

·油气钻采工程·

## 水平井压裂裂缝局部应力场扰动规律

李士斌, 官兵\*, 张立刚, 陈双庆, 王业强  
(东北石油大学 石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

**摘要:**压裂裂缝形成复杂裂缝网络是非常规储层改造成功的关键,而裂缝的起裂和扩展又受控于地层中应力场的分布,所以研究水平井压裂裂缝局部应力场的扰动规律十分必要。为此,建立水平井井筒集中应力与裂缝诱导应力叠加的水平井压裂裂缝局部应力场计算模型,利用有限元数值分析软件Comsol Multiphysic,模拟分析裂缝净压力、裂缝长度、裂缝条数和裂缝间距对水平井压裂裂缝局部应力场的扰动情况,并揭示各影响因素对应力场的扰动规律。结果表明,水平井压裂裂缝对最小水平主应力的扰动程度更为显著,其中裂缝净压力和裂缝条数与局部应力场的应力扰动幅度呈正相关关系,裂缝长度的增加会引起应力扰动距离的增大,而裂缝间距的增加则会使裂缝间应力扰动程度降低。

**关键词:**水平井压裂 压裂裂缝 有限元数值模拟 应力扰动 影响因素

中图分类号:TE357.11

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)06-0112-08

## Local stress field disturbance law of horizontal well fracturing

Li Shibin, Guan Bing, Zhang Ligang, Chen Shuangqing, Wang Ye qiang

(School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing City, Heilongjiang Province, 163318, China)

**Abstract:** Complex fracture network formed by fracturing is the key of unconventional reservoir stimulation, and the fracture initiation and expansion are mainly controlled by the ground stress field distribution. So the fracture local stress disturbance law of the horizontal well fracturing is necessary to be studied. A calculation model of the near wellbore fracture local stress composed of the horizontal wellbore stress concentration and fracture-induced stress was established. Finite element numerical simulation software Comsol Multiphysic was used to simulate and to analyze the stress distribution situation, and the influence law of the disturbance factors including the fracture net pressure, fracture length, fracture number and spacing on the local stress field was revealed. The result shows that the disturbance degree of the near wellbore fracture to the minimum horizontal principal stress is more significant. Among the factors, the fracture net pressure and number have a positive impact on the disturbance amplitude of the local stress field. The increase of the fracture length is mainly reflected in the increase of stress disturbance range. And the increase of the fracture spacing makes the decrease of the stress interference degree among fractures.

**Key words:** horizontal well fracturing; near wellbore fracture; finite element numerical simulation; stress disturbance; influence factors

水平井压裂是目前开发低孔、低渗透非常规油气储层的主要手段,可改变近井筒地带流体的渗流方式,从而提高油井产量和采收率。Maxwell等利用

微地震裂缝监测技术,发现压裂复杂裂缝网络的存在,并提出储层改造体积这个概念<sup>[1-5]</sup>。针对非常规油气藏体积改造技术的迅速发展,以水平井压裂为

收稿日期:2016-07-06。

作者简介:李士斌(1965—),男,内蒙古赤峰人,教授,博士,从事油气井工程方面的教学和科研工作。联系电话:(0459)6504953, E-mail: lishibin\_2001@sina.com。

\*通讯作者:官兵(1990—),女,黑龙江哈尔滨人,在读博士研究生。联系电话:18045701160, E-mail: sygcgb1990@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“致密储层井工厂压裂应力场演化机理及调控方法”(51504067)和“页岩油气高效开发基础理论研究”(51490650)及“基于应力-渗流-损伤多场耦合的清水压裂机理及储层筛选研究”(51274069),东北石油大学研究生创新科研项目“致密油气藏体积压裂局部应力场改造控制机理研究”(YJSCX2015-017NEPU)。

基础,适合不同种类非常规储层的各种压裂技术应运而生,其中包括体积压裂、缝网压裂、同步压裂和整体压裂等。这些压裂技术虽然在概念上存在一定差异,但其实质都是为了获得在储层中形成复杂裂缝网络的最终效果,从而达到提高储层渗透率、增大泄油面积的目的。

压裂裂缝形成复杂裂缝网络是非常规储层改造成功的关键<sup>[6]</sup>。近年来,中外学者针对如何使储层裂缝大面积沟通形成裂缝网络进行了大量研究。在国外,Olson等指出天然裂缝的存在会增加裂缝的复杂性<sup>[7]</sup>;Cipolla等模拟分析了压裂后的裂缝网络,指出弄清压裂缝网的范围和形状的重要性<sup>[8-10]</sup>;East等基于裂缝间应力扰动作用,提出了一种旨在提高裂缝网络复杂性的两步法压裂技术<sup>[11]</sup>;Roussel等通过研究压裂水平井有效裂缝诱导产生的应力扰动,优化了压裂设计中水平井的裂缝间距<sup>[12]</sup>。在中国,郭建春等提出了裂缝网络形成的可行性与实现方法,并针对储层的岩矿成分、岩石力学参数、水平应力场和天然裂缝分布等控制因素进行了深入研究<sup>[13-20]</sup>。复杂裂缝网络的形成受控因素很多,然而对于特定储层,决定裂缝起裂和扩展方式的关键因素实质上就是裂缝周围的应力场分布。为此,笔者针对水平井压裂裂缝局部应力场进行研究,分析单条裂缝周围的诱导应力场以及多裂缝之间的应力扰动问题,从而确定裂缝周围应力场分布规律,以期为非常规油气藏压裂增产形成复杂裂缝网络的优化设计奠定基础。

### 1 局部应力场计算模型的建立

黄荣樽推导了直井井壁周围的应力分布数学模型<sup>[21]</sup>之后,陈勉等也相继推导了水平井压裂过程中地层应力场计算模型,并针对不同情况下压裂裂缝所产生的诱导应力场进行了相应研究<sup>[22-27]</sup>。在此基础上,为了简化模型的复杂性,建模条件假设如下:①储层岩石均质且各向同性;②岩石为处于线弹性状态的多孔介质,不受内部产生的微裂缝影响;③不考虑岩石与压裂液的物理化学作用引起的力学性质变化;④水平井井筒与裂缝连通性良好,流体作用在井筒和裂缝内的压力相等;⑤压裂裂缝延伸模型为PKN模型,且不考虑天然裂缝的影响。

#### 1.1 水平井井筒周围集中应力模型

压裂裂缝的扩展方向取决于最小水平主应力方向,为了最大限度地提高水平井产能和压裂效果,设定水平井井筒的方向平行于最小水平主应力

方向<sup>[28]</sup>。水平井井筒进入储层,由于原地应力场的约束和井筒内压力作用,使井筒周围产生应力集中效应,同时考虑压裂液渗滤效应引起的附加应力,得到水平井井筒周围的集中应力计算模型为

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{r_0} &= \frac{r_w^2}{r^2} p_w + \frac{\sigma_v + \sigma_H}{2} \times \left( 1 - \frac{r_w^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_v - \sigma_H}{2} \times \\ &\quad \left( 1 + \frac{3r_w^4}{r^4} - \frac{4r_w^2}{r^2} \right) \cos 2\theta + \delta(p_w - p_p) \\ &\quad \left[ \frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \times \left( 1 - \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \phi \right] \\ \sigma_{\theta_0} &= -\frac{r_w^2}{r^2} p_w + \frac{\sigma_v + \sigma_H}{2} \times \left( 1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_v - \sigma_H}{2} \times \\ &\quad \left( 1 + \frac{3r_w^4}{r^4} \right) \cos 2\theta - \delta(p_w - p_p) \times \\ &\quad \left[ \frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \times \left( 1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \phi \right] \\ \sigma_{z_0} &= \sigma_h + \nu \left[ (\sigma_v + \sigma_H) - 2(\sigma_v - \sigma_H) \frac{r_w^2}{r^2} \cos 2\theta \right] + \\ &\quad \delta \left[ \frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)} - \phi \right] (p_w - p_p) \times \\ \tau_{xy_0} &= \tau_{yz_0} = \tau_{zx_0} = 0 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

#### 1.2 压裂裂缝诱导应力模型

水平井压裂产生裂缝,裂缝沿垂直于最小应力的方向起裂,沿最大主应力方向延伸,压裂过程中受到地层约束,从而在井附近产生一定的诱导应力。水平井压裂裂缝的起裂延伸受控于水平主应力差,而后续压裂裂缝又会受到先压裂裂缝的诱导应力影响。研究水平井压裂裂缝周围的应力分布,首先要分析每条裂缝所产生的诱导应力状态。以水平井井筒水平段起点为原点O,最小水平主应力方向为z轴,最大水平主应力方向为x轴,垂向应力方向为y轴,建立直角坐标系,选取水平井井筒轴线所在的横截面为zx平面,二维横向裂缝周围的诱导应力场如图1所示,第n条裂缝在zx平面内任意点处产生的诱导应力为

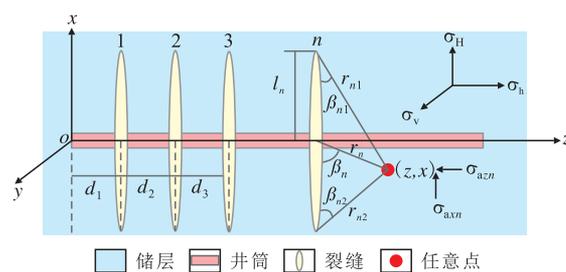


图1 二维横向裂缝周围的诱导应力场

Fig.1 Induced stress distribution around 2D transverse fractures

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{azn} &= -p_n \frac{r_n \sin \beta_n \sin \left( \frac{3}{2} \beta_{n1} + \frac{3}{2} \beta_{n2} \right)}{l_n} \left( \frac{l_n^2}{r_{n1} r_{n2}} \right)^{\frac{3}{2}} - \\ & p_n \left[ \frac{r_n \cos \left( \beta_n - \frac{1}{2} \beta_{n1} - \frac{1}{2} \beta_{n2} \right)}{(r_{n1} r_{n2})^{\frac{1}{2}}} - 1 \right] \\ \sigma_{axn} &= p_n \frac{r_n \sin \beta_n \sin \left( \frac{3}{2} \beta_{n1} + \frac{3}{2} \beta_{n2} \right)}{l_n} \left( \frac{l_n^2}{r_{n1} r_{n2}} \right)^{\frac{3}{2}} - \\ & p_n \left[ \frac{r_n \cos \left( \beta_n - \frac{1}{2} \beta_{n1} - \frac{1}{2} \beta_{n2} \right)}{(r_{n1} r_{n2})^{\frac{1}{2}}} - 1 \right] \\ \sigma_{ayn} &= \nu (\sigma_{azn} + \sigma_{axn}) = -2\nu p_n \times \\ & \left[ \frac{r_n \cos \left( \beta_n - \frac{1}{2} \beta_{n1} - \frac{1}{2} \beta_{n2} \right)}{(r_{n1} r_{n2})^{\frac{1}{2}}} - 1 \right] \\ \tau_{axzn} &= -p_n \frac{r_n}{l_n} \left( \frac{l_n^2}{r_{n1} r_{n2}} \right)^{\frac{3}{2}} \sin \beta_n \cos \left( \frac{3}{2} \beta_{n1} + \frac{3}{2} \beta_{n2} \right) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

其中

$$r_n = \sqrt{\left( z - \sum_{i=1}^n d_i \right)^2 + x^2} \quad (3)$$

$$r_{n1} = \sqrt{\left( z - \sum_{i=1}^n d_i \right)^2 + (l_n - x)^2} \quad (4)$$

$$r_{n2} = \sqrt{\left( z - \sum_{i=1}^n d_i \right)^2 + (l_n + x)^2} \quad (5)$$

$$\beta_n = \arctan \left( \frac{z - \sum_{i=1}^n d_i}{x} \right) \quad (6)$$

$$\beta_{n1} = \arctan \frac{z - \sum_{i=1}^n d_i}{l_n - x} \quad (7)$$

$$\beta_{n2} = \arctan \left( \frac{z - \sum_{i=1}^n d_i}{l_n + x} \right) \quad (8)$$

### 1.3 局部应力场分布模型

水平井压裂裂缝局部应力场由水平井井筒周围的集中应力和压裂裂缝产生的诱导应力叠加而成。根据力学叠加原理,压裂第*n*条裂缝在*zx*平面上任意点处产生的复合应力为

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_z &= \sigma_{z,0} + \sum_{i=1}^n \sigma_{azi} \\ \sigma_r &= \sigma_{r,0} + \sum_{i=1}^n \sigma_{axi} \\ \sigma_\theta &= \sigma_{\theta,0} + \sum_{i=1}^n \sigma_{ayi} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

## 2 单条裂缝周围应力变化规律

分析水平井压裂过程中压裂裂缝局部应力场扰动情况,首先要明确单条裂缝周围的应力分布。基于所推导的应力数学模型,利用有限元数值分析软件 Comsol Multiphysic 实现对水平井压裂裂缝周围应力场的模拟研究。

### 2.1 基本数据

选择某致密砂岩储层为研究对象,其岩石力学参数与地应力参数包括:最大水平主应力为 40 MPa,最小水平主应力为 33 MPa,垂向应力为 38 MPa,原始地层压力为 17 MPa,孔隙度为 6.496%,泊松比为 0.128,杨氏模量为 16 011.121 MPa。根据这些参数设定模型物理量,给予模型合理的约束条件和边界载荷,对扰动应力场进行模拟分析。

### 2.2 井周单条裂缝应力场分布

依据区域地质概况,建立尺寸为 2 000 m×1 000 m 的模型,压裂裂缝半长为 100 m 的单条裂缝有限元物理模型。通过模拟计算得到井周裂缝周围的扰动应力场分布如图 2 所示,其中压为正,拉为负。分析图 2 可知:相比井筒周围的集中应力,压裂裂缝产生的扰动应力影响更为明显,其对最小水平主应力扰动程度更大,裂缝周围的红色区域表明,压裂裂缝对最小水平主应力产生的扰动最大可增至 51.5 MPa,对最大水平主应力产生的扰动可达 22.1

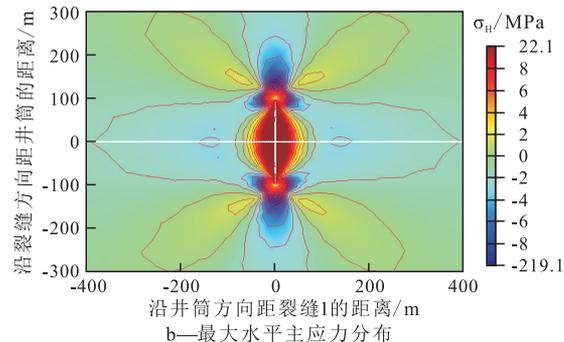
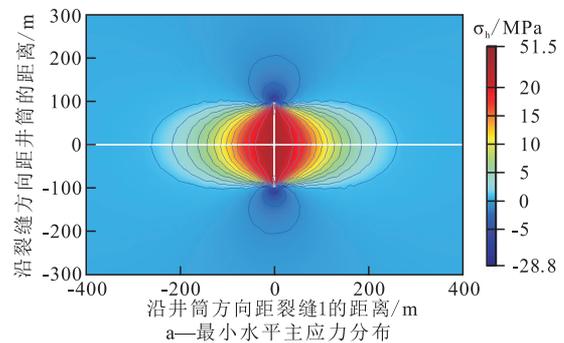


图2 二维状态下单条裂缝应力分布

Fig.2 Stress isoline distribution of a single fracture at two-dimension state

MPa;通过其分布区域可知,在裂缝尖端会产生一定的拉应力,在实际地层中会造成裂缝尖端地应力的减小。裂缝周围的应力扰动随着距离裂缝水平距离的增大逐渐减小至0,表明恢复到原地应力状态。

选取裂缝中心为原点,分别绘制一条平行于井筒轴线和一条平行于裂缝壁面的2条二维截线,绘制截线上最大和最小水平主应力的变化规律(图3),可以确定单条压裂裂缝周围的应力扰动规律。

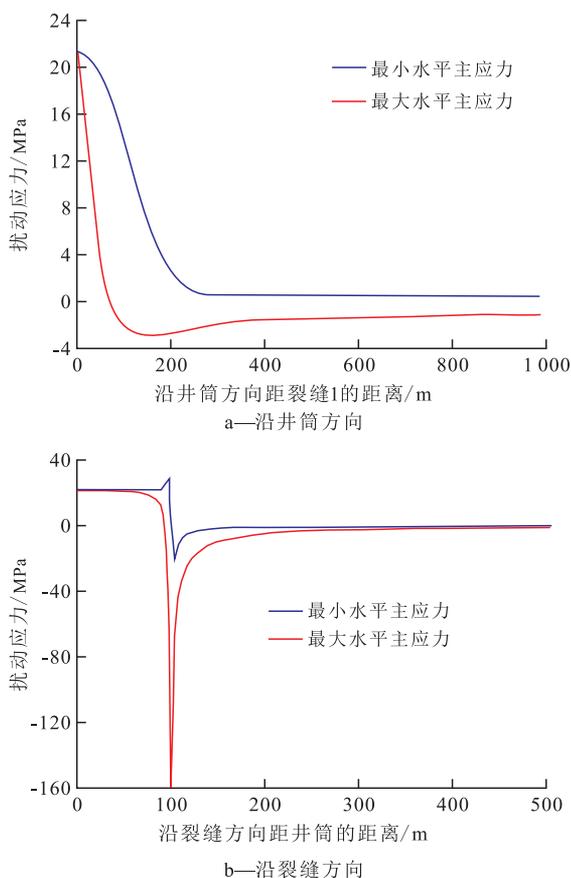


图3 一维状态下单条裂缝周围应力变化规律

Fig.3 Change law of stress around a single fracture at one-dimension state

### 3 局部应力场扰动影响因素

当对特定储层进行水平井压裂施工时,岩石脆性指数、力学参数和水平主应力差等一定,水平井井筒沿最小水平主应力方向延伸,影响水平井压裂裂缝局部应力的主要因素为裂缝净压力、裂缝长度、裂缝条数和裂缝间距。分析这些因素对水平井压裂裂缝局部应力场的扰动情况,揭示不同裂缝参数对压裂裂缝局部应力场的影响规律,可以为形成水平井压裂的应力扰动控制方法奠定基础。

#### 3.1 裂缝净压力

裂缝净压力是裂缝内流体压力与裂缝闭合压

力的差值,闭合压力取决于储层条件和瞬时关井压力,裂缝内流体压力直接影响裂缝周围诱导应力。当裂缝半长为100 m时,在不同裂缝净压力作用下的水平井井筒周围应力分布(图4)表明,井筒与裂缝连接,裂缝内流体压力与井筒内液体压力相等,在不同的裂缝净压力下,裂缝周围的诱导应力与井筒引起的应力集中叠加,使压裂裂缝局部应力场发生扰动,叠加后的局部应力场不同于裂缝周围的诱导应力场,随着裂缝净压力的增大,应力扰动幅度增大,但其扰动距离不变。沿井筒方向,裂缝净压力对最小水平主应力的扰动幅度较大(图4a),由-23.4 MPa增到33.3 MPa,随着沿井筒方向距裂缝水平距离的增大,最小水平主应力由拉应力逐渐变为压应力,在近裂缝范围内最小水平主应力下降幅度较大,而随着距离的增加,最小水平主应力逐渐平稳,但受井筒内流体压力的影响,当距离大于272 m后,不同裂缝净压力下的最小水平主应力趋于稳定;裂缝净压力对最大水平主应力的影响规律与最小水平主应力相同,只是扰动幅度相对较小(图4b)。沿裂缝方向,裂缝净压力对局部应力场的影响主要体现在裂缝两端,随着裂缝净压力的增大,裂缝两端的主应力绝对值增大。

#### 3.2 裂缝长度

在裂缝半长为30~270 m的条件下,分析不同裂缝长度对局部应力场的影响规律,选取沿井筒方向和裂缝方向2个轨迹对扰动应力进行研究。模拟结果(图5)显示:沿井筒方向,裂缝长度对局部应力的扰动幅度影响不大,而对局部应力的扰动范围较大,裂缝长度的增大对最小水平主应力的影响程度较大,随着裂缝长度的增加,其影响范围由开始的82 m扩大至800 m,而对最大水平主应力的影响范围仅增加了360 m左右;沿裂缝方向,随着裂缝长度的增加,裂缝尖端的扰动拉应力逐渐增大,而对扰动范围的增加却不明显。

#### 3.3 裂缝条数

假设裂缝半长为100 m、相邻2条裂缝间距为100 m,模拟裂缝条数为1~7条的应力分布情况。裂缝条数沿井筒方向逐渐增加,根据单条裂缝局部应力分布规律可知,多条裂缝间应力扰动应只体现在沿井筒方向,而在裂缝方向多条裂缝引起的诱导应力仅局限在各自裂缝端,不会产生叠加效应。所以仅分析沿井筒方向的应力分布。由模拟结果(图6)可以看出:裂缝条数越多,最小水平主应力的扰动范围越大,同一位置的扰动应力也越大,裂缝间

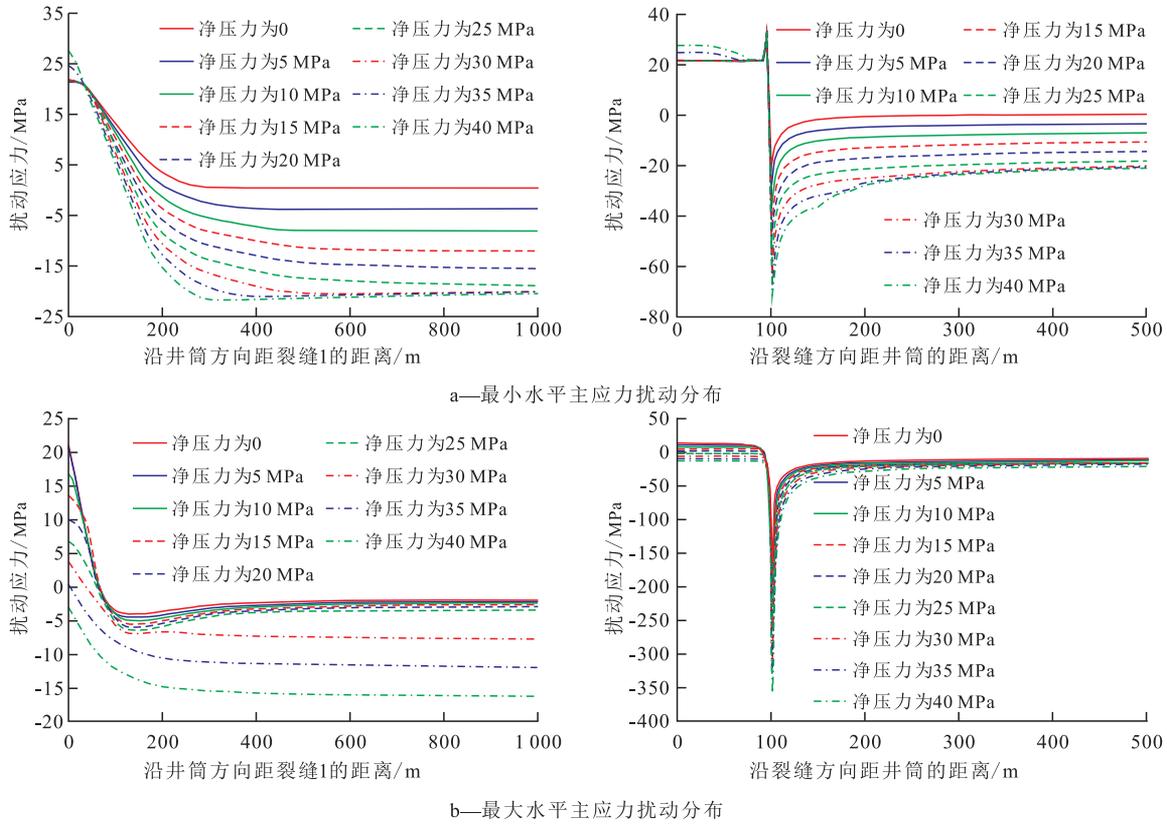


图4 不同裂缝净压力下局部应力场分布规律

Fig.4 Distribution law of local stress field under different fracture net pressures

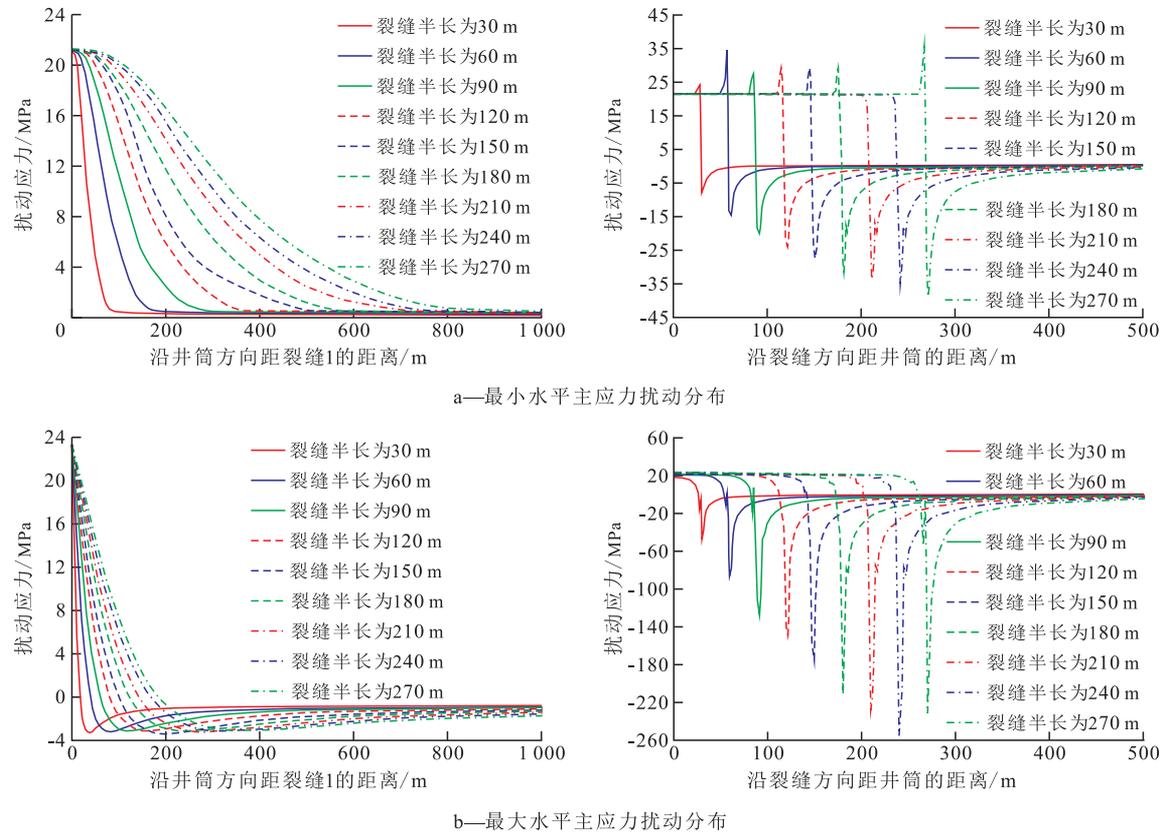


图5 不同裂缝长度下局部应力场分布规律

Fig.5 Distribution law of local stress field under different fracture lengths

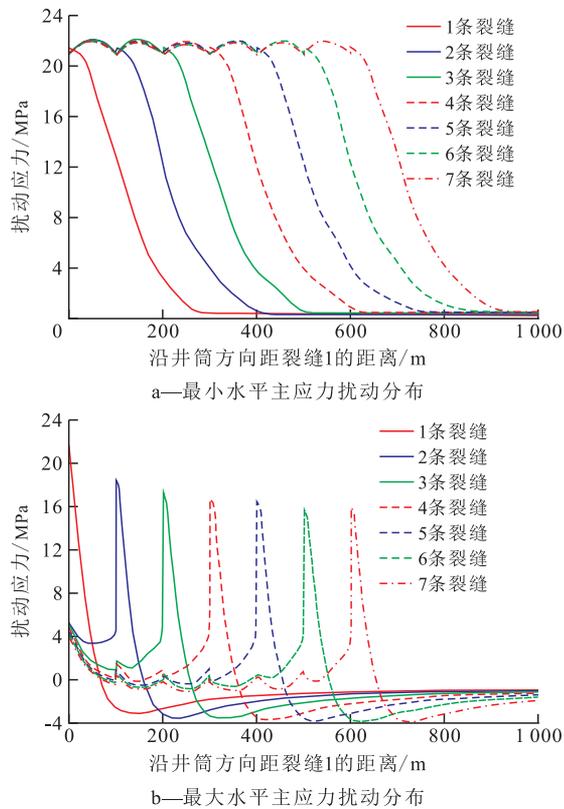


图6 不同裂缝条数下局部应力场分布规律

Fig.6 Distribution law of local stress field under different fracture numbers

局部扰动应力叠加数值相近,主要为21~22 MPa,但随着沿井筒方向距裂缝1距离的增加,扰动应力变

化幅度逐渐平直至趋近于0;裂缝条数的增加同样会引起最大水平主应力的扰动,随着裂缝条数的增加,裂缝间的扰动应力最小值由3.5 MPa逐渐变为-1.0 MPa,且下降速度先快后慢。

### 3.4 裂缝间距

设置2条压裂开的横切裂缝,裂缝半长为100 m,模拟不同裂缝间距下压裂裂缝局部应力场的分布情况。模拟结果(图7)显示,裂缝周围的扰动应力较大(图中红色分布),2条相邻裂缝间应力叠加,扰动强度较大,而随着裂缝间距的增加,裂缝间的应力扰动逐渐减小(由短距离的红橙色慢慢转变为浅蓝色),直至裂缝间扰动应力消失,恢复到单条裂缝周围应力的分布。

根据图7中的应力分布状态可知,裂缝间应力叠加主要体现在沿井筒方向,分析沿井筒方向局部应力场的扰动规律(图8)可以看出,裂缝间距对最小水平主应力的扰动程度较大(图8a)。对于最小水平主应力而言,当裂缝间距为50 m时,2条相邻裂缝间的扰动应力为21 MPa,随着裂缝间距的增加,裂缝间扰动应力逐渐增加,当裂缝间距达到150 m时,扰动应力增加至最大值,为23.4 MPa;随着裂缝间距的继续增加,裂缝间应力扰动程度逐渐降低,当裂缝间距达到800 m时,裂缝间扰动应力恢复至0,裂缝间应力扰动消失。裂缝间距增加对最大水

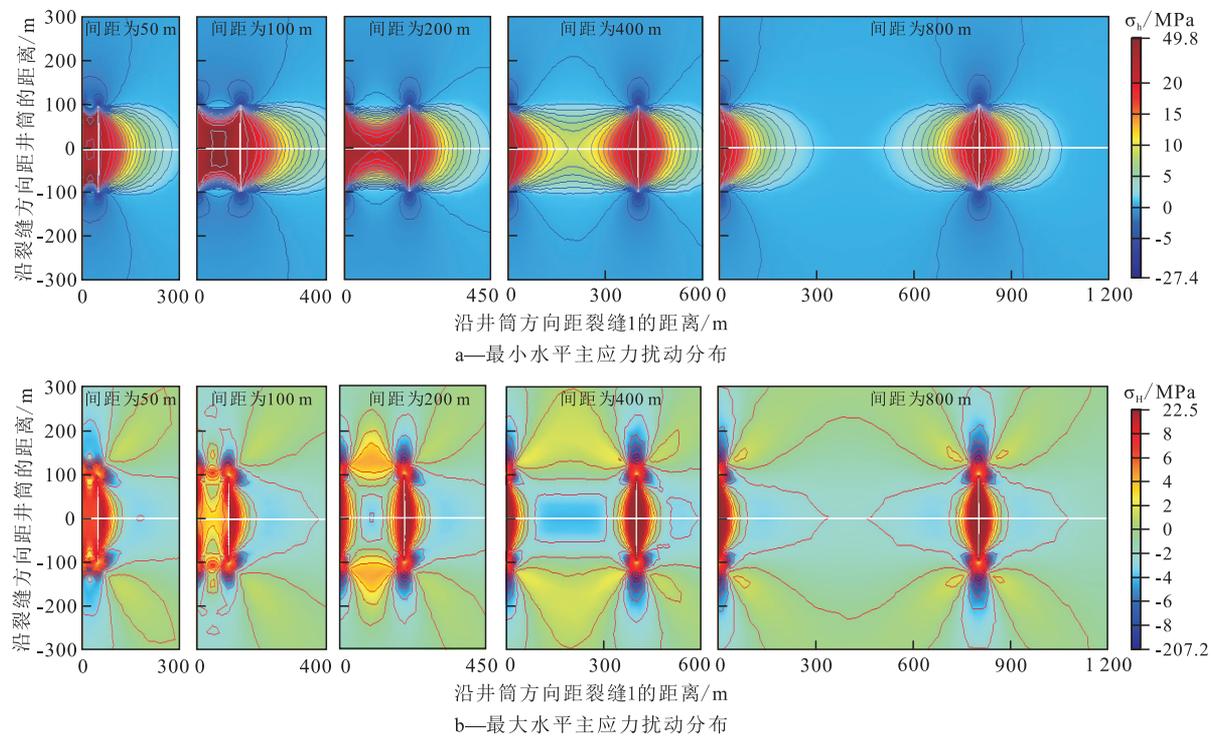


图7 不同裂缝间距下局部应力场分布

Fig.7 Contour distribution of local stress field under different fracture spacings

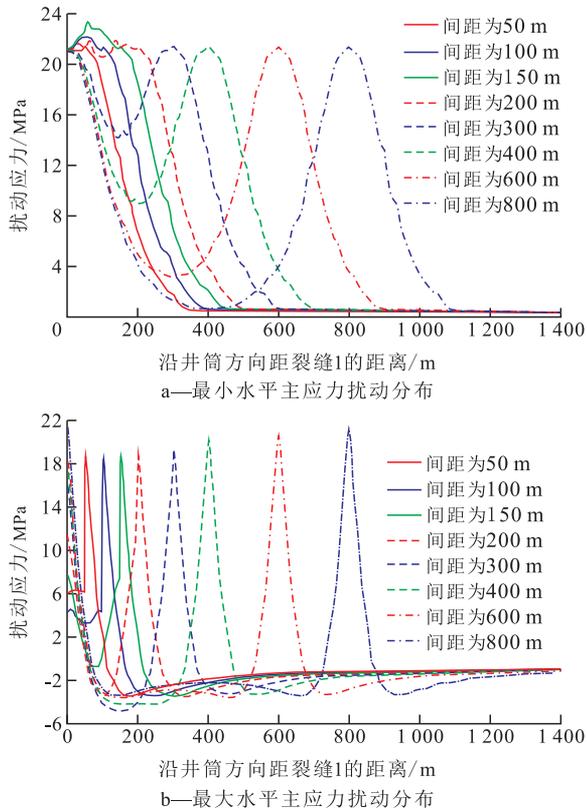


图8 不同裂缝间距下井筒方向局部应力场扰动规律  
Fig.8 Disturbance law of local stress field along wellbore direction under different fracture spacings

平主应力扰动较小,波动范围不到10 MPa。

### 4 结论

水平井压裂裂缝局部应力场受控于水平井井筒集中应力与裂缝诱导应力的共同作用,通过建立水平井井筒周围的应力场分布计算模型和压裂裂缝的诱导应力分布计算模型,推导出水平井压裂裂缝局部应力场计算模型,从而确定局部应力场的影响因素。

设置特定储层和井筒方位,分析单条裂缝周围的应力分布情况,并对裂缝净压力、裂缝长度、裂缝条数及裂缝间距各影响因素的扰动规律进行模拟研究。结果表明,最小水平主应力的受扰动程度更为显著,其中随着裂缝净压力的增加,局部应力场的应力扰动幅度增大,但扰动距离不变;裂缝长度的增加主要影响单条裂缝周围应力的波动范围;在同一裂缝间距下,裂缝条数的增多使得同一位置的扰动应力增大;随着裂缝间距的增加,裂缝间应力扰动程度逐渐降低直至消失。

通过对局部应力场的扰动分析,结合水力裂缝的起裂延伸准则,可以优化裂缝间距,确定裂缝压开次序,设计人工裂缝布缝方式,为实现非常规油

气藏压裂增产形成复杂缝网的优化设计奠定基础。

#### 符号解释:

$\sigma_{r0}$ ,  $\sigma_{\theta0}$  和  $\sigma_{z0}$  ——井筒柱坐标系  $(r, \theta, z)$  下水平井径向力、周向力和轴向力, MPa;  $r_w$  ——井眼半径, m;  $r$  ——井壁某点距井眼轴线的距离, m;  $p_w$  ——井底流压, MPa;  $\sigma_v$ ,  $\sigma_H$  和  $\sigma_h$  ——原始地层的垂向应力、最大水平主应力和最小水平主应力, MPa;  $\theta$  ——井筒柱坐标系下的极角, rad;  $\delta$  ——渗透性系数, 当井壁不可渗透时为0, 井壁渗透时为1;  $\alpha$  ——Biot 弹性系数;  $\nu$  ——岩石泊松比;  $\phi$  ——地层孔隙度;  $p_p$  ——地层孔隙压力, MPa;  $\tau_{xy0}$ ,  $\tau_{yz0}$  和  $\tau_{zx0}$  ——井筒柱坐标系  $(r, \theta, z)$  下各面的剪切力, MPa;  $\sigma_{azn}$ ,  $\sigma_{axn}$  和  $\sigma_{ayn}$  ——先压裂开的第  $n$  条裂缝产生的诱导应力在  $z, x$  和  $y$  方向上的正应力分量, MPa;  $x, y, z$  ——储层中任意点到  $yz$  平面、 $zx$  平面和  $xy$  平面的距离, m;  $p_n$  ——第  $n$  条裂缝内的流体压力, MPa;  $r_n$ ,  $r_{n1}$  和  $r_{n2}$  ——横向裂缝中部、顶端和底端到  $zx$  平面上任意点的距离, m;  $\beta_n$ ,  $\beta_{n1}$  和  $\beta_{n2}$  ——第  $n$  条横向裂缝中部、顶端和底端到  $zx$  平面上任意点的直线与裂缝面的夹角, ( $^\circ$ );  $l_n$  ——第  $n$  条裂缝长度, m;  $\tau_{axzn}$  ——先压裂开的第  $n$  条裂缝产生的诱导应力在  $zx$  平面上的剪切应力分量, MPa;  $i$  ——裂缝条数,  $i=1, 2, \dots, n$ ;  $d_i$  ——第  $i$  条裂缝距离  $x$  轴的距离, m;  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$  和  $\sigma_\theta$  ——井筒柱坐标系  $(r, \theta, z)$  下考虑裂缝诱导应力的水平井径向力、周向力和轴向力, MPa;  $\sigma_{azi}$ ,  $\sigma_{ayi}$  ——先压裂开的第  $i$  条裂缝产生的诱导应力在  $z, x$  和  $y$  方向上的正应力分量, MPa。

#### 参考文献:

- [1] Maxwell S C, Urbancic T J, Steinsberger N, et al. Microseismic imaging of hydraulic fracture complexity in the Barnett shale [C]. SPE 77440, 2002.
- [2] Fisher M K, Davidson B M, Goodwin A K, et al. Integrating fracture mapping technologies to optimize stimulations in the Barnett shale [C]. SPE 77441, 2002.
- [3] Fisher M K, Heinze J R, Harris C D, et al. Optimizing horizontal completion techniques in the Barnett shale using microseismic fracture mapping [C]. SPE 90051, 2004.
- [4] Mayerhofer M J, Lolon E P, Youngblood J E, et al. Integration of microseismic fracture mapping results with numerical fracture network production modeling in the Barnett shale [C]. SPE 102103, 2006.
- [5] Mayerhofer M J, Lolon E P, Warpinski N R, et al. What is stimulated reservoir volume? [C]. SPE 119890, 2008.
- [6] 才博, 丁云宏, 卢拥军, 等. 提高改造体积的新裂缝转向压裂技术及其应用 [J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 108-110. Cai Bo, Ding Yunhong, Lu Yongjun, et al. Study and application of new in-fissure fracturing technique for improving stimulated reservoir volume [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(5): 108-110.
- [7] Olson J E, Taleghani A D. Modeling simultaneous growth of multi-

- ple hydraulic fractures and their interaction with natural fractures [C].SPE 119739,2009.
- [8] Cipolla C L, Williams M J, Weng X, et al. Hydraulic fracture monitoring to reservoir simulation: maximizing value [C].SPE 133877, 2010.
- [9] Cipolla C L, Lolon E P, Erdle J C, et al. Modeling well performance in shale-gas reservoirs [C].SPE 125532, 2009.
- [10] Harikesavanallur A, Deimbacher F, Crick M, et al. Volumetric fracture modeling approach (VFMA): incorporating microseismic data in the simulation of shale gas reservoirs [C].SPE 134683, 2010.
- [11] East L, Soliman M Y, Augustine J. Methods for enhancing far-field complexity in fracturing operations [C].SPE 133380, 2011.
- [12] Roussel N P, Sharma M M. Optimizing fracture spacing and sequencing in horizontal-well fracturing [C].SPE 127986, 2011.
- [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): 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.
- [14] 翁定为, 严星明, 卢拥军, 等. 考虑应力干扰的致密油气压裂设计及实现方法[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(4): 639-645. Weng Dingwei, Yan Xingming, Lu Yongjun, et al. Optimization and realization of stress interference in tight oil and gas reservoir [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(4): 639-645.
- [15] 赵立强, 刘飞, 王佩珊, 等. 复杂水力裂缝网络延伸规律研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 562-569. Zhao Liqiang, Liu Fei, Wang Peishan, et al. A review of creation and propagation of complex hydraulic fracture network [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 562-569.
- [16] 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. 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.
- [17] 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 Jinzhou, Ren Lan, Hu Yongquan. Controlling factors of hydraulic fractures extending into network in shale formations [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2013, 35(1): 1-9.
- [18] 王瑞. 致密油藏水平井体积压裂效果影响因素分析[J]. 特种油气藏, 2015, 22(2): 126-128. Wang Rui. Analysis on influential factors for volumetric fracturing effects in horizontal well in tight reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(2): 126-128.
- [19] 李红梅. 微地震监测技术在非常规油气藏压裂效果综合评估中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 129-134. Li Hongmei. Application of micro-seismic monitoring technology to unconventional hydrocarbon reservoir fracturing evaluation [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 129-134.
- [20] 王欢, 廖新维, 赵晓亮, 等. 超低渗透油藏分段多簇压裂水平井产能影响因素与渗流规律——以鄂尔多斯盆地长8超低渗透油藏为例[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(6): 107-110. Wang Huan, Liao Xinwei, Zhao Xiaoliang, et al. A study on productivity and flow regimes of segmented multi-cluster fractured horizontal well in ultra-low permeability reservoir—a case of Chang8 ultra-low permeability reservoir in Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 107-110.
- [21] 黄荣樽. 水力压裂裂缝的起裂和扩展[J]. 石油勘探与开发, 1981, 8(5): 62-74. Huang Rongzun. Hydraulic fracturing initiation and propagation [J]. Petroleum Exploration and Development, 1981, 8(5): 62-74.
- [22] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011. Chen Mian, Jin Yan, Zhang Guangqing. Petroleum engineering rock mechanics foundation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [23] 尹建, 郭建春, 曾凡辉. 水平井分段压裂射孔间距优化方法[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(5): 67-71. Yin Jian, Guo Jianchun, Zeng Fanhui. Peforation spacing optimization for staged fracturing of horizontal well [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(5): 67-71.
- [24] 郭天魁, 张士诚, 刘卫来, 等. 页岩储层射孔水平井分段压裂的起裂压力[J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 1-6. Guo Tiankui, Zhang Shicheng, Liu Weilai, et al. Initiation pressure of multi-stage fracking for perforated horizontal wells of shale gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(12): 1-6.
- [25] 王文军, 张士诚. 水平井压裂裂缝形态定量解释新方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(4): 103-107. Wang Wenjun, Zhang Shicheng. New quantitative interpreting method of the fracture morphologies for fractured horizontal well [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(4): 103-107.
- [26] 刘雨, 艾池. 多级压裂诱导应力作用下天然裂缝开启规律研究[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(1): 20-26. Liu Yu, Ai Chi. Opening of natural fractures under induced stress in multi-stage fracturing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(1): 20-26.
- [27] 彭珏. 考虑裂缝角度与干扰的压裂水平井产能预测模型[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(4): 108-113. Peng Jue. Productivity predicting model for the fractured horizontal well considering the fracture angles and interference [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(4): 108-113.
- [28] 方思冬, 战剑飞, 黄世军, 等. 致密油藏多角度裂缝压裂水平井产能计算方法[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 84-89. Fang Sidong, Zhan Jianfei, Huang Shijun, et al. A computational method for productivity of arbitrary angular fractured horizontal well in tight oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 84-89.