

# 水平井分段多簇压裂缝间干扰影响分析

赵金洲<sup>1</sup>, 陈曦宇<sup>1</sup>, 刘长宇<sup>1</sup>, 李勇明<sup>1</sup>, 李 晖<sup>2</sup>, 曹学军<sup>2</sup>

(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. 中国石化西南石油工程有限公司井下作业处, 四川 德阳 618000)

**摘要:**水平井分段多簇压裂在低渗透油气藏开发中发挥了巨大作用。为进一步提升油气产量, 压裂段、簇数近年不断增加, 同时也加剧了缝间干扰问题。合理利用裂缝产生的诱导应力干扰能够促使裂缝网络形成, 使得储层改造体积增大。但是过高的诱导应力干扰也可能导致裂缝起裂困难, 甚至造成裂缝砂堵, 所以应当对缝间干扰问题进行相关研究。对此, 采用位移不连续法建立了研究多簇裂缝诱导应力的数学模型, 从局部应力场改变、起裂压力、裂缝宽度多方面研究了缝间干扰对分段多簇压裂造成的影响。模拟结果表明, 诱导应力会导致局部区域水平主应力差异下降、破裂压力陡升、裂缝宽度下降等。分析显示, 分段多簇压裂在利用诱导应力促进缝网形成的同时, 也需要防止其对施工造成困难。研究结论对水平井分段多簇压裂具有指导意义。

**关键词:**位移不连续法; 缝间干扰; 诱导应力; 多簇压裂; 裂缝宽度

**中图分类号:** TE34

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-1926(2015)03-0533-06

**引用格式:** Zhao Jinzhou, Chen Xiyu, Liu Changyu, *et al.* The analysis of crack interaction in multi-stage horizontal fracturing[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(3): 533-538. [赵金洲, 陈曦宇, 刘长宇, 等. 水平井分段多簇压裂缝间干扰影响分析[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(3): 533-538.]

## 0 引言

随着水力压裂工艺技术的高速发展, 水平井分段多簇压裂在低渗透油气藏开发中发挥了巨大作用。Meyerhofer 等<sup>[1]</sup>指出, 储层的改造体积将显著影响低渗透储层增产效果。为进一步提高储层改造体积, 水平井压裂段、簇数不断增加, 油气产量得到显著提升。不断增加的压裂段、簇数加剧了缝间干扰问题, 对此 East 等<sup>[2]</sup>提出合理利用裂缝产生的诱导应力来促进裂缝网络形成, 使得改造体积得到有效提高。但是, 过高的诱导应力干扰可能使裂缝起裂困难, 甚至造成裂缝砂堵。

为了能够更好地利用缝间干扰, 国内外学者进行了许多相关研究。王伯军等<sup>[3]</sup>建立不同裂缝缝长及分布关系的模型, 研究了斜井压裂过程中的缝间干

扰力学机理。赵金洲等<sup>[4]</sup>在考虑天然裂缝闭合程度的情况下, 基于弹性力学及断裂力学理论建立水力裂缝逼近天然裂缝时裂缝面的应力场模型, 分析了水力裂缝干扰天然裂缝的稳定性问题。Olson 等<sup>[5]</sup>建立水平井分段压裂的数学模型, 研究其裂缝间产生的相互干扰影响。Ajani 等<sup>[6]</sup>根据大量水平压裂井数据进行统计分析, 以研究页岩储层压裂中普遍存在的干扰问题。本文采用位移不连续法建立分析缝间干扰的数学模型, 研究了缝间干扰对水平井分段多簇压裂施工的影响, 对优化分段多簇压裂设计具有指导意义。

## 1 数学模型建立

地层中广泛存在断层、裂缝等不连续面, 这也使得采用弹性力学求解其应力及应变问题变得更加复

收稿日期: 2014-08-03; 修回日期: 2014-03-19.

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 51344005); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(编号: 2013CB228004); 国家科技重大专项(编号: 2011ZX05014-006)联合资助.

作者简介: 赵金洲(1962-), 男, 湖北仙桃人, 教授, 博士生导师, 主要从事油气藏压裂酸化工程技术方面的基础理论及应用技术研究.

E-mail: zhaojz@swpu.edu.cn.

杂。对此,Crouch<sup>[7]</sup>提出了一种被称为位移不连续法的间接边界元法,用于解决带有裂纹的弹性介质中的力学问题。考虑地层中存在一条半长为  $a$  的裂缝单元,裂缝的 2 个相对面间存在一个常位移量(图 1)。 $u(x, 0_+)$  及  $u(x, 0_-)$  分别代表图 1 中裂缝上、下 2 面的位移量,而  $D$  表示该裂缝单元 2 个面间的位移不连续量,它们之间的关系见式 1。

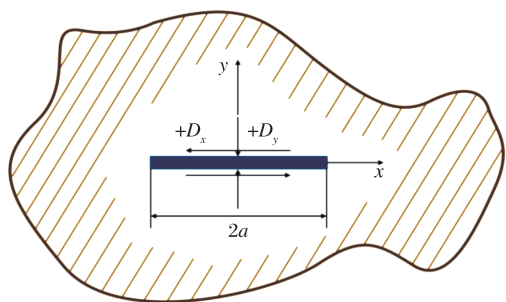


图 1 位移不连续裂缝单元

Fig. 1 The fracture element of displacement discontinuity

$$\begin{cases} D_x = u_x(x, 0_-) - u_x(x, 0_+) \\ D_y = u_y(x, 0_-) - u_y(x, 0_+) \end{cases} \quad (1)$$

设问题为平面应变,式中: $u_x$ 、 $u_y$  分别取  $x$ 、 $y$  轴正方向为正值。图 1 所示单元对整个区域应力及位移解可由  $D$  表示为:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = 2GD_x[2f_{,xy} + yf_{,xxy}] + 2GD_y[f_{,yy} + yf_{,yyy}] \\ \sigma_{yy} = 2GD_x[-yf_{,xyy}] + 2GD_y[f_{,yy} - yf_{,yyy}] \\ \sigma_{xy} = 2GD_x[f_{,xy} + yf_{,xyy}] + 2GD_y[-yf_{,xyy}] \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_x = D_x[2(1-\nu)f_{,y} - yf_{,xx}] + D_y[-(1-2\nu)f_{,x} - yf_{,xy}] \\ u_y = D_x[(1-2\nu)f_{,x} - yf_{,xy}] + D_y[2(1-\nu)f_{,y} - yf_{,yy}] \end{cases} \quad (3)$$

式(2)、式(3)中  $G$  为地层岩石的剪切模量,  $f_{,x}$ 、 $f_{,xy}$ 、 $f_{,xxy}$  等均为下式(式 4)的偏导数<sup>[7]</sup>。

$$f(x, y) = \frac{-1}{4\pi(1-\nu)} \int_{-a}^a \text{Ln}[(x-\xi)^2 + y^2]^{0.5} d\xi \quad (4)$$

对于复杂的实际情况,仅仅单个常位移量裂缝单元无法满足应用。对于水力压裂裂缝来说,其缝内压力是变化的,裂缝 2 个相对面间的位移量也是变化的。将裂缝离散成  $N$  个裂缝单元,每个裂缝单元的位移量、应力等均可以近似看作常数。离散后的裂缝对整个区域的应力及位移影响可以由每个单

元的影响叠加获得。随着单元数  $N$  的增加,计算值将逐渐逼近精确值。对于任意  $i$  处的应力及位移可由式(5)及式(6)获得:

$$\begin{cases} \sigma_{xx}^i = \sum_{j=1}^N A_{xx}^{i,j} G^{i,j} D_x^j + \sum_{j=1}^N A_{xy}^{i,j} G^{i,j} D_y^j \\ \sigma_{yy}^i = \sum_{j=1}^N A_{yx}^{i,j} G^{i,j} D_x^j + \sum_{j=1}^N A_{yy}^{i,j} G^{i,j} D_y^j \\ \sigma_{xy}^i = \sum_{j=1}^N A_{xx}^{i,j} G^{i,j} D_x^j + \sum_{j=1}^N A_{xy}^{i,j} G^{i,j} D_y^j \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_x^i = \sum_{j=1}^N B_{xx}^{i,j} D_x^j + \sum_{j=1}^N B_{xy}^{i,j} D_y^j \\ u_y^i = \sum_{j=1}^N B_{yx}^{i,j} D_x^j + \sum_{j=1}^N B_{yy}^{i,j} D_y^j \end{cases} \quad (6)$$

系数  $A^{i,j}$ 、 $B^{i,j}$  分别为第  $j$  个单元的位移不连续量对  $i$  处应力、位移的影响系数,由式(2)、式(3)及  $i$ 、 $j$  的位置求得<sup>[8]</sup>。 $G^{i,j}$  为 Olosn<sup>[9]</sup> 提出的三维修正因子[式(7)],修正平面应变假设带来的误差。

$$G^{i,j} = 1 - \frac{d_{ij}^2}{[d_{ij}^2 + (H/\alpha)^2]^{\beta/2}} \quad (7)$$

式(7)中: $d_{ij}$  为  $i$  处与  $j$  单元之间的距离; $H$  为裂缝高度; $\alpha$  取值 2; $\beta$  取值 3。

对于水力压裂裂缝来说,裂缝单元的  $\sigma_{yy}$  即是该单元处的缝内净压力,而裂缝单元自身的  $\sigma_{xy}$  为 0。对于 PKN 模型,缝内压降满足如下关系式:

$$\Delta p \propto \frac{\Delta L}{w^3} \quad (8)$$

而裂缝的宽度可以表示为:

$$w = \frac{(1-\nu)H\Delta p}{G} \quad (9)$$

因此,压降与距离有如下一个近似关系<sup>[10]</sup>:

$$\Delta p \propto \Delta L^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

如果已知裂缝缝口净压力以及裂缝尖端净压力,则可以根据式(10)得到近似的缝内净压力分布。当已知离散后  $N$  个裂缝单元的净压力,则可由式(5)求得裂缝单元的位移不连续量  $D_x$ 、 $D_y$ ,并据此求解出整个区域的应力及位移。

## 2 实例计算分析

基于四川低渗透区块 Y 水平井参数(表 1)建立数学模型,分析缝间干扰对水平井分段多簇压裂的影响。

对区块水平井进行分段压裂,三簇压裂后形成 3 条主裂缝,分析诱导应力对随后压裂裂缝的影响。

将整个 Y 水平井压裂区域离散成网格单元以计算缝间干扰[图 2(a)]。此外,类似建立相邻水平井 2 条平行交错的压裂裂缝模型,研究邻井干扰造成的影响[图 2(b)]。

表 1 区域基本参数  
Table 1 The parameter of zone

参数	值
水平最大主应力( $\sigma_H$ )/MPa	33.4
水平最小主应力( $\sigma_h$ )/MPa	29.9
垂向应力( $\sigma_v$ )/MPa	38.3
岩石抗张强度( $\sigma_t$ )/MPa	4
储层厚度( $h$ )/m	30
孔隙度( $\varphi$ )/%	0.099
泊松比( $\nu$ )	0.21
杨氏模量( $E$ )/GPa	21.3
缝口净压力( $P_{net}$ )/MPa	3.5
压裂裂缝半长( $L$ )/m	120
裂缝间距( $d$ )/m	30

图 3 为 3 条压裂裂缝诱导应力引起的原水平应力场变化[模型为图 2(a)],横纵坐标均是区域平面位置坐标,单位为 m。应力变化大小由颜色表示,取压应力为正值。

图 3 表明,区域原水平最小主应力沿井筒方向较大区域内将会上升,距离裂缝较近区域甚至提高 2MPa 以上。当沿着 Y 水平井压裂次序依次压裂时(图 3 中红色箭头,从南往北),先形成的水力裂缝会使得随后压裂裂缝(图 3 中红色虚线)左翼区域应力下降,即指诱导应力会在该裂缝左翼产生拉张作用,相反其右翼区域会受到挤压应力作用。诱导应力使得裂缝左翼延伸所需缝内净压力更小。因此可以预见,整个 Y 水平井压裂过程中裂缝的左翼将更容易延伸。对于区域原最大主应力,应力上升区域主要集中在压裂裂缝的部分外边缘,其上升范围明显小于水平最小主应力。此外,沿井筒方向的局部区域最大主应力略有下降。

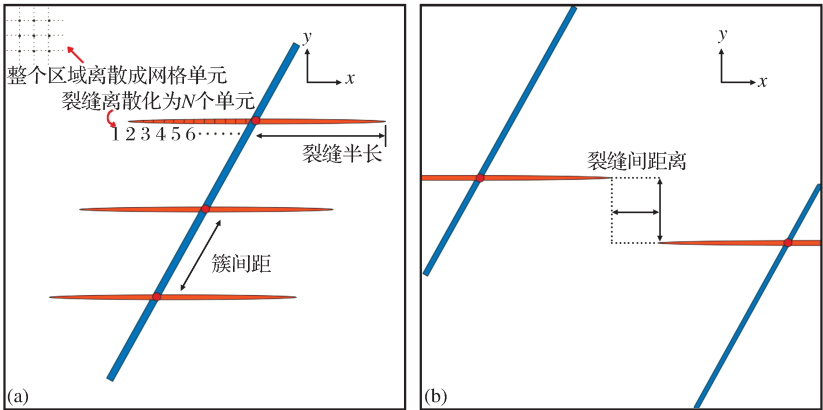


图 2 模型建立示意  
Fig. 2 The diagram of model

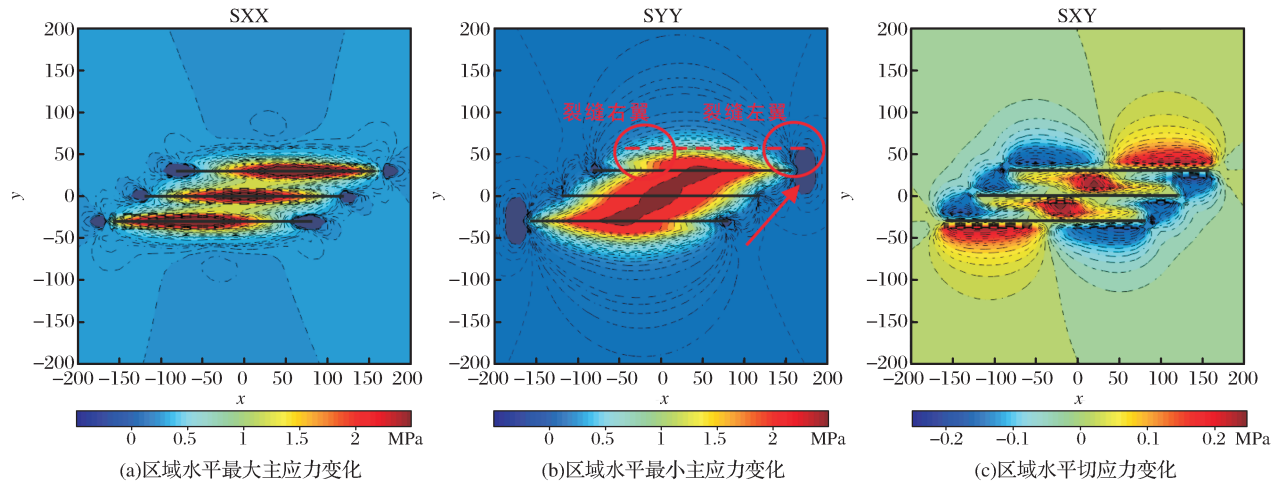


图 3 压裂裂缝引起应力场变化

Fig. 3 The stress field changes of fracture induced

需要注意,切应力的正负号代表着应力方向,而非应力数值的正负。在压裂过程中,裂缝尖端两侧切应力显著上升,而地层中天然裂缝、微裂隙等结构弱面在剪切力的作用下发生滑移破裂,这使得压裂段两侧较容易形成剪切破裂裂缝带,从而有助于形成复杂的裂缝网络。

地层水平主应力差异大小关系着压裂后能否形成复杂有效的裂缝网络。较低的水平应力差使得天然裂缝、裂隙更容易被水力裂缝所连通,导致水力裂缝延伸过程中转向及分叉。诱导应力使得区域水平主应力大小及方向改变,有效利用诱导应力降低局部水平主应力差是促成裂缝网络非常有效的方法。图 4 是裂缝诱导应力引起的区域水平主应力差下降值。先压裂裂缝的诱导应力会产生较为明显的应力差下降,距离压裂段边缘裂缝 50m 以内区域水平应力差下降约为 0.5~2MPa(图 4 中 a 区域),这使得范围内相邻压裂段将会更加容易形成裂缝网络。

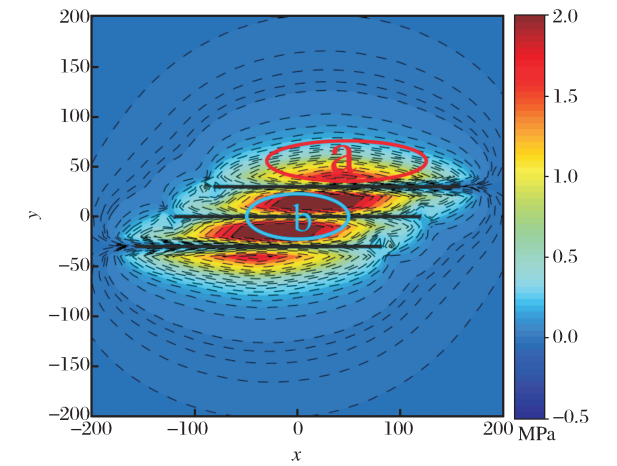


图 4 水平主应力差变化值

Y 水平井的最终压裂微地震监测图及数据见图 5 及表 2。一方面,多段压裂裂缝在诱导应力的作用下形成一定宽度的裂缝带;另一方面,监测数据显示除第四级第一簇及第五级以外,裂缝左翼动态长度较明显超过右翼动态长度,这证明之前模型分析得出的结论:Y 井压裂裂缝左翼侧将受到应力干扰而延伸更长。

进行分段多簇压裂时,压裂段内诱导应力作用异常显著(图 4 中 b 区域)。可以预见,在实际压裂过程中,段内多簇裂缝不可能同时破裂。其中破裂压力较低而物性较好的地方将优先破裂延伸,较大的诱导应力将对邻近的射孔簇起裂造成影响。一方面,段内后起裂的裂缝将会更加容易转向、分叉,从

而使得裂缝形态变得复杂;另一方面,诱导应力迫使后起裂处起裂压力陡升,可能造成起裂困难。

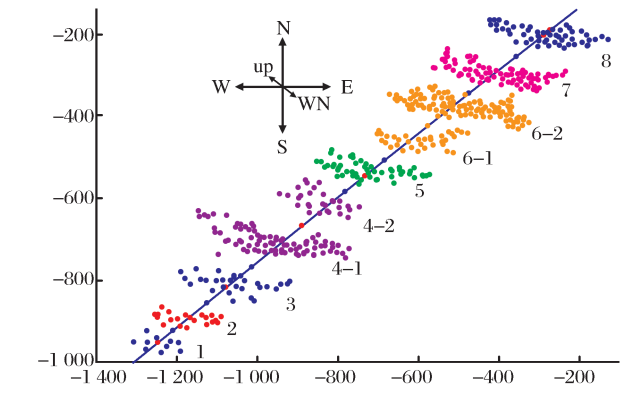


图 5 Y 水平井微地震裂缝监测

Fig. 5 Microseismic monitoring of the Y horizontal well

表 2 微地震裂缝监测结果

Table 2 The results of microseismic monitoring			
序号	右翼动态长度/m	左翼动态长度/m	走向
第一级压裂	61	72	NE87°
第二级压裂	85	95	NE90°
第三级压裂	141	160	NE92°
第四级压裂	第一簇 210	183	NE96°
	第二簇 96	100	NE100°
第五级压裂	145	140	NE95°
第六级压裂	第一簇 96	130	NE88°
	第二簇 160	184	NE100°
第七级压裂	144	163	NE97°
第八级压裂	141	158	NE98°

采用最大张应力破裂准则,根据区块数据计算获得考虑缝间干扰的破裂压力<sup>[11]</sup>(图 6)。先破裂裂缝与相邻起裂裂缝的距离越近,其破裂压力越高。当

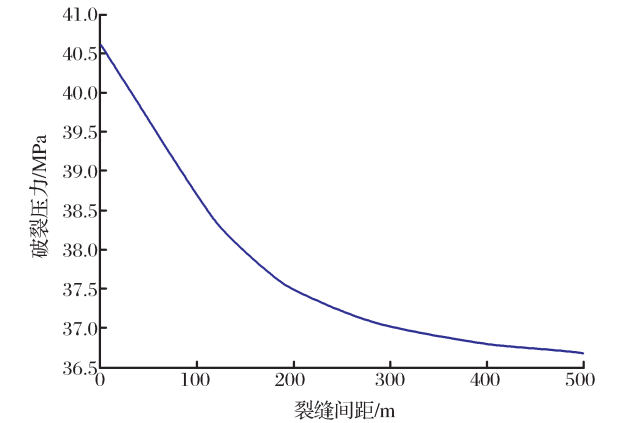


图 6 裂缝间距对破裂压力影响

Fig. 6 The effect of fracture space on initiation pressure

裂缝间距低于 100m 时,将产生一个破裂压力的陡升(2MPa 以上)。对于破裂压力较高的地区,需要注意破裂压力上升对压裂施工造成的困难。

图 7 为采用拉链式压裂等工艺时的邻井缝间干扰对切应力的变化影响[模型为图 2(b)]。裂缝垂线方向的间距  $d_y$  为 20m,而平行裂缝方向的距离  $d_x$  取 3 组值(60m、0m、-60m)进行对比。随 2 条

裂缝距离越近,诱导切应力的影响范围变得越小。这是因为 2 条裂缝尖端部位切应力相互作用抵消所造成,这在  $d_x = -60\text{m}$  的裂缝交错情况下尤为明显。邻井裂缝距离过近,一方面使得剪切应力影响区域重叠而影响效果;另一方面使得裂缝间局部区域岩石过度剪切,形成大量碎屑反而可能堵塞裂缝网络<sup>[12]</sup>。

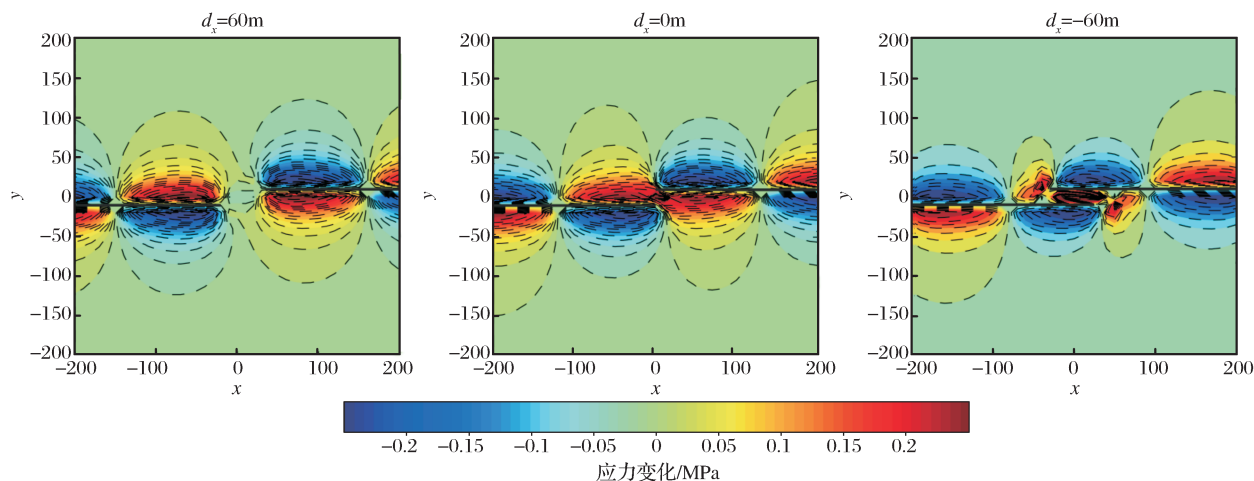


图 7 邻井缝间干扰对剪切应力影响

Fig. 7 The effect of adjoining well on shear stress

除了局部应力场改变及起裂压力变化以外,缝间干扰同样会对裂缝宽度造成影响。裂缝宽度是水力压裂施工最为重要的参数之一。足够的裂缝宽度能够保证支撑剂顺利进入到地层深部同时避免发生砂堵。通过 DDM 模型分析 Y 水平井诱导应力对裂缝宽度的影响见图 8。

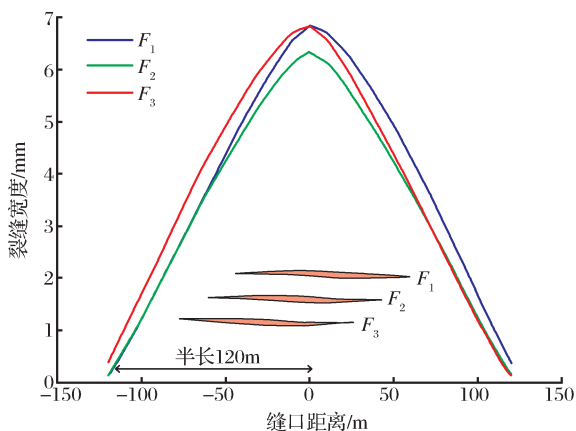


图 8 裂缝宽度变化及裂缝形态

Fig. 8 The change of fracture width by fracture induced

图 8 中表示 Y 水平井  $F_1 - F_3$  3 条半长 120m 的压裂裂缝沿缝长方向的宽度变化,  $X=0$  处为裂缝缝口位置。水平井分段多簇压裂施工时,缝间干

扰会使得水力裂缝宽度变窄。位于压裂段内中部的裂缝( $F_2$ ),由于受到两侧裂缝诱导应力作用,其裂缝宽度将会更加显著下降。忽视其他裂缝应力干扰而进行压裂设计可能会导致裂缝宽度估计值偏差较大。

裂缝宽度的缩小将会使支撑剂更难送入到地层当中。因此,对于分段、簇数较多的大型水力压裂,应当选用较小粒径的支撑剂防止砂堵。

### 3 结论

(1) 裂缝诱导应力使局部区域水平最小主应力上升幅度大于水平最大主应力,因此可以有效利用诱导应力降低局部水平主应力差。从应力分析图上看,诱导应力影响范围有限。对于实例区块,设置邻段裂缝相距 30~50m 范围能较好利用缝间干扰。

(2) 诱导应力可能导致裂缝两翼延伸不对称。当诱导应力作用明显时,忽视干扰进行压裂设计可能导致增产效果不理想。

(3) 随着裂缝间距缩小将产生裂缝破裂压力的陡升。破裂压力较高的地区需要注意控制裂缝间距大小防止破裂压力上升对施工造成困难。

(4) 采用拉链式压裂等工艺时,不应当将邻井距



离设置过近。裂缝剪切诱导应力重叠将会相互影响而影响效果,从而不利于获得复杂有效的网络裂缝。

(5)由于缝间干扰的关系,裂缝宽度减小会使支撑剂更难送入到地层当中,对于分段、簇数较多的大型水力压裂,选用较小粒径的支撑剂较为合适。

(6)随着压裂段、簇数近年来增加,缝间干扰影响非常明显。对此,采用水平井分段多簇压裂不能片面强调利用缝间干扰提高储层改造体积,应当同等重视其对压裂施工产生的负面影响。

#### 参考文献(References):

- [1] Mayerhofer M, Lolon E, Warpinski N, *et al.* What is Stimulated Rock Volume[C]. SPE 119890, 2008.
- [2] East L, Soliman M Y, Augustine J. Methods for enhancing far-field complexity in fracturing operations[J]. SPE Production & Operations, 2011, 26(3): 291-303.
- [3] Wang Bojun, Zhang Shicheng, Zhang Jin. Mechanism of crack interaction in hydraulic fracture of inclined wells[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 203-206. [王伯军, 张士诚, 张劲. 斜井水力压裂过程中的缝间干扰力学机理研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 203-206.]
- [4] Zhao Jinzhou, Yang Hai, Li Yongming, *et al.* Stability of the natural fracture when the hydraulic fracture is approaching[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(3): 402-408. [赵金洲, 杨海, 李勇明, 等. 水力裂缝逼近时天然裂缝稳定性分析[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3): 402-408.]
- [5] Olson J, Dahi Taleghani A. Modeling Simultaneous Growth of Multiple Hydraulic Fractures and Their Interaction with Natural Fractures[C]. SPE 119739, 2009.
- [6] Ajani A, Kelkar M. Interference Study in Shale Plays[C]. SPE 151045, 2012.
- [7] Crouch S L. Solution of plane elasticity problems by the displacement discontinuity method. I. Infinite body solution[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1976, 10(2): 301-343.
- [8] Crouch S L, Starfield A M. Boundary Element Methods in Solid Mechanics: With Applications in Rock Mechanics and Geological Engineering, Winchester, Massachusetts [M]. Allen and Unwin Ltd, 1983: 704.
- [9] Olson J E. Predicting fracture swarms: The influence of sub-critical crack growth and the crack-tip process zone on joint spacing in rock[J]. Geological Society, 2004, 231(1): 73-88.
- [10] 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]. SPE 125769, 2009.
- [11] Jin Yan, Chen Mian, Zhang Xudong. Hydraulic fracturing initiation pressure models for directional wells in naturally fractured formation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(5): 124-126. [金衍, 陈勉, 张旭东. 天然裂缝地层斜井水力裂缝起裂压力模型研究[J]. 石油学报, 2006, 27(5): 124-126.]
- [12] Nagel N, Zhang F, Sanchez-Nagel M, *et al.* Quantitative Evaluation of Completion Techniques on Influencing Shale Fracture 'Complexity'[C]. ICHF-2013-036, 2013.

## The Analysis of Crack Interaction in Multi-stage Horizontal Fracturing

ZHAO Jin-zhou<sup>1</sup>, CHEN Xi-yu<sup>1</sup>, LIU Chang-yu<sup>1</sup>, LI Yong-ming<sup>1</sup>, LI Hui<sup>2</sup>, CAO Xue-jun<sup>2</sup>

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. SINOPEC Southwest Petroleum Engineering Company Downhole Office, Deyang 618000, China)

**Abstract:** Multi-stage horizontal fracturing has played a huge role in the exploitation of low permeability reservoirs. To further enhance the production, the numbers of fracturing stages and clusters are increasing, which result in the serious crack interaction. Crack interaction is conducive to form complex fracture network, which raises the stimulation reservoir volume. However, serious crack interaction also results in the difficulty of fracture initiation and the sand plug, therefore study of crack interaction should be implemented. Based on the displacement and discontinuity method, mathematical models are established to analyze the crack interaction in multiple clusters fractures, from the change of induced stress field, initiation pressure and fracture width. The simulation results show that, induced stress can lead to change of horizontal stress in local area, fracture pressure and fracture width. The result indicates that the induced stress should be controlled to get a favorable stimulation. The result helps to optimize the stimulation of multiple stages horizontal well.

**Key words:** Displacement discontinuity method; Crack interaction; Induced stress; Multiple clusters stimulation; Fracture width