, A 与 B 的距离为簇间距 S 。模型垂直方向受到最大水平主应力 σ_{\max} 的作用, 水平方向受到最小水平主应力 σ_{\min} 的作用, θ 为裂缝在应力干扰下的转角。图 1 中两条裂缝在扩展过程中由于计算机浮点数有效位数、迭代算法的精度以及网格划分等因素的影响并不完全对称, 裂缝尖端的位置坐标相对于理想扩展情况下的误差为 0.67%, 此误差对裂缝扩展、转向角度及对模拟结果的影响非常小, 可忽略不计。模型研究了应力干扰、应力差以及簇间距对裂缝转角的影响。模型算例选取页岩储层特征参数取值见表 1。

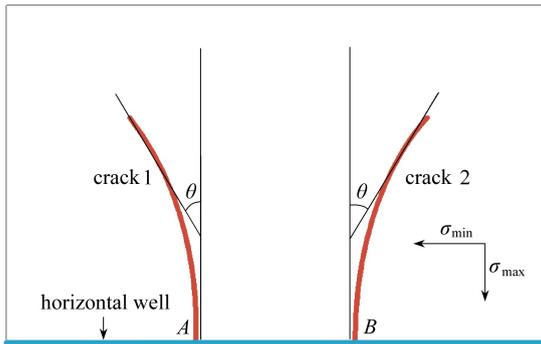


图 1 两条裂缝同时扩展示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2 simultaneously propagating cracks

表 1 模型参数取值

Table 1 Parameter values in the model

parameter	value	parameter	value
elastic modulus E / Pa	2.3×10^{10}	Poisson's ratio ν	0.25
matrix permeability K / μm^2	1×10^{-9}	porosity Φ	5%
pore pressure P_p / Pa	30×10^6	tensile strength σ_t / Pa	2×10^6
injection rate Q_0 / (m^3/min)	1.25	fluid viscosity μ / ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	0.01

3.2 模型验证

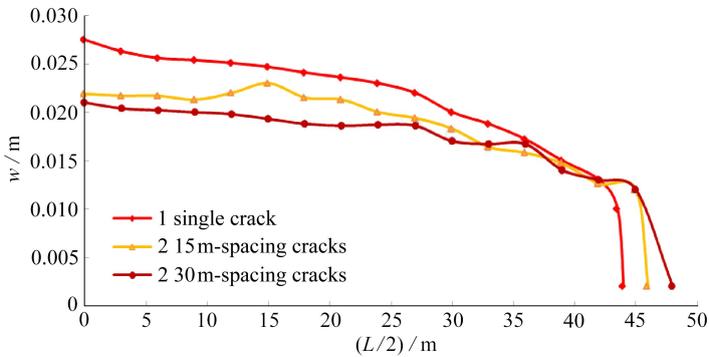
为验证模型的准确性,将单条裂缝的扩展结果与经典模型(KGD)^[17]进行对比,压裂 40 min,用 KGD 模型计算出的裂缝长度为 43.71 m;XFEM 模型计算出的结果为 43.33 m,结果相差很小,验证其准确性。

3.3 影响因素分析

如图 1 所示,两条同时扩展的裂缝之间存在应力干扰作用,会对周围岩石以及相邻裂缝施加额外的力,改变最大水平主应力的方向,促使裂缝发生相斥转向。在应力干扰对裂缝转向影响的同时,水平主应力差也对其有重要的影响。为了量化两者影响的主导性,可用拟净压力系数^[18]来定义:

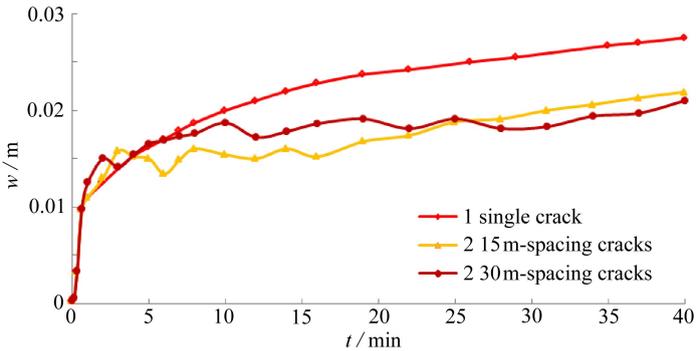
$$R_n = \frac{(P_{\text{frac}} - \sigma_{\text{min}})}{(\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}})}, \tag{15}$$

式中, P_{frac} 为净压力。



(a) 单条裂缝与两条裂缝的缝宽随缝长的变化

(a) Crack widths vs. half crack lengths of 1 single crack and 2 cracks



(b) 单条裂缝与两条裂缝的缝宽与时间的关系

(b) Crack width changes with time of 1 single crack and 2 cracks

图 2 应力干扰对裂缝宽度的限制作用

Fig. 2 Restriction of stress interference on crack widths

裂缝之间干扰作用的强弱依赖于缝内净压力的大小,净压力越大,应力干扰对裂缝扩展路径的影响就越大。 $R_n > 1$ 时,应力干扰对裂缝形态的影响占主要作用, $R_n < 1$ 时,应力差对裂缝形态的影响占主要作用。无论应力差影响的强弱,应力干扰都会对裂缝宽度具有重要的限制作用(如图 2 所示)。

从图 2 可知,由于干扰作用的影响,单条裂缝的张开宽度明显大于两条裂缝的张开宽度。由簇间 15 m 与 30 m 两条裂缝扩展宽度随时间与裂缝半长的变化过程发现,簇间距对裂缝宽度的影响比较小。

簇间距 $S = 15$ m 时,通过调节最小主应力的值,研究水平主应力差的变化对裂缝转角的影响。图 3 给出了最大主应力分布云图,反映了应力差的变化对裂缝转向角度的影响,水平主应力差为水平最大主应力与最小主应力的差值,即

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (16)$$

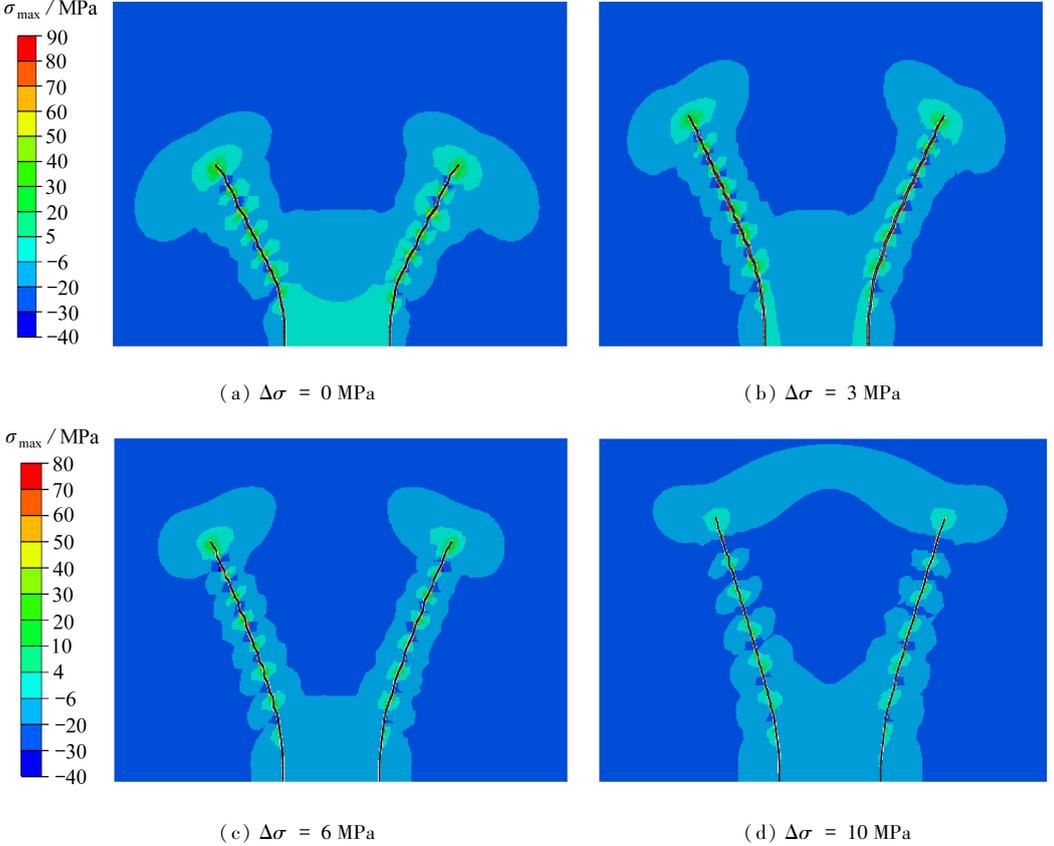


图 3 应力差对裂缝转向影响

Fig. 3 Influence of stress difference on crack turning

从图 3 明显发现,当应力各向同性 ($\Delta\sigma = 0$ MPa) 时,裂缝转角变化较大,转角为 27.2° ,当应力各向异性时,应力差 $\Delta\sigma$ 越大,裂缝转向角度 θ 越小。对于水平主应力差小的地层,应该增加裂缝簇间距来减弱裂缝的偏转程度,有利于提高压裂效果,防止砂堵。从图中可以看出,随着应力差的增大,裂缝扩展长度变化较明显,原因是: 1) 最小主应力在降低从而减小了裂缝的起裂时间与破裂压力,有利于裂缝延伸。2) 随着应力差的增大,裂缝转向角度减小,压裂液受到摩擦阻力的作用较小,对压裂效果的影响较小。

应力差 $\Delta\sigma = 10$ MPa 时,两簇裂缝同时扩展,簇间距对裂缝转角的影响如图 4 所示。

从图 4 可明显看出,不同簇间距下,裂缝转角随压裂时间的变化较大,簇间距越小,应力干扰作用越强,裂缝转角越大。簇间距 $S = 5$ m,裂缝最先发生转向,随着簇间距的增加,裂缝开始转向的时间越长。除簇间距 $S = 5$ m 时,裂缝转角上升到最高点,有稍微的下降趋势,其他曲线

的裂缝转角都是随着压裂时间的增加而增加.簇间距 $S < 25$ m 时,在 0~10 min 内,裂缝转角随压裂时间的增长较快,会出现转角过大现象,给流体流动与支撑剂填充增添困难. $S \geq 25$ m 时,裂缝转角随压裂时间的变化出现减缓趋势. $S \geq 35$ m 时,裂缝转角随压裂时间稳步增加,为了保证主缝有效的扩展长度和复杂的裂缝网络,现场压裂设计应该优选簇间距 $S = 35$ m 左右为宜.

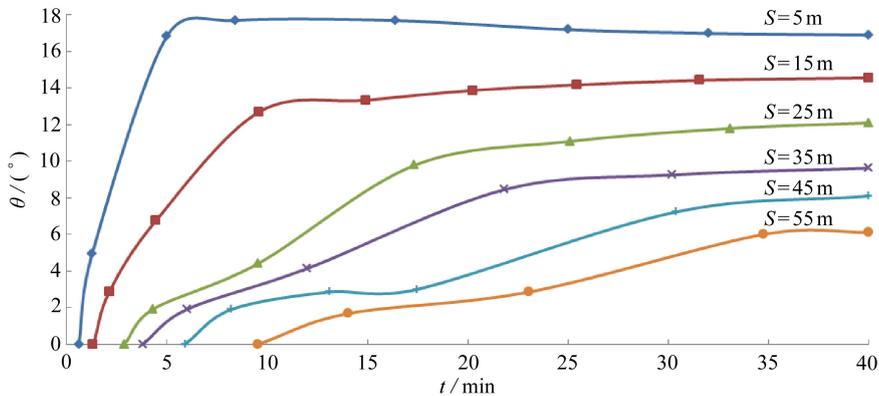


图 4 不同簇间距下,裂缝转角随压裂时间的变化关系曲线

Fig. 4 In different cluster spacings, crack turning angles vs. fracturing time

定量化的裂缝转角随簇间距之间的变化关系如图 5 所示.

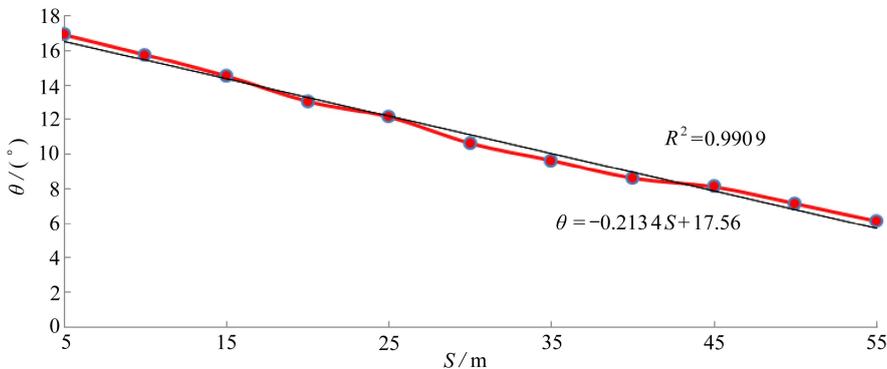


图 5 簇间距与裂缝转角的关系曲线

Fig. 5 The fitting curve of the relation between the cluster spacing and the crack turning angle

从图 4 与图 5 可以发现,最优的簇间距为 30~40 m,簇间距小于 30 m 时,应力干扰作用较强,转向角度较大,转角处摩擦阻力较大,给流体流动和支撑剂的充填增加困难,甚至引起砂堵.簇间距大于 40 m 时,裂缝之间的干扰作用较弱,转角比较小,减弱了缝网的复杂程度,降低了页岩气的压裂效果.

拟合簇间距与裂缝转角的关系曲线,得到线性关系式为

$$\theta = -0.2134S + 17.56, \tag{17}$$

式中, θ 单位为($^{\circ}$).

表 2 中, θ 为数值模拟值; θ^* 为归一化值; E_r 为相对误差.由表 2 可知,数值模拟值的相对误差不超过 5%,说明拟合的线性曲线基本与数值模拟曲线吻合,反映了裂缝转角随簇间距的变化趋势,并且与理论变化趋势相吻合.此关系曲线可有效指导压裂施工现场射孔簇间

距的优选。

表2 拟合曲线的误差分析

Table 2 Error analysis of the fitting curve

S/m	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
$\theta / (^{\circ})$	16.91	15.75	14.51	13.05	12.14	10.63	9.62	8.60	8.10	7.13	6.12
$\theta^* / (^{\circ})$	16.49	15.43	14.36	13.29	12.23	11.16	10.09	9.02	7.96	6.89	5.82
$E_r = \frac{ \theta - \theta^* }{\theta} \times 100\%$	2.8%	2%	1%	1.8%	0.7%	5%	4.9%	4.9%	1.7%	3.4%	4.8%

3.4 多条裂缝的扩展规律

设计间隔为 20 m 与 30 m 的簇间裂缝在流体压力作用下的扩展过程,研究多条裂缝的起裂、扩展及转向规律(如图 6 所示)。

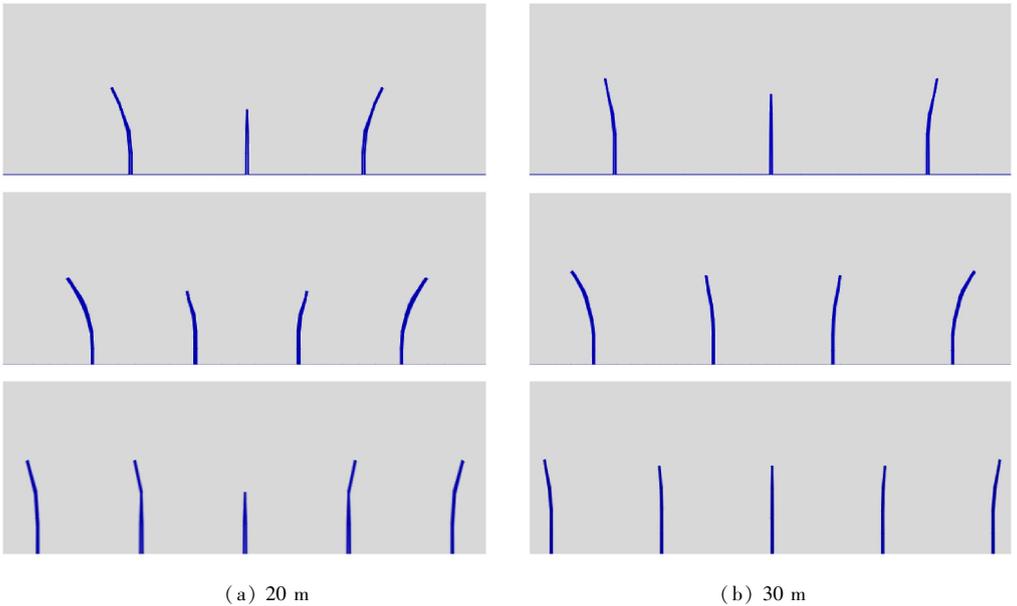


图6 不同的射孔簇间裂缝在间隔 20 m 与 30 m 时的扩展规律

Fig. 6 Propagation patterns of different perforation cluster cracks with spacings of 20 m and 30 m

由图 6 可知:

1) 中间裂缝扩展都受到左右两边裂缝的约束作用,间隔 20 m 裂缝比间隔 30 m 裂缝约束作用更强,使中间裂缝的扩展长度受到周围裂缝应力干扰的约束,导致扩展长度较小。簇间距 30 m 以上,应力干扰对中间裂缝扩展长度的影响较小,为了使所有主裂缝都能均匀扩展,簇间距可优选超过 30 m,与工程实际相吻合。

2) 中间裂缝起裂时间、扩展速度总是慢于两边裂缝,以图 6(a) 为例,最外边两条裂缝最先起裂、扩展,越向内,裂缝起裂时间越长,扩展速度越慢。其原因是最先张开裂缝的应力干扰作用给中间裂缝周围岩石施加了额外的力,使中间裂缝的起裂压力变大,起裂与扩展变得更困难。

4 结 论

本文基于扩展有限元方法,考虑多物理场耦合、流体滤失以及应力干扰,开展多裂缝扩展

模拟实验,分析应力干扰、应力差以及簇间距与裂缝转向角度的关系.具体结论如下:

1) 在应力干扰作用下,两条裂缝的扩展路径发生相斥转向,应力差越小,裂缝转角越大.通常应力差与应力干扰共同影响着裂缝的扩展路径,可用拟净压力系数 R_n 来判断两者的主导性.

2) 应力干扰作用下,单条裂缝的张开宽度比两条裂缝张开宽度大.

3) 射孔簇越密,裂缝之间的干扰作用越强,转角越大,提高了压裂支撑剂输送困难与砂堵风险,射孔簇越疏,转角越小,不利于形成复杂的裂缝网络,降低页岩气的压裂效果.本文研究得出最优的簇间距为 30~40 m.

4) 多条裂缝同时扩展,中间裂缝的扩展会受到两边裂缝的约束作用,起裂时间较长、扩展速度较慢,最终形成的裂缝长度较小.并且簇间距越小,限制作用越强,越不利于中间裂缝的均匀扩展.

本文的研究结果对页岩储层水平井水力压裂施工工艺中簇间距的优选,具有重要的指导意义.

致谢 作者衷心感谢西安石油大学优秀硕士学位论文培育项目(2014yp130101)对本文的资助.

参考文献(References):

- [1] 姚军,孙海,黄朝琴,张磊,曾青冬,隋宏光,樊冬艳.页岩气藏开发中的关键力学问题[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2013,43(12):1527-1547.(YAO Jun, SUN Hai, HUANG Zhao-qin, ZHANG Lei, ZENG Qing-dong, SUI Hong-guang, FAN Dong-yan. Key mechanical problems in the development of shale gas reservoirs[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2013, 43(12): 1527-1547.(in Chinese))
- [2] 赵金洲,王松,李勇明.页岩气藏压裂改造难点与技术关键[J].天然气工业,2012,32(4):46-49,122.(ZHAO Jin-zhou, WANG Song, LI Yong-ming. Difficulties and key techniques in the fracturing treatment of shale gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(4): 46-49, 122.(in Chinese))
- [3] 姚同玉,黄延章,李继山.页岩中页岩气渗流系数计算模型[J].应用数学和力学,2014,35(8):983-948.(YAO Tong-yu, HUANG Yan-zhang, LI Ji-shan. Calculation model for the permeability coefficient of shale gas in shale matrix[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, 35(8): 983-948.(in Chinese))
- [4] 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 Jian-chun, YIN Jian, ZHAO Zhi-hong. 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.(in Chinese))
- [5] Roussel N P, Sharma M M. Strategies to minimize frac spacing and stimulate natural fractures in horizontal completions[C]//*SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. Denver, Colorado, USA, 2011. doi: org/10.2118/146104-MS.
- [6] Dahi-Taleghani A, Olson J E. Numerical modeling of multistranded-hydraulic-fracture propagation: accounting for the interaction between induced and natural fractures[J]. *SPE Journal*, 2011, 16(3): 575-581.
- [7] Castonguay S T, Mear M E, Dean R H, Schmidt J H. Predictions of the growth of multiple interacting hydraulic fractures in three dimensions[C]//*SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. New Orleans, Louisiana, USA, 2013.

- [8] Wu K, Olson J E. Simultaneous multifracture treatments: fully coupled fluid flow and fracture mechanics for horizontal wells[J]. *SPE Journal*, 2015, **20**(2): 337-346.
- [9] Fries T P, Baydoun M. Crack propagation with the extended finite element method and a hybrid explicit-implicit crack description[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2012, **89**(12): 1527-1558.
- [10] Arlanoglu C, Feng Y, Podnos E, Becker E, Gray K E. Finite element studies of wellbore strengthening[C]//*IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers. Fort Worth, Texas, USA, 2014.
- [11] 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.
- [12] Keshavarzi R, Mohammadi S. A new approach for numerical modeling of hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs[C]//*Proceedings of SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference & Exhibition—From Potential to Production*. Vienna, Austria, 2012.
- [13] CHEN Zuo-rong. An ABAQUS implementation of the XFEM for hydraulic fracture problems [C]//*ISRM International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing*. International Society for Rock Mechanics. Brisbane, Australia, 2013.
- [14] 曾青冬, 姚军. 基于扩展有限元的页岩水力压裂数值模拟[J]. *应用数学和力学*, 2014, **35**(11): 1239-1248. (ZENG Qing-dong, YAO Jun. Numerical simulation of shale hydraulic fracturing based on the extended finite element method[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, **35**(11): 1239-1248. (in Chinese))
- [15] Sepehri J, Soliman M Y, Morse S M. Application of extended finite element method to simulate hydraulic fracture propagation from oriented perforations [C]//*SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*. Society of Petroleum Engineers. The Woodlands, Texas, USA, 2015.
- [16] Weber N, Siebert P, Willbrand K W, Feinendegen M, Clauser C, Fries T P. The XFEM with an explicit-implicit crack description for hydraulic fracture problems[C]//*ISRM International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing*. International Society for Rock Mechanics. Brisbane, Australia, 2013.
- [17] Geersma J, Klerk F D. A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1969, **21**(12): 1571-1581.
- [18] Olson J E, Dahi-Taleghani A. Modeling simultaneous growth of multiple hydraulic fractures and their interaction with natural fractures[C]//*SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*. Society of Petroleum Engineers. The Woodlands, Texas, USA, 2009.

Simulation of Multi-Hydrofracture Horizontal Wells in Shale Based on the Extended Finite Element Method

CHEN Jun-bin, WEI Bo, XIE Qing, WANG Han-qing,
LI Tao-tao, WANG Hao
(College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University,
Xi'an 710065, P.R.China)

Abstract: The cluster spacing optimization of segmented multi-cluster hydrofracture of horizontal wells makes a key point for the hydrofracturing technology in shale reservoir. The fluid-solid coupling mathematical model for the horizontal well hydrofracture was established. Based on the extended finite element method, the propagation process of multiple cracks was simulated. The turning law of simultaneously propagating multiple cracks, as well as the relationships between the stress interference, horizontal principal stress difference, fracture spacing and the crack turning angle, were studied. The results show that the stress interference has restrictive effects on the crack width, and the opening width of 1 single crack is 1.3 times that of 2 concomitant cracks. The crack turning angle increases with the decrease of the stress difference and the lengthening of the fracturing time. The smaller the cluster spacing is, the stronger the stress interference is and the greater the crack turning angle is. For the sake of uniform propagation of the primary fracture, easy packing of the proppant and effective formation of the complex crack network, the optimal cluster spacing is determined as 30 m to 40 m. In the case of the multiple simultaneously propagating cracks, the middle cracks are restricted by those on both sides. The smaller the cluster spacing is, the stronger the restriction is, which results in a longer time of crack development and a lower propagation rate.

Key words: shale reservoir; horizontal well; segmented multi-cluster hydrofracture; extended finite element method; crack interference

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(51374170)

引用本文/Cite this paper:

陈军斌, 魏波, 谢青, 王汉青, 李涛涛, 王浩. 基于扩展有限元的页岩水平井多裂缝模拟研究[J]. 应用数学和力学, 2016, 37(1): 73-83.

CHEN Jun-bin, WEI Bo, XIE Qing, WANG Han-qing, LI Tao-tao, WANG Hao. Simulation of multi-hydrofracture horizontal wells in shale based on the extended finite element method[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, 37(1): 73-83.