



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106930743 A

(43)申请公布日 2017.07.07

(21)申请号 201710314604.7

(22)申请日 2017.05.06

(71)申请人 东北石油大学

地址 163319 黑龙江省大庆市高新技术开  
发区发展路199号

(72)发明人 冯福平 胡超洋 王胡振 刘振宇  
赵景原 严茂森

(74)专利代理机构 哈尔滨东方专利事务所  
23118

代理人 曹爱华

(51)Int.Cl.

E21B 43/26(2006.01)

E21B 43/11(2006.01)

G06F 17/50(2006.01)

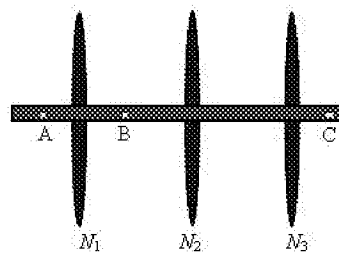
权利要求书3页 说明书9页 附图1页

(54)发明名称

一种水平井分段多簇压裂射孔簇位置优化  
设计方法

(57)摘要

本发明涉及的是一种水平井分段多簇压裂射孔簇位置优化设计方法,其为:步骤一、根据井眼特征及开发要求确定第一压裂段各射孔簇的位置;步骤二、计算由第一压裂段最后一个射孔簇处裂缝产生的诱导应力;步骤三至步骤六、初选第M压裂段第一射孔簇位置;步骤七至步骤十、初选下一射孔簇位置,直至本射孔簇裂缝与上一射孔簇裂缝横向改造范围首尾相连;步骤十一、重复步骤七~十,直至满足第M压裂段射孔簇个数设计的要求;步骤十二、计算第M压裂段最后一个射孔簇处裂缝相对于靠近第M+1压裂段地层的有效净压力及诱导应力;步骤十三、 $M=M+1$ ,重复步骤三~十二,直至满足本井水平段改造长度的要求。本发明更为符合分段多簇压裂的实际工况。



1.一种水平井分段多簇压裂射孔簇位置优化设计方法,其特征在于:这种水平井分段多簇压裂射孔簇位置优化设计方法:

步骤一、根据井眼特征及开发要求确定第一压裂段各射孔簇的位置;

步骤二、计算由第一压裂段最后一个射孔簇处裂缝产生的诱导应力;

$$\begin{cases} \sigma_x^{1e} = p_{net} \left( 1 - \frac{\frac{L}{2c}}{\sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}}} + \frac{\frac{L}{2c}}{4 \left( \sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}} \right)^3} \right) \\ \sigma_y^{1e} = 2p_{net} \nu \left( 1 - \frac{\frac{L}{2c}}{\sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}}} \right) \end{cases}$$

式中: $\sigma_x^{1e}$ 、 $\sigma_y^{1e}$ 分别为第一压裂段最后一个射孔簇处裂缝在最小水平地应力和最大水平地应力方向产生的诱导应力,MPa; $p_{net}$ 为裂缝净压力,MPa; $L$ 为裂缝中心到该点的水平距离,m; $c$ 为裂缝半高,m; $\nu$ 为岩石泊松比;

步骤三、初选第N压裂段第一射孔簇位置;

步骤四、计算该射孔簇处裂缝 $N_1$ 相对于靠近第N-1压裂段地层的有效净压力及诱导应力;

该射孔簇处裂缝 $N_1$ 相对于靠近第N-1压裂段地层的有效净压力为:

$$p_{enetl}^{N_1} = p_{net} - \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{ie} (N_1)$$

式中: $p_{enetl}^{N_1}$ 为裂缝 $N_1$ 相对于靠近第N-1压裂段地层的有效净压力,MPa; $p_{net}$ 为裂缝 $N_1$ 的原始净压力,MPa; $\sigma_x^{ie} (N_1)$ 为第i压裂段的最后一个射孔簇处裂缝对裂缝 $N_1$ 产生的最小水平地应力方向的诱导应力,MPa;

靠近第N-1压裂段地层的诱导应力为:

$$\begin{cases} \sigma_x'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{ie} + \sigma_x^{N_1} (p_{enetl}^{N_1}) \\ \sigma_y'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_y^{ie} + \sigma_y^{N_1} (p_{enetl}^{N_1}) \end{cases}$$

式中: $\sigma_x''$ 和 $\sigma_y''$ 分别为该点受到的最小水平地应力和最大水平地应力方向的总诱导应力,MPa; $\sigma_x^{ie}$ 和 $\sigma_y^{ie}$ 为第i段压裂最后一个射孔簇处裂缝对该点产生的最小水平地应力

和最大水平地应力方向的诱导应力,MPa; $\sigma_x^{N_1}(p_{enetr}^{N_1})$ 和 $\sigma_y^{N_1}(p_{enetr}^{N_1})$ 分别为裂缝 $N_1$ 对该点地层产生的最小水平地应力和最大水平地应力方向的诱导应力,MPa;

步骤五、根据诱导应力和原地应力分析该射孔簇与第 $N-1$ 压裂段最后一个射孔簇裂缝横向改造范围的关系,若有未改造段,缩短该射孔簇与第 $N-1$ 压裂段最后一个射孔簇的距离;若有重复改造段,增加该射孔簇与第 $N-1$ 压裂段最后一个射孔簇的距离;

步骤六、重复步骤四~五,直至该射孔簇与第 $N-1$ 压裂段最后一个射孔簇裂缝横向改造范围首尾相连;

步骤七、初选下一射孔簇位置;

步骤八、计算两相邻射孔簇处裂缝相对于中间地层的有效净压力及诱导应力;

两相邻射孔簇处裂缝 $N_j$ 、 $N_{j+1}$ 相对于中间地层的有效净压力可通过下式求解

$$\begin{cases} \sigma_x^{N_{j+1}}(p_{enetr}^{N_{j+1}}, N_j) + \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e}(N_j) + p_{enetr}^{N_j} = p_{net} \\ \sigma_x^{N_j}(p_{enetr}^{N_j}, N_{j+1}) + \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e}(N_{j+1}) + p_{enetr}^{N_{j+1}} = p_{net} \end{cases}$$

式中: $\sigma_x^{N_{j+1}}(p_{enetr}^{N_{j+1}}, N_j)$ 为裂缝 $N_{j+1}$ 对裂缝 $N_j$ 产生的最小水平地应力方向诱导应力,MPa; $p_{enetr}^{N_{j+1}}$ 为裂缝 $N_{j+1}$ 相对于其左侧地层的有效净压力,MPa; $\sigma_x^{i_e}(N_j)$ 为第 $i$ 压裂段的最后一个射孔簇处裂缝对裂缝 $N_j$ 产生的最小水平地应力方向诱导应力,MPa; $\sigma_x^{N_j}(p_{enetr}^{N_j}, N_{j+1})$ 为裂缝 $N_j$ 对裂缝 $N_{j+1}$ 产生的最小水平地应力方向诱导应力,MPa; $p_{enetr}^{N_j}$ 为裂缝 $N_j$ 相对于其右侧地层的有效净压力,MPa; $\sigma_x^{i_e}(N_{j+1})$ 为第 $i$ 压裂段的最后一个射孔簇处裂缝对裂缝 $N_{j+1}$ 产生的最小水平地应力方向诱导应力,MPa;

两相邻射孔簇处裂缝 $N_j$ 、 $N_{j+1}$ 中间地层的诱导应力为:

$$\begin{cases} \sigma_x'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e} + \sigma_x^{N_j}(p_{enetr}^{N_j}) + \sigma_x^{N_{j+1}}(p_{enetr}^{N_{j+1}}) \\ \sigma_y'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_y^{i_e} + \sigma_y^{N_j}(p_{enetr}^{N_j}) + \sigma_y^{N_{j+1}}(p_{enetr}^{N_{j+1}}) \end{cases}$$

式中: $\sigma_x^{N_j}(p_{enetr}^{N_j})$ 和 $\sigma_y^{N_j}(p_{enetr}^{N_j})$ 分别为裂缝 $N_j$ 对该点产生的最小水平地应力和最大水平地应力方向的诱导应力,MPa; $\sigma_x^{N_{j+1}}(p_{enetr}^{N_{j+1}})$ 和 $\sigma_y^{N_{j+1}}(p_{enetr}^{N_{j+1}})$ 分别为裂缝 $N_{j+1}$ 对该点产生的最小水平地应力和最大水平地应力方向的诱导应力,MPa;

步骤九、根据诱导应力和原地应力分析该射孔簇裂缝与上一射孔簇裂缝横向改造范围

的关系,若有未改造段,缩短该射孔簇与上一射孔簇的距离;若有重复改造段,增加该射孔簇与上一射孔簇的距离;

步骤十、重复步骤八~九,直至本射孔簇裂缝与上一射孔簇裂缝横向改造范围首尾相连, $j=j+1$ ;

步骤十一、重复步骤七~十,直至满足第N压裂段射孔簇个数设计的要求;

步骤十二、计算第N压裂段最后一个射孔簇处裂缝相对于靠近第N+1压裂段地层的有效净压力及诱导应力;

第N压裂段最后一个射孔簇处裂缝相对于靠近第N+1压裂段地层的有效净压力为:

$$p_{enetr}^{N_e} = p_{net} - \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e} (N_e)$$

式中: $p_{enetr}^{N_e}$ 为第N+1压裂段最后一个射孔簇处裂缝相对于靠近第N+1压裂段地层的有效净压力,MPa; $\sigma_x^{i_e} (N_e)$ 为第i段压裂的最后一个射孔簇处裂缝对第N压裂段最后一个射孔簇处裂缝产生的最小水平地应力方向诱导应力,MPa;

靠近第N+1压裂段地层的诱导应力为:

$$\begin{cases} \sigma_x'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e} + \sigma_x^{N_e} (p_{enetr}^{N_e}) \\ \sigma_y'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_y^{i_e} + \sigma_y^{N_e} (p_{enetr}^{N_e}) \end{cases}$$

式中: $\sigma_x^{N_e} (p_{enetr}^{N_e})$ 和 $\sigma_y^{N_e} (p_{enetr}^{N_e})$ 分别为第N压裂段最后一个射孔簇处裂缝对靠近第N+1压裂段地层产生的最小水平地应力和最大水平地应力方向的诱导应力,MPa;

步骤十三、 $N=N+1$ ,重复步骤三~十二,直至满足本井水平段改造长度的要求。

## 一种水平井分段多簇压裂射孔簇位置优化设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及水平井分段多簇压裂储层改造技术,具体涉及一种水平井分段多簇压裂射孔簇位置优化设计方法。

### 背景技术

[0002] 水平井分段多簇压裂技术是开发非常规低渗透储层的有效手段,这种技术不仅能够实现人工裂缝与天然裂缝的沟通,还能够利用诱导应力促使应力转向产生转向分支裂缝,在储层中形成复杂的裂缝网络,使得任意方向基质中的油气向裂缝的渗流距离“最短”,极大地提高了储集层的整体渗透率以及油气井的产能和最终采收率。

[0003] 非常规低渗透储层压裂复杂裂缝网络的形成主要受天然裂缝、原地应力、岩石特性以及压裂参数的影响,天然裂缝发育的储层中较容易形成复杂的裂缝网络,但是在天然裂缝不发育的储层中则需要更为精细的压裂设计才能实现。在储层条件确定的情况下,通过合理的设计射孔簇的位置,利用诱导应力反转水平应力场来产生转向分支裂缝是增加裂缝网络复杂性的有效手段。

[0004] 目前常用的水平井分段多簇压裂射孔簇设计方法主要分为以下两种:

[0005] (1) 根据水平井段储层特性的射孔簇设计方法

[0006] 该方法充分考虑了沿水平井段的储层特性差异,为了实现选择性的有效改造,选择储层含油丰度、岩石物性接近的水平井段作为一个压裂段,然后在该段内均匀布置射孔簇(若水平应力差异较大,为保证各射孔簇的有效开启扩展,需采用限流法或裂缝转向技术),但该方法并未考虑分段多簇压裂过程中诱导应力对射孔簇位置设计的影响。

[0007] (2) 考虑诱导应力反转原地应力场的射孔簇设计方法

[0008] 水力压裂过程中最小水平地应力方向产生的诱导应力要大于最大水平地应力方向产生的诱导应力,诱导应力在两个方向的差异会缩小原地应力差甚至实现原地应力反转,从而产生转向分支裂缝提高裂缝网络的复杂性。根据诱导应力对原地应力的反转范围进行射孔簇位置的设计能够实现整个水平井段的高效改造,是目前最常用的射孔簇位置设计方法。但现有方法认为地层中某点受到的总诱导应力为各条裂缝在该点产生的诱导应力的叠加,这种应力叠加原理只能适用于水平井分段单簇压裂的工况(单个压裂段内只有一条裂缝,压裂过程中各条裂缝先后依次扩展形成),并不适用于水平井分段多簇压裂的实际工况(分段多簇压裂时同一压裂段内多个射孔簇处的裂缝同步扩展)。水平井分段多簇压裂过程中,由于段内多个射孔簇处的裂缝同步扩展延伸,其在周围地层中产生的总诱导应力并不是各条裂缝诱导应力的叠加,其原因在于:

[0009] ①分段多簇压裂段内多条裂缝同步扩展时存在应力阻隔效应

[0010] 水平井分段多簇压裂时,假设每段内各射孔簇处形成尺寸相同且均与井筒垂直的平行裂缝。以第N段3簇压裂为例,压裂过程中3个射孔簇处的裂缝 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 同步平行扩展延伸,如图1所示。

[0011] 在第N段压裂过程中,由于 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 3条裂缝同步扩展延伸,裂缝 $N_2$ 、 $N_3$ 受到裂缝 $N_1$ 的

阻隔,其所产生的诱导应力并不能传递到A点,即第N段压裂过程中A点受到的诱导应力是由裂缝 $N_1$ 产生的,而不是 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 3条裂缝诱导应力的叠加; $N_3$ 裂缝受到 $N_2$ 裂缝的阻隔也不会对 $N_1$ 、 $N_2$ 裂缝之间的B点产生诱导应力,B点受到的诱导应力是 $N_1$ 、 $N_2$ 两条裂缝诱导应力的叠加,而与裂缝 $N_3$ 无关;同理 $N_1$ 、 $N_2$ 裂缝受到 $N_3$ 裂缝的阻隔也不会对C点产生诱导应力,C点受到的诱导应力是由裂缝 $N_3$ 产生的。分段多簇压裂段内多条裂缝同步扩展时,各条裂缝产生的诱导应力受到其他裂缝的阻挡会出现应力阻隔效应,第N段压裂过程中段内某点产生的诱导应力是与其相邻裂缝引起的:段内缝外靠近上一压裂段的诱导应力由第一个射孔簇处的裂缝产生;段内缝间的诱导应力由与其相邻的两个射孔簇处裂缝叠加形成;段内缝外靠近下一压裂段的诱导应力由最后一个射孔簇处的裂缝产生。由此可知,第N段压裂之前段内各点受到的诱导应力为之前各段最后一个射孔簇处裂缝产生的诱导应力的叠加。

[0012] ②分段多簇压裂段内多条裂缝同步扩展时存在应力干扰效应

[0013] 第N段压裂过程中,段内各点受到的诱导应力由两部分组成:1)之前N-1段压裂对该点形成的诱导应力;2)本段压裂对该点形成的诱导应力。由于之前N-1段压裂所形成的裂缝已经在本段裂缝处产生了诱导应力,该诱导应力增大了最小水平地应力,增大的最小水平地应力抵消了一部分裂缝内的原始净压力,使得实际净压力减小。因此第N段压裂裂缝内的实际净压力并不是原始净压力,而是应该减去之前N-1段压裂在该段裂缝处所形成的最小水平地应力方向的诱导应力,定义该实际净压力为有效净压力。水平井分段多簇压裂由于段内多条裂缝的同时扩展,在分析其有效净压力时不仅要考虑之前N-1段压裂对裂缝处产生的最小水平地应力方向的诱导应力,还要考虑本段压裂多条裂缝同步扩展时的相互应力干扰效应对有效净压力的影响。段内多条裂缝同步扩展时,每条裂缝都会对与之相邻的裂缝产生诱导应力,从而进一步降低其相邻裂缝内的有效净压力以及由此引起的诱导应力场。因此分段多簇压裂时,需要考虑之前各段压裂以及本段内多条裂缝同步扩展时相邻裂缝之间的应力干扰效应,重新计算各条裂缝内的有效净压力以及由此引起的诱导应力。

[0014] 由于水平井分段多簇压裂段内多个射孔簇处的裂缝同步扩展延伸时存在应力阻隔效应和应力干扰效应,地层中某点受到的诱导应力并不是各条裂缝在该点产生的诱导应力的叠加,现有的水平井分段压裂诱导应力计算方法并不适用于分段多簇压裂的工况,致使按该方法设计的射孔簇位置不能达到预期的压裂效果,水平井段不同压裂段之间既存在横向未改造区域,又存在重复改造区域的现象。未改造区域的存在浪费了水平井的部分产能,同时也会造成整体压裂效果评价的不准确;而重复改造一方面会消耗掉额外的压裂能量(压裂液和支撑剂),降低了压裂效率。另一方面由于近井附近的重复改造产生了较多的分支裂缝,使得近井地带的裂缝复杂性太高,增加了近井摩阻,抑制了主裂缝的远端延伸以及远端次生裂缝的产生,容易造成砂堵现象。这种重复改造虽然会提高近井地带的压裂效果,但会严重降低裂缝的长度、改造体积以及远井地带的裂缝复杂性,不利于整体压裂效果的提高。

[0015] 为了充分发挥水平井的优势,尽量提高压裂效果,水平井分段多簇压裂要充分考虑到段内多条裂缝同步扩展时产生的应力阻隔效应和应力干扰效应以及由此引起的缝内有效净压力的变化,根据诱导应力对原地应力的反转范围优化射孔簇的位置,避免水平井段内横向重复改造区域和未改造区域的出现,实现各段压裂横向改造区域首尾相连。目前并未有人提出符合水平井分段多簇压裂工况的,以水平井段内各段压裂横向改造区域首尾

相连为目标的射孔簇优化设计方法。

### 发明内容

[0016] 本发明的一个目的是提供一种水平井分段多簇压裂射孔簇位置优化设计方法,这种水平井分段多簇压裂射孔簇位置优化设计方法用于解决目前根据诱导应力反转原地应力场的射孔簇设计方法与实际分段多簇压裂工况不相符,导致水平井段内不同压裂段之间既存在未改造区域又存在重复改造区域的现象。

[0017] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是:这种水平井分段多簇压裂射孔簇位置优化设计方法:

[0018] 步骤一、根据井眼特征及开发要求确定第一压裂段各射孔簇的位置;

[0019] 步骤二、计算由第一压裂段最后一个射孔簇处裂缝产生的诱导应力;

$$[0020] \left\{ \begin{array}{l} \sigma_x^{1e} = p_{net} \left( 1 - \frac{\frac{L}{2c}}{\sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}}} + \frac{\frac{L}{2c}}{4 \left( \sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}} \right)^3} \right) \\ \sigma_y^{1e} = 2p_{net} \nu \left( 1 - \frac{\frac{L}{2c}}{\sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}}} \right) \end{array} \right.$$

[0021] 式中: $\sigma_x^{1e}$ 、 $\sigma_y^{1e}$ 分别为第一压裂段最后一个射孔簇处裂缝在最小水平地应力和最大水平地应力方向产生的诱导应力,MPa; $p_{net}$ 为裂缝净压力,MPa; $L$ 为裂缝中心到该点的水平距离,m; $c$ 为裂缝半高,m; $\nu$ 为岩石泊松比;

[0022] 步骤三、初选第N压裂段第一射孔簇位置;

[0023] 步骤四、计算该射孔簇处裂缝 $N_1$ 相对于靠近第N-1压裂段地层的有效净压力及诱导应力;

[0024] 该射孔簇处裂缝 $N_1$ 相对于靠近第N-1压裂段地层的有效净压力为:

$$[0025] p_{enetl}^{N_1} = p_{net} - \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{ie} (N_1)$$

[0026] 式中: $p_{enetl}^{N_1}$ 为裂缝 $N_1$ 相对于靠近第N-1压裂段地层的有效净压力,MPa; $p_{net}$ 为裂缝 $N_1$ 的原始净压力,MPa; $\sigma_x^{ie} (N_1)$ 为第i压裂段的最后一个射孔簇处裂缝对裂缝 $N_1$ 产生的最小水平地应力方向的诱导应力,MPa;

[0027] 靠近第N-1压裂段地层的诱导应力为:

$$[0028] \quad \begin{cases} \sigma_x'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e} + \sigma_x^{N_1} (p_{enetr}^{N_1}) \\ \sigma_y'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_y^{i_e} + \sigma_y^{N_1} (p_{enetr}^{N_1}) \end{cases}$$

[0029] 式中： $\sigma_x''$ 和 $\sigma_y''$ 分别为该点受到的最小水平地应力和最大水平地应力方向的总诱导应力,MPa； $\sigma_x^{i_e}$ 和 $\sigma_y^{i_e}$ 为第i段压裂最后一个射孔簇处裂缝对该点产生的最小水平地应力和最大水平地应力方向的诱导应力,MPa； $\sigma_x^{N_1}(p_{enetr}^{N_1})$ 和 $\sigma_y^{N_1}(p_{enetr}^{N_1})$ 分别为裂缝 $N_1$ 对该点地层产生的最小水平地应力和最大水平地应力方向的诱导应力,MPa。

[0030] 步骤五、根据诱导应力和原地应力分析该射孔簇与第N-1压裂段最后一个射孔簇裂缝横向改造范围的关系,若有未改造段,缩短该射孔簇与第N-1压裂段最后一个射孔簇的距离；若有重复改造段,增加该射孔簇与第N-1压裂段最后一个射孔簇的距离；

[0031] 步骤六、重复步骤四~五,直至该射孔簇与第N-1压裂段最后一个射孔簇裂缝横向改造范围首尾相连；

[0032] 步骤七、初选下一射孔簇位置；

[0033] 步骤八、计算两相邻射孔簇处裂缝相对于中间地层的有效净压力及诱导应力；

[0034] 两相邻射孔簇处裂缝 $N_j$ 、 $N_{j+1}$ 相对于中间地层的有效净压力可通过下式求解

$$[0035] \quad \begin{cases} \sigma_x^{N_{j+1}}(p_{enetr}^{N_{j+1}}, N_j) + \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e}(N_j) + p_{enetr}^{N_j} = p_{net} \\ \sigma_x^{N_j}(p_{enetr}^{N_j}, N_{j+1}) + \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e}(N_{j+1}) + p_{enetr}^{N_{j+1}} = p_{net} \end{cases}$$

[0036] 式中： $\sigma_x^{N_{j+1}}(p_{enetr}^{N_{j+1}}, N_j)$ 为裂缝 $N_{j+1}$ 对裂缝 $N_j$ 产生的最小水平地应力方向诱导应力,MPa； $p_{enetr}^{N_{j+1}}$ 为裂缝 $N_{j+1}$ 相对于其左侧地层的有效净压力,MPa； $\sigma_x^{i_e}(N_j)$ 为第i压裂段的最后一个射孔簇处裂缝对裂缝 $N_j$ 产生的最小水平地应力方向诱导应力,MPa； $\sigma_x^{N_j}(p_{enetr}^{N_j}, N_{j+1})$ 为裂缝 $N_j$ 对裂缝 $N_{j+1}$ 产生的最小水平地应力方向诱导应力,MPa； $p_{enetr}^{N_j}$ 为裂缝 $N_j$ 相对于其右侧地层的有效净压力,MPa； $\sigma_x^{i_e}(N_{j+1})$ 为第i压裂段的最后一个射孔簇处裂缝对裂缝 $N_{j+1}$ 产生的最小水平地应力方向诱导应力,MPa。

[0037] 两相邻射孔簇处裂缝 $N_j$ 、 $N_{j+1}$ 中间地层的诱导应力为：

$$[0038] \quad \begin{cases} \sigma_x'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e} + \sigma_x^{N_j} (p_{enetr}^{N_j}) + \sigma_x^{N_{j+1}} (p_{enetr}^{N_{j+1}}) \\ \sigma_y'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_y^{i_e} + \sigma_y^{N_j} (p_{enetr}^{N_j}) + \sigma_y^{N_{j+1}} (p_{enetr}^{N_{j+1}}) \end{cases}$$

[0039] 式中： $\sigma_x^{N_j} (p_{enetr}^{N_j})$ 和 $\sigma_y^{N_j} (p_{enetr}^{N_j})$ 分别为裂缝 $N_j$ 对该点产生的最小水平地应力和最大水平地应力方向的诱导应力,MPa； $\sigma_x^{N_{j+1}} (p_{enetr}^{N_{j+1}})$ 和 $\sigma_y^{N_{j+1}} (p_{enetr}^{N_{j+1}})$ 分别为裂缝 $N_{j+1}$ 对该点产生的最小水平地应力和最大水平地应力方向的诱导应力,MPa；

[0040] 步骤九、根据诱导应力和原地应力分析该射孔簇裂缝与上一射孔簇裂缝横向改造范围的关系,若有未改造段,缩短该射孔簇与上一射孔簇的距离;若有重复改造段,增加该射孔簇与上一射孔簇的距离。

[0041] 步骤十、重复步骤八~九,直至本射孔簇裂缝与上一射孔簇裂缝横向改造范围首尾相连, $j=j+1$ ;

[0042] 步骤十一、重复步骤七~十,直至满足第 $N$ 压裂段射孔簇个数设计的要求;

[0043] 步骤十二、计算第 $N$ 压裂段最后一个射孔簇处裂缝相对于靠近第 $N+1$ 压裂段地层的有效净压力及诱导应力;

[0044] 第 $N$ 压裂段最后一个射孔簇处裂缝相对于靠近第 $N+1$ 压裂段地层的有效净压力为:

$$[0045] \quad p_{enetr}^{N_e} = p_{net} - \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e} (N_e)$$

[0046] 式中： $p_{enetr}^{N_e}$ 为第 $N+1$ 压裂段最后一个射孔簇处裂缝相对于靠近第 $N+1$ 压裂段地层的有效净压力,MPa； $\sigma_x^{i_e} (N_e)$ 为第 $i$ 段压裂的最后一个射孔簇处裂缝对第 $N$ 压裂段最后一个射孔簇处裂缝产生的最小水平地应力方向诱导应力,MPa;

[0047] 靠近第 $N+1$ 压裂段地层的诱导应力为:

$$[0048] \quad \begin{cases} \sigma_x'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e} + \sigma_x^{N_e} (p_{enetr}^{N_e}) \\ \sigma_y'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_y^{i_e} + \sigma_y^{N_e} (p_{enetr}^{N_e}) \end{cases}$$

[0049] 式中： $\sigma_x^{N_e} (p_{enetr}^{N_e})$ 和 $\sigma_y^{N_e} (p_{enetr}^{N_e})$ 分别为第 $N$ 压裂段最后一个射孔簇处裂缝对靠近第 $N+1$ 压裂段地层产生的最小水平地应力和最大水平地应力方向的诱导应力,MPa;

[0050] 步骤十三、 $N=N+1$ ,重复步骤三~十二,直至满足本井水平段改造长度的要求。

[0051] 本发明具有以下有益效果:

[0052] 1、本发明考虑了水平井分段多簇压裂段内多条裂缝同步扩展时裂缝间的应力阻隔效应和应力干扰效应,更为符合分段多簇压裂的实际工况。

[0053] 2、本发明考虑了先压裂缝以及多条裂缝同步扩展时的应力干扰作用对缝

[0054] 内有效净压力及诱导应力的影响,计算结果更为准确。

[0055] 3、根据本发明得出的水平井分段多簇压裂射孔簇位置的优化结果,能够防止各压裂段之间重复改造现象的发生,提高压裂效率,降低近井地带砂堵的风险;

[0056] 4、根据本发明得出的水平井分段多簇压裂射孔簇位置的优化结果,能够避免水平井段内横向未改造现象的发生,充分发挥利用水平井的优势,提高压裂效果;

[0057] 5、根据本发明提出的分段多簇压裂诱导应力的计算方法,能够对非常规低渗透储层压裂效果评价提供一定的理论依据。

### 具体实施方式

[0058] 下面对本发明作进一步的说明:

[0059] 这种水平井分段多簇压裂射孔簇位置优化设计方法:

[0060] 步骤一、根据井眼特征及开发要求确定第一压裂段各射孔簇的位置。

[0061] 步骤二、计算由第一压裂段最后一个射孔簇处裂缝产生的诱导应力。

$$[0062] \left\{ \begin{array}{l} \sigma_x^{1e} = p_{net} \left( 1 - \frac{\frac{L}{2c}}{\sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}}} + \frac{\frac{L}{2c}}{4 \left( \sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}} \right)^3} \right) \\ \sigma_y^{1e} = 2p_{net} \nu \left( 1 - \frac{\frac{L}{2c}}{\sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}}} \right) \end{array} \right.$$

[0063] 式中: $\sigma_x^{1e}$ 、 $\sigma_y^{1e}$ 分别为第一压裂段最后一个射孔簇处裂缝在最小水平地应力和最大水平地应力方向产生的诱导应力,MPa; $p_{net}$ 为裂缝净压力,MPa; $L$ 为裂缝中心到该点的水平距离,m; $c$ 为裂缝半高,m; $\nu$ 为岩石泊松比。

[0064] 步骤三、初选下一压裂段即第N压裂段第一射孔簇位置,N的起始值为2。

[0065] 步骤四、计算该射孔簇处裂缝 $N_1$ 相对于靠近第N-1压裂段地层的有效净压力及诱导应力。

[0066] 该射孔簇处裂缝 $N_1$ 相对于靠近第N-1压裂段地层的有效净压力为

$$[0067] \quad p_{enetr}^{N_1} = p_{net} - \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e} (N_1)$$

[0068] 式中： $p_{enetr}^{N_1}$ 为裂缝 $N_1$ 相对于靠近第 $N-1$ 压裂段地层的有效净压力,MPa; $p_{net}$ 为裂缝 $N_1$ 的原始净压力,MPa; $\sigma_x^{i_e} (N_1)$ 为第 $i$ 压裂段的最后一个射孔簇处裂缝对裂缝 $N_1$ 产生的最小水平地应力方向的诱导应力,MPa。第 $i$ 压裂段是指自第 $N-1$ 压裂段至第一压裂段中的任意一个压裂段。

[0069] 靠近第 $N-1$ 压裂段地层的诱导应力为

$$[0070] \quad \begin{cases} \sigma_x'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e} + \sigma_x^{N_1} (p_{enetr}^{N_1}) \\ \sigma_y'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_y^{i_e} + \sigma_y^{N_1} (p_{enetr}^{N_1}) \end{cases}$$

[0071] 式中： $\sigma_x''$ 和 $\sigma_y''$ 分别为该点受到的最小水平地应力和最大水平地应力方向的总诱导应力,MPa; $\sigma_x^{i_e}$ 和 $\sigma_y^{i_e}$ 为第 $i$ 段压裂最后一个射孔簇处裂缝对该点产生的最小水平地应力和最大水平地应力方向的诱导应力,MPa; $\sigma_x^{N_1} (p_{enetr}^{N_1})$ 和 $\sigma_y^{N_1} (p_{enetr}^{N_1})$ 分别为裂缝 $N_1$ 对该点地层产生的最小水平地应力和最大水平地应力方向的诱导应力,MPa。

[0072] 步骤五、根据诱导应力和原地应力分析该射孔簇裂缝与第 $N-1$ 压裂段最后一个射孔簇裂缝横向改造范围的关系,若有未改造段,缩短该射孔簇与第 $N-1$ 压裂段最后一个射孔簇的距离;若有重复改造段,增加该射孔簇与第 $N-1$ 压裂段最后一个射孔簇的距离。

[0073] 步骤六、重复步骤四~五,直至该射孔簇裂缝与第 $N-1$ 压裂段最后一个射孔簇裂缝横向改造范围首尾相连。

[0074] 步骤七、初选下一射孔簇位置。

[0075] 步骤八、计算两相邻射孔簇处裂缝相对于中间地层的有效净压力及诱导应力。

[0076] 两相邻射孔簇处裂缝 $N_j$ 、 $N_{j+1}$ 相对于中间地层的有效净压力可通过下式求解

$$[0077] \quad \begin{cases} \sigma_x^{N_{j+1}} (p_{enetr}^{N_{j+1}}, N_j) + \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e} (N_j) + p_{enetr}^{N_j} = p_{net} \\ \sigma_x^{N_j} (p_{enetr}^{N_j}, N_{j+1}) + \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e} (N_{j+1}) + p_{enetr}^{N_{j+1}} = p_{net} \end{cases}$$

[0078] 式中： $\sigma_x^{N_{j+1}} (p_{enetr}^{N_{j+1}}, N_j)$ 为裂缝 $N_{j+1}$ 对裂缝 $N_j$ 产生的最小水平地应力方向诱导应

力,MPa;  $p_{enetr}^{N_{j+1}}$  为裂缝 $N_{j+1}$ 相对于其左侧地层的有效净压力,MPa;  $\sigma_x^{i_e}(N_j)$  为第 $i$ 压裂段的最后一个射孔簇处裂缝对裂缝 $N_j$ 产生的最小水平地应力方向诱导应力,MPa;  $\sigma_x^{N_j}(p_{enetr}^{N_j}, N_{j+1})$  为裂缝 $N_j$ 对裂缝 $N_{j+1}$ 产生的最小水平地应力方向诱导应力,MPa;  $p_{enetr}^{N_j}$  为裂缝 $N_j$ 相对于其右侧地层的有效净压力,MPa;  $\sigma_x^{i_e}(N_{j+1})$  为第 $i$ 压裂段的最后一个射孔簇处裂缝对裂缝 $N_{j+1}$ 产生的最小水平地应力方向诱导应力,MPa,  $j$ 的起始值为1。

[0079] 两相邻射孔簇处裂缝 $N_j$ 、 $N_{j+1}$ 中间地层的诱导应力为:

$$[0080] \quad \begin{cases} \sigma_x^* = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e} + \sigma_x^{N_j}(p_{enetr}^{N_j}) + \sigma_x^{N_{j+1}}(p_{enetr}^{N_{j+1}}) \\ \sigma_y^* = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_y^{i_e} + \sigma_y^{N_j}(p_{enetr}^{N_j}) + \sigma_y^{N_{j+1}}(p_{enetr}^{N_{j+1}}) \end{cases}$$

[0081] 式中:  $\sigma_x^{N_j}(p_{enetr}^{N_j})$  和  $\sigma_y^{N_j}(p_{enetr}^{N_j})$  分别为裂缝 $N_j$ 对该点产生的最小水平地应力和最大水平地应力方向的诱导应力,MPa;  $\sigma_x^{N_{j+1}}(p_{enetr}^{N_{j+1}})$  和  $\sigma_y^{N_{j+1}}(p_{enetr}^{N_{j+1}})$  分别为裂缝 $N_{j+1}$ 对该点产生的最小水平地应力和最大水平地应力方向的诱导应力,MPa。

[0082] 步骤九、根据诱导应力和原地应力分析该射孔簇裂缝与上一射孔簇裂缝横向改造范围的关系,若有未改造段,缩短该射孔簇与上一射孔簇的距离;若有重复改造段,增加该射孔簇与上一射孔簇的距离。

[0083] 步骤十、重复步骤八~九,直至本射孔簇裂缝与上一射孔簇裂缝横向改造范围首尾相连,  $j = j+1$ 。

[0084] 步骤十一、重复步骤七~十,直至满足第 $N$ 压裂段射孔簇个数设计的要求。

[0085] 步骤十二、计算第 $N$ 压裂段最后一个射孔簇处裂缝相对于靠近第 $N+1$ 压裂段地层的有效净压力及诱导应力。

[0086] 第 $N$ 压裂段最后一个射孔簇处裂缝相对于靠近第 $N+1$ 压裂段地层的有效净压力为

$$[0087] \quad p_{enetr}^{N_e} = p_{net} - \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e}(N_e)$$

[0088] 式中:  $p_{enetr}^{N_e}$  为第 $N+1$ 压裂段最后一个射孔簇处裂缝相对于靠近第 $N+1$ 压裂段地层的有效净压力,MPa;  $\sigma_x^{i_e}(N_e)$  为第 $i$ 段压裂的最后一个射孔簇处裂缝对第 $N$ 压裂段最后一个射孔簇处裂缝产生的最小水平地应力方向诱导应力,MPa。

[0089] 靠近第 $N+1$ 压裂段地层的诱导应力为

$$[0090] \quad \begin{cases} \sigma_x'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_e} + \sigma_x^{N_e} \left( p_{enetr}^{N_e} \right) \\ \sigma_y'' = \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_y^{i_e} + \sigma_y^{N_e} \left( p_{enetr}^{N_e} \right) \end{cases}$$

[0091] 式中： $\sigma_x^{N_e} \left( p_{enetr}^{N_e} \right)$ 和 $\sigma_y^{N_e} \left( p_{enetr}^{N_e} \right)$ 分别为第N压裂段最后一个射孔簇处裂缝对靠近第N+1压裂段地层产生的最小水平地应力和最大水平地应力方向的诱导应力，MPa。

[0092] 步骤十三、 $N=N+1$ ，重复步骤三~十二，直至满足本井水平段改造长度的要求。

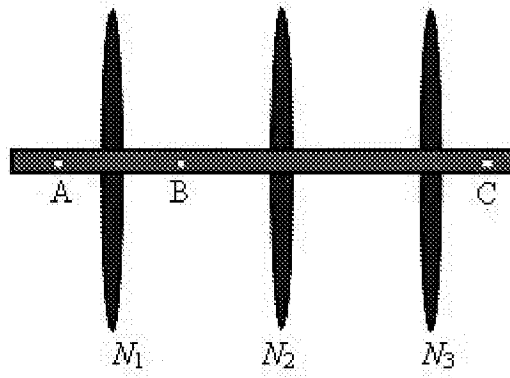


图1