

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.11.011

页岩气藏缝网压裂裂缝间距优化研究

郭建春¹, 李 根¹, 周鑫浩²

(1. 西南石油大学 “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都 610500;

2. 成都千嘉科技有限公司, 四川 成都 610211)

摘 要: 页岩气藏一般具有低孔隙、低渗透等特征, 对其实施缝网压裂是高效开发页岩气的最佳途径。采用位移不连续法建立线弹性二维均质地层诱导应力场分布数学模型, 通过水平应力差异系数对顺序压裂和交替压裂的裂缝间距进行优化研究。结果表明, 水平应力差异系数受到裂缝净压力、裂缝缝长、原地应力场等因素的影响; 裂缝净压力越大、缝长越长, 水平应力差异系数越小; 随着与裂缝距离的增加, 水平应力差异系数呈现先减小后增加的趋势, 因此, 存在后续裂缝形成复杂网络的最佳裂缝间距; 顺序压裂裂缝间距不宜过大, 且后续压裂裂缝间距应适当减小; 交替压裂裂缝间距最优时, 缝间水平应力差异系数最小, 对中间裂缝形成缝网最有利。

关 键 词: 页岩气; 缝网压裂; 裂缝间距; 位移不连续; 诱导应力

中图分类号: O 346.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 11-3123-07

Optimization of fracture spacing in fracture network of shale gas reservoir

GUO Jian-chun¹, LI Gen¹, ZHOU Xin-hao²

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, SWPU, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. ChengduQianjia Technologies Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610211, China)

Abstract: Shale gas reservoirs have low porosity and low permeability characteristics. One of the best ways to produce gas from shale gas reservoir efficiently is using hydraulic fracturing to create complicated fracture networks. Displacement discontinuity method is employed to set up a mathematical model of two-dimensional induced stress field distribution based on the assumption that the formation is homogeneous and elastic. Through the horizontal stress difference coefficient, fracture spacing has been researched. The results show that the horizontal stress difference coefficient is affected by fracture net pressure, fracture length and in-situ stress field etc. The greater the net stress is, the longer the fracture length is, the smaller the difference coefficient of horizontal stress is. With the increase of fracture spacing, the horizontal stress difference coefficient firstly decreases and then increases. Therefore, there is a best fracture spacing for subsequent fracture to form complicated fracture network. The fracture spacing of consecutive multi-stage hydraulic fracturing should not be too large and subsequent fracture spacing should be suitably reduced. When the fracture spacing of alternate multi-stage hydraulic fracturing is optimal, the horizontal stress difference coefficient between the first two fractures is the minimum, and it provides the most advantages for the third fracture to form more complex fracture networks in the altered stress region.

Keywords: shale gas; network fracturing; fracture spacing; displacement discontinuity; induced stress

1 引 言

页岩气储层具有低孔隙、超低渗等特征, 一般只有通过压裂增产后才具有一定的产能^[1]。增产改造中为提高页岩基质的供气能力, 通常采用缝网压裂技术, 使得人工裂缝能沟通天然裂缝, 形成复杂

缝网^[2-3]。为了有效地开发页岩气, 提高压裂后的气井初期产量并最大限度的提高采收率, 压裂设计一般会分段压裂裂缝间距尽可能的小^[4-5]。裂缝数量因间距的减小而增多必然会使压裂后气井的初期产量增加, 但仅仅考虑产能因素而忽略诱导应力场的影响会使分段压裂中裂缝间距设置得不合理。由于

收稿日期: 2014-12-01

第一作者简介: 郭建春, 男, 1970年生, 博士, 教授, 博导, 主要从事油气开采与储层改造理论与技术方面研究工作。E-mail: guojianchun@vip.163.com
通讯作者: 李根, 男, 1992年生, 硕士研究生, 主要从事油气田开发的工作。E-mail: 491083452@qq.com

裂缝的形成减小了水平最大和最小主应力的差异,从而可通过裂缝间的应力干扰来增强压裂改造裂缝网络的复杂性^[6]。

本文假定地层为均质线弹性体,采用二维位移不连续法建立裂缝周围诱导应力场分布数学模型,考虑非均匀裂缝净压力分布条件,通过水平应力差异系数对顺序压裂和交替压裂两种不同分段压裂方式下的裂缝间距进行优化研究。

体积压裂是伴随页岩气开发的一门新兴技术,采用水平井分段压裂模式最大限度的提高储层改造体积。本文从诱导应力场的角度出发,探讨不同分段压裂工艺下裂缝参数(裂缝半长、裂缝条数)对应力差异系数的影响,分析形成复杂网络裂缝的最佳段间距,对工程实践具有一定的指导意义。

2 裂缝间距优化模型

对页岩气进行水平井分段压裂时,已经压开的裂缝所产生的诱导应力会影响水平井周围岩石应力场的分布,从而对下一段裂缝的起裂造成影响。

2.1 诱导应力数学模型

运用位移不连续法建立诱导应力场分布数学模型^[7-11]。

如图1所示,考虑直角坐标系中各向同性线弹性体内部的一个长度为 $2a$ 的裂缝单元,单元上、下两个裂缝面的位移量分别用 $u(x, 0_+)$ 和 $u(x, 0_-)$ 表示,裂缝面之间的切向和法向位移分别为 D_x 和 D_y 。

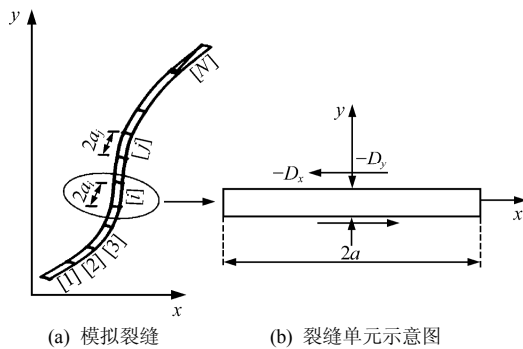


图1 二维位移不连续单元

Fig.1 Two-dimensional displacement discontinuity element

$$D_x = u_x(x, 0_-) - u_x(x, 0_+) \quad (1)$$

$$D_y = u_y(x, 0_-) - u_y(x, 0_+) \quad (2)$$

$$u_x = D_x [2(1-\nu)f'_y - yf''_{xx}] - D_y [(1-2\nu)f'_x + yf''_{xy}] \quad (3)$$

$$u_y = D_x [(1-2\nu)f'_x - yf''_{xy}] + D_y [2(1-\nu)f'_y + yf''_{yy}] \quad (4)$$

式中: ν 为岩石的泊松比(无因次); u_x 和 u_y 分别为裂缝单元的水平 and 垂直位移。

$$f'_x = c \left\{ \ln[(x-a)^2 + y^2]^{1/2} - \ln[(x+a)^2 + y^2]^{1/2} \right\} \quad (5)$$

$$f'_y = -c \left[\arctan \frac{y}{x-a} - \arctan \frac{y}{x+a} \right] \quad (6)$$

$$f''_{xx} = c \left[\frac{x-a}{(x-a)^2 + y^2} - \frac{x+a}{(x+a)^2 + y^2} \right] \quad (7)$$

$$f''_{xy} = c \left[\frac{y}{(x-a)^2 + y^2} - \frac{y}{(x+a)^2 + y^2} \right] \quad (8)$$

$$f''_{yy} = -c \left[\frac{x-a}{(x-a)^2 + y^2} - \frac{x+a}{(x+a)^2 + y^2} \right] \quad (9)$$

$$c = \frac{1}{4\pi(1-\nu)} \quad (10)$$

函数 $f(x, y)$ 的表达式为

$$\begin{aligned} f(x, y) = & \frac{-1}{4\pi(1-\nu)} \int_{-l}^l \ln[(x-\eta)^2 + y^2]^{1/2} d\eta = \\ & -\frac{1}{4\pi(1-\nu)} \left[y \left(\arctan \frac{y}{x-a} - \arctan \frac{y}{x+a} \right) - \right. \\ & (x-l) \ln \sqrt{(x-a)^2 + y^2} + \\ & \left. (x+a) \ln \sqrt{(x+a)^2 + y^2} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

将裂缝分隔为 N 个位移不连续单元,根据线性叠加原理,裂缝对地层中任意一点 i 的诱导应力为

$$\sigma_x^i = \sum_{j=1}^N C_{xy}^{ij} D_y^j + \sum_{j=1}^N C_{xx}^{ij} D_x^j \quad (12)$$

$$\sigma_y^i = \sum_{j=1}^N C_{yy}^{ij} D_y^j + \sum_{j=1}^N C_{yx}^{ij} D_x^j \quad (13)$$

式中: C_{yy}^{ij} 、 C_{yx}^{ij} 、 C_{xy}^{ij} 、 C_{xx}^{ij} 为边界影响系数,其表达式分别为

$$C_{xx}^{ij} = 2G(-f''_{xx} - yf''_{yy}) \quad (14)$$

$$C_{xy}^{ij} = -2Gyf''_{xy} \quad (15)$$

$$C_{yx}^{ij} = -2Gyf''_{xy} \quad (16)$$

$$C_{yy}^{ij} = 2G(-f''_{xx} - yf''_{yy}) \quad (17)$$

式中: G 为岩石剪切模量(MPa);局部坐标系中 x 和 y 的表达式为

$$\bar{x} = (y_i - y_j) \quad (18)$$

$$\bar{y} = -(x_i - x_j) \quad (19)$$

2.2 缝网压裂的力学条件

水平主应力的差异性页岩气压裂形成复杂缝网的重要力学因素。地层中水平主应力差异性越小, 越有利于形成复杂的裂缝网络, 而评价水平主应力差异性的参数是水平应力差异系数 ξ , 其定义为^[12-13]

$$\xi = \frac{(\sigma_H + \sigma'_H) - (\sigma_h + \sigma'_h)}{\sigma_h + \sigma'_h} \quad (20)$$

式中: σ_H 和 σ_h 为地层原始水平最大和最小主应力 (MPa); σ'_H 和 σ'_h 为裂缝对地层的诱导应力 (MPa)。研究表明, 水平地应力差异系数 ξ 越小, 越有利于形成缝网体系, 当 $\xi > 0.25$ 时, 则形成缝网体系比较困难^[14]。

2.3 应力边界条件

由于压裂液对裂缝内部施加非均匀的压力作用, 应力边界条件可以表示为

$$\sigma_s^i = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (21)$$

$$\sigma_n^i = -p_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (22)$$

式中: p_i 为任意裂缝单元内部的净压力, 可表示为^[15]

$$p_i = p_0 \left(1 - \frac{x_i}{L_f} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (23)$$

式中: p_0 为裂缝缝口处的净压力 (MPa); x_i 为裂缝单元的位置 (m); L_f 为裂缝半长 (m)。

缝内净压力与裂缝半长呈现负相关的非线性关系; 在裂缝端部位置, 其净压力下降梯度较大 (见图 2)。

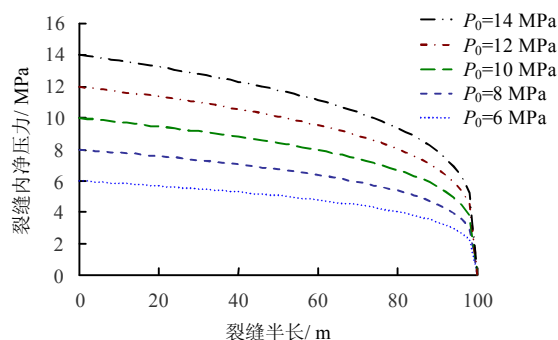


图 2 裂缝内部净压力分布曲线 ($L_f=100$ m)
Fig.2 Curves of fracture net pressure distribution ($L_f=100$ m)

2.4 模型求解

采用位移不连续法进行页岩气缝网压裂裂缝间距优化研究具体求解步骤如下:

- (1) 设定储层参数及初始裂缝参数;
- (2) 划分裂缝单元;
- (3) 通过边界条件建立响应矩阵, 求解边界影响系数;
- (4) 计算单元位移不连续量;
- (5) 计算裂缝单元对任意点的影响系数, 并求解诱导应力;
- (6) 计算水平应力差异系数。

3 顺序压裂裂缝间距优化

页岩水平井分段压裂的压裂方式很多, 现对顺序压裂裂缝间距进行优化研究。假定水平井段平行于最小主应力方向, 根据最大拉应力原理裂缝应沿着最大主应力方向延伸, 即垂直于水平井筒。

顺序压裂是水平井分段压裂最常用的方式, 见图 3 所示, 从水平井的末端开始先压开一条裂缝, 然后顺序向前逐级压裂。

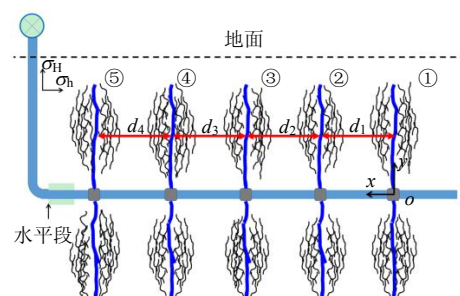


图 3 顺序压裂示意图
Fig.3 Diagram of consecutive multi-stage hydraulic fracturing

初始裂缝形成后, 受诱导应力的影响, 裂缝周围地应力分布如图 4、5 所示, 具体计算数据详见表 1。

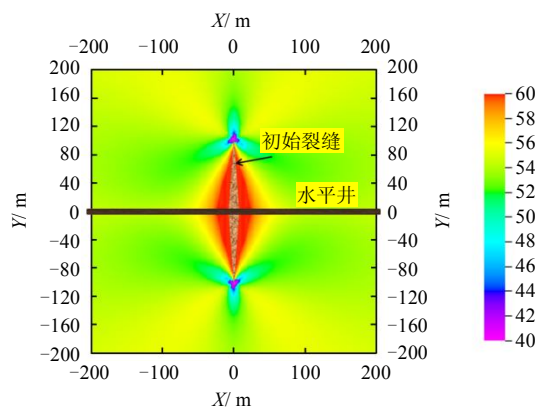


图 4 裂缝周围水平最大主应力分布
Fig.4 Distribution of the maximum principal stress around crack

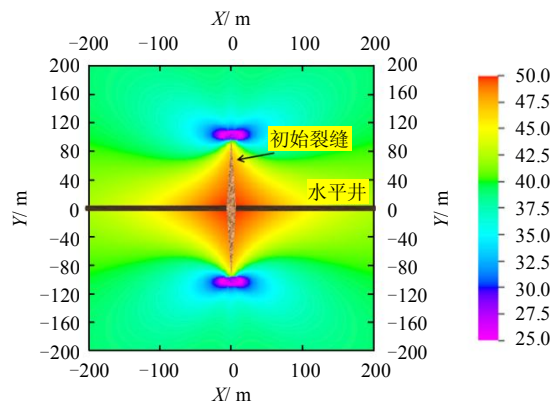


图5 裂缝周围水平最小主应力分布

Fig.5 The minimum principal stress distribution around the crack

表1 计算基本数据表

Table 1 Basic parameters for calculation

水平最大 主应力 /MPa	水平最小 主应力 /MPa	裂缝 半长 /m	弹性 模量 /GPa	泊松比	裂缝 净压力 /MPa
55	40	100	28	0.25	10

裂缝尖端存在应力集中现象,且裂缝周围水平应力均有不同程度的增加,裂缝对最小主应力的影响范围较大。

3.1 初始裂缝对水平应力差异系数影响研究

初始裂缝内部净压力大小、裂缝长度以及原始地层应力状态都会影响水平应力差异系数,见图6。

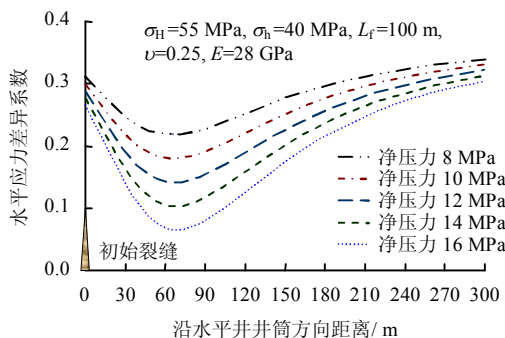


图6 水平应力差异系数与裂缝净压力关系曲线

Fig.6 Curves of horizontal stress difference coefficient with different fracture net pressures

图6给出了水平应力差异系数与裂缝静压力的关系,由图可知,随着与初始裂缝距离的增加,水平应力差异系数呈现先减小后增大的规律,在沿水平井并筒方向,存在一个最佳的间距区间,在此区间内水平应力差异系数较小,有利于裂缝网络的形成。同时,裂缝内部净压力越高,应力差异系数越小,因此,压裂时保持裂缝内部高净压力有利于下

一条裂缝形成更复杂的网络。

图7给出了水平应力差异系数与裂缝半长的关系曲线。由图可知,随着与初始裂缝距离的增加,水平应力差异系数呈现先减小后增大的规律,且初始裂缝半长越小,水平应力差异系数达到最低值时与初始裂缝的间距越小,但是一旦超过最低值,随着与初始裂缝间距的增加,水平应力差异系数升高得越快。

图8给出了水平应力差异系数与原地应力关系曲线,由图可知,受原地应力场的影响,当最小水平主应力不变时,随着应力差值的增加,水平应力差异系数大幅增加;当水平应力差值不变时,减小最小水平主应力,水平应力差异系数增大,但幅度较小。

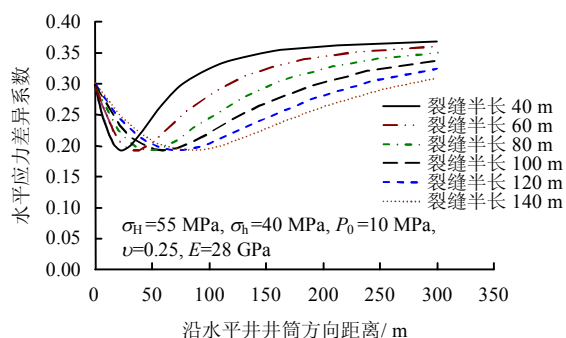


图7 水平应力差异系数与裂缝半长关系曲线

Fig.7 Curves of horizontal stress difference coefficient with different fracture half-lengths

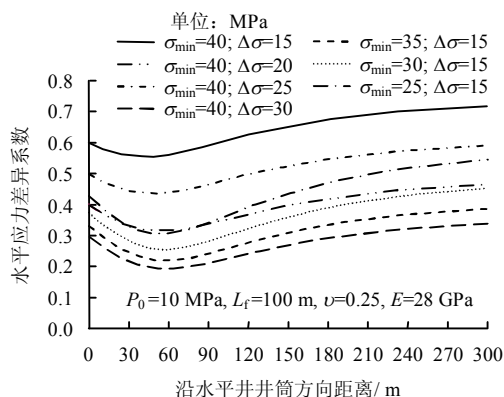


图8 水平应力差异系数与原地应力关系曲线

Fig.8 Curves of horizontal stress difference coefficient with different in-situ stresses

3.2 裂缝间距优化

当第1条裂缝压开后(见图9),产生的诱导应力会改变原始地应力场的分布。为了使后续裂缝形成更加复杂的裂缝网络,需要对第2条裂缝的起裂位置进行优化研究。

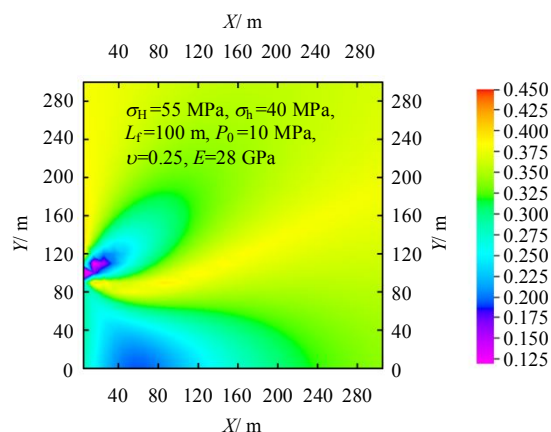


图 9 压开一条裂缝时水平应力差异系数分布
Fig.9 Differential coefficient distribution of horizontal stress when opening a crack

沿水平井井筒方向由于初始裂缝诱导应力的影响, 存在有利于裂缝网络形成的最佳区间, 在本文的储层参数和裂缝参数下, 此区间为 40~80 m。

当 $x=60$ m 时, 水平应力差异系数最小, 所以选择此处为第 2 条裂缝起裂位置 (见图 9), 进行第 3 条裂缝起裂位置优化研究。

受到前两条裂缝对地层应力场的影响, 沿井筒方向随着与第 2 条裂缝距离的增加, 水平应力差异系数同样呈现先减小后增加的规律 (见图 10), 但其最小值比两条裂缝间水平应力差异系数的最小值还小, 更有利于复杂裂缝网络的形成。

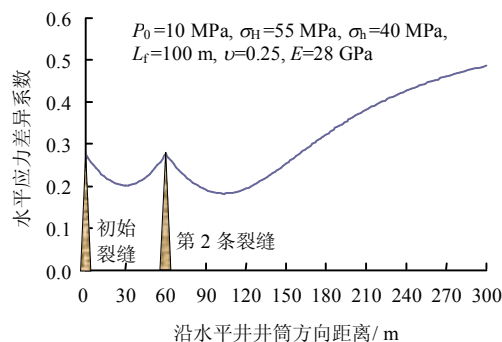


图 10 压开 2 条裂缝时水平应力差异系数分布曲线
Fig.10 Distribution curve of horizontal stress difference coefficient of 2 cracks

综合分析图 10、11 可知, 当两条裂缝半长均为 100 m 且裂缝间距为 60 m 时, 为形成复杂缝网, 第 3 条裂缝起裂的有利区间是 80~140 m, 最佳位置是 100 m 处。

所以, 对于顺序压裂方式而言, 考虑裂缝半长、裂缝内压力以及原地应力场等影响因素下, 依次递

减的裂缝间距比等间距分段压裂更有利于复杂裂缝网络的形成。

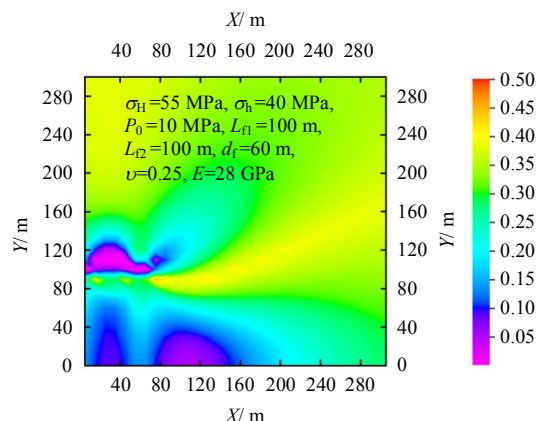


图 11 压开两条裂缝时水平应力差异系数分布
Fig.11 Distribution of horizontal stress difference coefficient in two cracks

4 交替压裂裂缝间距优化

交替压裂作为水平井分段压裂的一种方式 (见图 12), 在页岩气增产改造中也同样适用^[16]。

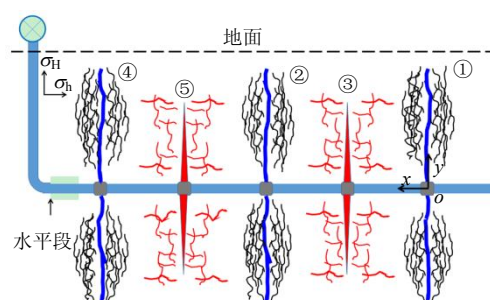


图 12 交替压裂示意图
Fig.12 Diagram of alternate multi-stage hydraulic fracturing

交替压裂目的是在两条间距较远、相互干扰较弱的裂缝间压开一条裂缝, 使其形成更为复杂的裂缝网络, 见图 12, 但这主要受控于裂缝间的诱导应力场, 需要对交替压裂裂缝间距进行优化研究。

图 13 给出了水平应力差异系数与裂缝间距关系曲线, 由图可知, 两条裂缝间的水平应力差异系数存在极小值, 此处即为第 3 条裂缝起裂的最佳位置。随着两条裂缝间距的减小, 水平应力差异系数的极小值越小, 对裂缝网络的形成越有利。但两条裂缝间距越小, 相互干扰越强, 会使得水平主应力发生反转, 从而造成在水平应力差异系数极小值处压开的裂缝转向到沿着水平井筒方向延伸, 对裂缝网络的形成不利。

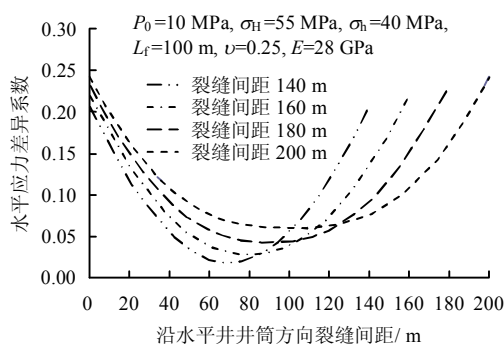


图 13 水平应力差异系数与裂缝间距关系曲线

Fig.13 Curves of horizontal stress difference coefficient with different fracture spaces

图 14 给出了压开两条裂缝后水平应力差异系数分布图, 由图可知, 在此储层参数和裂缝参数条件下, 两条裂缝间距为 180 m 对中间裂缝形成裂缝网络最有利。

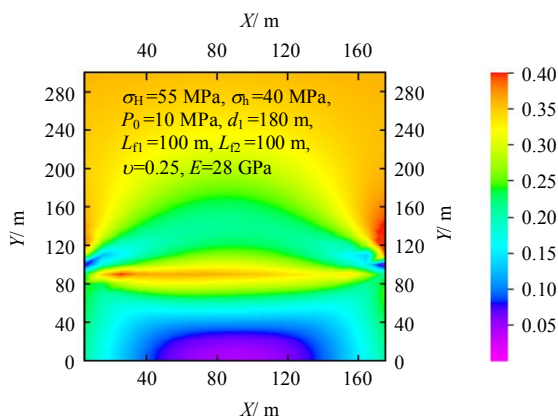


图 14 压开两条裂缝后水平应力差异系数分布图

Fig.14 Distribution of horizontal stress difference coefficient after two cracks

图 15 给出了压开 3 条裂缝后水平应力差异系数分布曲线, 由图可知, 由于压开裂缝对地应力场的影响, 后续裂缝间距减小会使得水平应力差异系数小于 0, 水平最大主应力和最小主应力会发生反转。

图 16 给出了水平应力差异系数的分布云图, 由图可知, 交替压裂两条裂缝间存在一个水平应力差异系数较小的区间。裂缝间距过大, 水平应力差异系数不足以使中间裂缝形成裂缝网络; 裂缝间距过小, 水平应力差异系数变成负值, 主应力方向发生反转, 裂缝沿水平井井筒方向延伸。

所以, 交替压裂裂缝间距存在一个最优位置, 使得在两条裂缝间距的中部压裂的裂缝能形成缝网, 在本储层参数和裂缝参数下, 交替压裂裂缝间距为 180 m, 可进行等间距压裂。

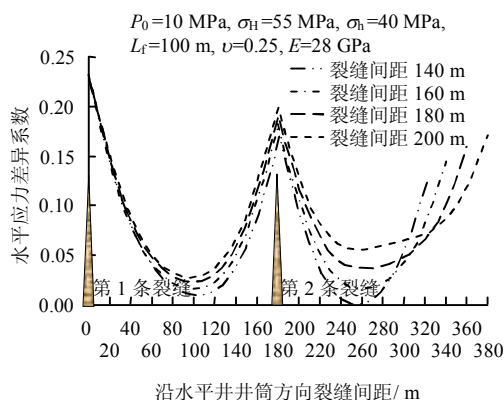


图 15 压开 3 条裂缝后水平应力差异系数分布曲线

Fig.15 Distribution curves of horizontal stress difference coefficient after 3 cracks

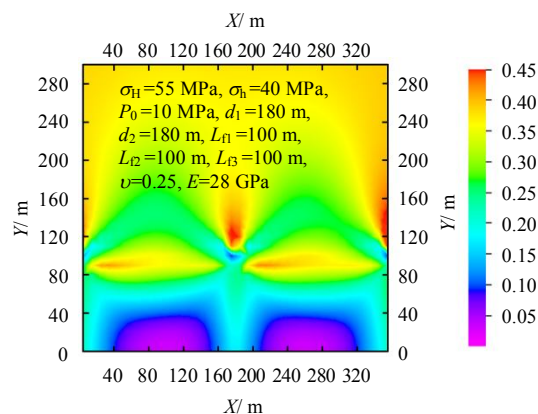


图 16 压开 3 条裂缝后水平应力差异系数分布云图

Fig.16 Distribution nephogram of horizontal stress difference coefficient after three cracks

5 结 论

(1) 页岩储层水平井分段压裂、顺序压裂方式下为形成复杂裂缝网络, 应充分利用前一段裂缝对地应力场的影响, 裂缝间距不宜过大, 且存在形成复杂缝网的最优位置。随着裂缝条数的增加, 后续压裂裂缝间距应适当减小。

(2) 交替压裂方式下, 为避免两条裂缝中间部分区域发生应力反转, 为缝网压裂创造条件, 裂缝间距不宜过小, 但又不能太大, 存在一个最优位置使得两条裂缝中间压开的裂缝能形成复杂缝网。与顺序压裂方式相比, 交替压裂方式下裂缝间更大。

(3) 裂缝内部净压力、裂缝缝长及原始地应力大小都可以影响水平应力差异系数, 从而影响裂缝间距的优化。裂缝内部净压力越大, 对形成缝网越有利; 裂缝缝长越长, 所需裂缝间距越大; 原始水平最大、最小主应力差值过大, 压裂过程中形成缝网的可能性较小。

参 考 文 献

- [1] 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.
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.
- [2] WATERS G, DEAN B, DOWNIE R, et al. Simultaneous hydraulic fracturing of adjacent horizontal wells in the Woodford shale[C]//Hydraulic Fracturing Technology Conference. New York: SPE, 2009.
- [3] HOSSAIN M M, RAHMAN M K, RAHMAN S S. Volumetric growth and hydraulic conductivity of naturally fractured reservoirs during hydraulic fracturing: a case study using Australian conditions[C]//Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. New York: SPE, 2007.
- [4] ROUSSEL N P, SHARMA M M. Strategies to minimize frac spacing and stimulate natural fractures in horizontal completions[C]//Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado: SPE, 2011.
- [5] SRIMOYEE B, MICHAEL N. Optimal fracture spacing and stimulation design for horizontal wells in unconventional gas reservoirs[C]//Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado: SPE, 2011.
- [6] SOLIMAN M Y, EAST L, ADAMS D. Geomechanics aspects of multiple fracturing of horizontal and vertical wells[J]. **Drilling and Completion**, 2008, 23(3): 217—228.
- [7] JOSEPH P M, STEPHEN C B. An efficient displacement discontinuity method using multipole techniques[J]. **Pacific Rocks**, 2000, 959—966.
- [8] NAGEL N B, NAGEL M S. Stress shadowing and micro-seismic events: A number evaluation[R]//the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado: SPE, 2011.
- [9] 王飞. 位移不连续法及在岩体工程中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
WANG Fei. Displacement discontinuity method and its application in rock engineering[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.
- [10] 朱合华. 边界元法及其在岩土工程中的应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
ZHU He-Hua. The boundary element method and its application in the geotechnical engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.
- [11] WU Kan, JON E O. Simultaneous multifracture treatments: Fully coupled fluid flow and fracture mechanics for horizontal wells[J]. **SPE Journal**, 2014, 1—10.
- [12] BEUGELSDIJK. Experimental hydraulic fracture propagation in a multi-fractured medium[C]//Asia Pacific Conference on Integrated Modeling for Asset Management. Yokohama, Japan: SPE, 2000.
- [13] 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): 1590—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): 1590—1596.
- [14] SHARM A, CHEN H Y, TEUFEL L W. Flow-Induced Stress Distribution in a Multi-rate and Multi-well Reservoir[C]//the 1996 SPE Rocky Mountain Regional/Low Permeability Reservoirs Symposium and Exhibition. Denver, Colorado: SPE, 1995.
- [15] CHENG Y. Boundary element analysis of the stress distribution around multiple fractures: implications for the spacing of perforation clusters of hydraulically fractured horizontal wells[C]//the 2009 SPE Eastern Regional Meeting. Charleston, West Virginia: SPE, 2009.
- [16] SOLIMAN M Y, EAST L, JODY A. Fracturing design aimed at enhancing fracture complexity[C]//the SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition. Barcelona, Spain: SPE, 2010.
- [17] HYUNIL J. Optimal fracture spacing of a hydraulically fractured horizontal wellbore to induce complex fractures in a reservoir under high in-situ stress anisotropy[C]//the International Petroleum Technology Conference. Beijing, China: SPE, 2013.
- [18] 刘洪, 胡永全, 赵金洲, 等. 重复压裂气井诱导应力场模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4022—4027.
LIU Hong, HU Yong-quan, ZHAO Jin-zhou, et al. Simulation study of induced stress field in re-fracturing gas well[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(23): 4022—4027.
- [19] 赵金洲, 任岚, 胡永全. 页岩储层压裂缝成网延伸的受控因素分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(1): 1—9.
ZHAO Jin-zhou, REN Lan, HU Yong-quan. Controlling factors of hydraulic fractures extending into network in shale formations[J]. **Journal of Southwest Petroleum University(Science and Technology)**, 2013, 35(1): 1—9.
- [20] NICOLAS P R, MUKUL M S. Optimizing fracture spacing and sequencing in horizontal-well fracturing[J]. **SPE Production & Operations**, 2011, 173—184.