

水平井分段多簇压裂各射孔簇 破裂压力分析

冯福平 雷 扬 胡超洋 韩 旭 黄 芮

东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318

摘 要: 为了提高水平井分段多簇压裂射孔簇的起裂效率, 针对段内多条裂缝同步扩展的特点, 考虑裂缝间的应力阻隔效应以及缝内有效净压力的变化, 根据待压段的诱导应力建立了不同射孔簇破裂压力计算模型, 并分析了各射孔簇破裂压力的变化规律。通过研究得出认识: 水平井分段多簇压裂多条裂缝同步扩展时存在应力阻隔效应, 待压段受到的诱导应力为之前各段最后一簇裂缝内有效净压力产生的诱导应力的叠加; 距离上一段压裂位置最远的射孔簇破裂压力最低, 段内多射孔簇间的破裂压力差异随着时间的延长而增大, 多簇起裂的最好时机是在施工初期, 可在短时间内迅速提高排量, 利用射孔孔眼的节流效应提高井底压力, 实现多簇裂缝的依次起裂; 段内较小的应力变化会引起较大的破裂压力差异, 诱导应力引起的各射孔簇破裂压力的变化在射孔参数设计和压裂参数优化时必须得到重视。

关键词: 分段多簇压裂; 破裂压力; 应力阻隔; 诱导应力; 有效净压力

DOI: 10. 3969 /j. issn. 1006 - 5539. 2017. 03. 016

Analysis on Breakdown Pressure of Perforation Clusters in Horizontal Well Staged Multi-Cluster Fracturing

Feng Fuping, Lei Yang, Hu Chaoyang, Han Xu, Huang Rui

Institute of Petroleum Engineering of Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang, 163318, China

Abstract: In order to enhance the breakdown efficiency of perforation clusters in the process of staged multi-cluster fracturing in horizontal wells, a breakdown pressure calculation model of perforation clusters is established according to the induced stress of fracturing stage, the varying law of breakdown pressure of perforation cluster is analyzed based on the formation characteristics of multi-fracture synchronous extension in view of the stress resistance and effective net pressure between fractures. The results show that stress resistance exists while multi-fracture is extending synchronously in the process of staged multi-cluster fracturing in horizontal wells, the induced stress generated by the effective net pressure in last fracture of ahead stages will add up to the stage which to be fractured; perforation cluster furthest from the last fracture position has the minimum breakdown pressure, the difference between breakdown pressure of perforation clusters will increase with the extension of time, it is the best time to break all the perforation clusters at

收稿日期: 2017 - 3 - 13

基金项目: 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划。(UNPYSCT - 2016127)

作者简介: 冯福平(1982 -), 男, 河北遵化人, 副教授, 博士, 主要从事油气井工程力学方面的教学和科研工作。

the early time of fracturing. The pump rate should be increased immediately to increase the bottom hole pressure by using the throttling effect of perforation; Big difference of breakdown pressure can be caused by little stress changing, so the change of breakdown pressure of perforation clusters which caused by induced stress must be paid more attention in perforation parameters design and fracturing parameters optimization.

Keywords: Staged multi-cluster fracturing; Breakdown pressure; Stress resistance; Induced stress; Effective net pressure

水平井分段多簇压裂技术是非常规致密储层有效开发的主要手段,该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^[1-3]。分段多簇压裂过程中,由于岩石物性、原地应力的差异以及先压裂缝诱导应力的影响,每个射孔簇的破裂压力各不相同,同一压裂段内的各簇裂缝很难同时起裂^[4-5]。而且一旦部分射孔簇率先起裂,会在未起裂的射孔簇位置产生额外的诱导应力,进一步增大未起裂射孔簇的破裂压力,随着时间的延长未起裂射孔簇会更难起裂,最终导致压裂簇失效^[6-8],Camron M 等人^[9]对 100 多口页岩气井的生产测井数据也证明了大约有 1/3 的射孔簇由于未能起裂而对产能无贡献。分段多簇压裂过程中,各簇起裂的最好时机是在施工初期,此时通过快速提高施工排量,根据限流法压裂的基本原理,利用射孔孔眼节流的摩阻作用提高井底压力,短时间内依次压开未破裂的射孔簇,从而实现多簇裂缝的起裂和扩展^[4,10]。

分段多簇压裂各射孔簇破裂压力的确定是限流法压裂射孔孔眼设计以及施工参数确定的基本依据,Hossain M M 等人^[11-12]分别建立了水平井裸眼完井和射孔完井条件下的破裂压力预测模型,同时考虑到多级压裂先压裂缝诱导应力场的影响,多名学者分别建立了考虑诱导应力影响的水平井破裂压力计算模型^[5,13],为水平井分段压裂设计提供了有效的指导。但是这些研究均认为待压裂射孔簇受到的诱导应力为之前所有先压裂缝诱导应力的叠加,这种应力叠加原理适用于水平井分段单簇压裂的工况,即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^[14-19]。这一工况过程与水平井分段多簇压裂存在较大区别,分段多簇压裂时同一段内多个射孔簇的裂缝同步扩展,多条裂缝同步扩展时存在应力阻隔效应,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。本文根据水平井分段多簇压裂段内多条裂缝同步扩展的形成特点,考虑多条裂缝扩展时的应力阻隔效应以及缝内有效净压力的变化,根据待压裂段的诱导应力建立了段内不同射孔簇破裂压力计算模型,并分析了各射孔

簇破裂压力的变化规律,从而为水平井分段多簇压裂射孔参数的设计以及压裂参数的优化提供基本的理论依据。

1 分段单簇压裂诱导应力分布模型

1.1 单条裂缝诱导应力场分布

水力压裂过程中裂缝内的流体压力会在周围地层产生诱导应力,从而改变裂缝周围的原地应力场分布。假设裂缝的断面为椭圆形,水平井井筒方向为 x 轴(最小水平地应力方向),缝长方向为 y 轴(最大水平地应力方向),缝高方向为 z 轴(垂向地应力方向),单条裂缝诱导应力场分析几何模型见图 1。以均质、各向同性的二维平面应变模型为基础,根据弹性力学理论可得单条裂缝在 x 轴上某点产生的诱导应力模型为

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

式中: σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为裂缝在最小水平地应力、最大水平地应力和垂向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距离,m; c 为裂缝半高,m; v 为岩石泊松比。

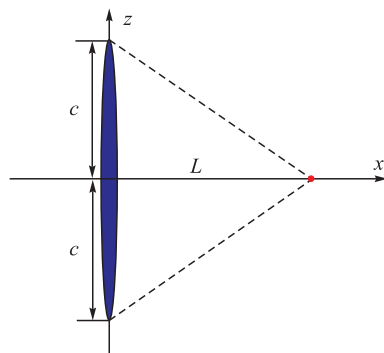


图 1 单条裂缝诱导应力场分析几何模型图

1.2 分段单簇压裂诱导应力

水平井分段单簇压裂过程中,各段内单条裂缝先后依次扩展,每一条裂缝均会在待压段产生诱导应力。在第 N 段压裂过程中,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,其表达式为

$$p_{\text{enet}}^N = p_{\text{net}} - \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^i(N) \quad (2)$$

式中: p_{enet}^N 为第 N 段裂缝内的有效净压力,MPa; p_{net} 为第 N 段裂缝的原始净压力,MPa; $\sigma_x^i(N)$ 为第 i 段压裂在第 N 段裂缝处产生的最小水平地应力方向的诱导应力,MPa。

则第 N 段裂缝在周围地层中产生的诱导应力为

$$\begin{cases} \sigma_x^N = p_{\text{enet}}^N \left(1 - \frac{\frac{L}{2c}}{\sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}}} + \frac{\frac{L}{2c}}{4\left(\sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}}\right)^3} \right) \\ \sigma_y^N = \nu(\sigma_x^N + \sigma_z^N) \\ \sigma_z^N = p_{\text{enet}}^N \left(1 - \frac{\frac{L}{2c}}{\sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}}} - \frac{\frac{L}{2c}}{4\left(\sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}}\right)^3} \right) \end{cases} \quad (3)$$

则待压裂段(第 $N+1$ 段)地层受到的总诱导应力可通过各段裂缝在该点产生的诱导应力叠加求得

$$\begin{cases} \sigma'_x = \sum_{i=1}^N \sigma_x^i \\ \sigma'_y = \sum_{i=1}^N \sigma_y^i \\ \sigma'_z = \sum_{i=1}^N \sigma_z^i \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ'_x 、 σ'_y 和 σ'_z 分别为第 N 段压裂后待压裂段地层受到的最小水平地应力、最大水平地应力和垂向地应力方向的总诱导应力,MPa; σ_x^i 、 σ_y^i 和 σ_z^i 分别为第 i 段压裂对待压裂段地层产生的最小水平地应力、最大水平地应力和垂向地应力方向的诱导应力,MPa。

2 分段多簇压裂诱导应力分布模型

2.1 多条裂缝间应力阻隔效应分析

水平井分段多簇压裂相对于分段单簇压裂来说,同一段内存在多条裂缝,多条裂缝在不同的应力条件下会

由于相互吸引或排斥造成弯曲,同时各射孔簇裂缝的扩展规模也存在差异^[20-22]。为了将问题简化,假设每段内各射孔簇形成尺寸相同且均与井筒垂直的平行裂缝,见图 2。

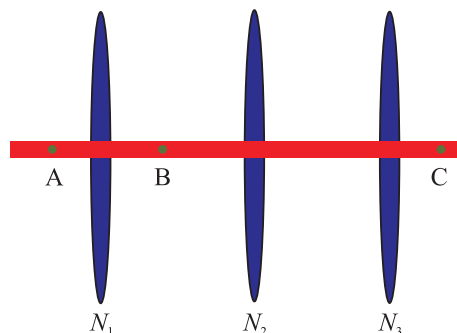


图 2 分段多簇压裂裂缝形态图

以第 N 段压裂为例,压裂过程中 3 个射孔簇的裂缝 N_1 、 N_2 、 N_3 同步延伸,由于 N_1 、 N_2 、 N_3 3 条裂缝并不是依次形成的,此时第 N 压裂段内的 3 条裂缝间存在应力阻隔效应。

第 N 段压裂过程中,由于 N_1 、 N_2 、 N_3 3 条裂缝同步延伸扩展,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。翁定为等人^[23]分别进行了单缝和双缝(缝间距分别为 10、20、40、50 m)条件下缝外诱导应力分布的数值模拟,通过模拟发现单缝和双缝不同缝间距条件下缝外应力反转半径分别为 49.9、50、50、51、50 m,即无论是单缝还是双缝,缝外诱导应力的分布基本一致,这也说明了多条裂缝同步扩展时,某点受到的诱导应力只与其相邻的裂缝有关,其他裂缝产生的诱导应力由于受到其相邻裂缝的阻隔作用,并不会在该点产生诱导应力。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相邻的两个射孔簇裂缝叠加形成;段内缝外靠近下一压裂段的诱导应力由最后一个射孔簇的裂缝产生。由此可知,待压裂段内各点受到的诱导应力为之前各段最后一个射孔簇裂缝产生的诱导应力的叠加。

2.2 多簇压裂诱导应力场计算模型

2.2.1 多簇压裂最后一簇裂缝有效净压力

由以上分析可知,分段多簇压裂多条裂缝同步扩展时由于裂缝间的应力阻隔效应,只有最后一个射孔簇裂缝能够对待压裂段地层产生诱导应力,因此只需要计算各段最后一个射孔簇裂缝相对于待压裂段的有效净压力即可。

第 $N+1$ 段(待压裂段)地层只受到裂缝 N_3 诱导应力的影响,裂缝 N_3 相对于 $N+1$ 段地层的有效净压力为

$$p_{\text{enetr}}^{N_3} = p_{\text{net}} - \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_x^{i_3}(N_3) \quad (5)$$

式中: $p_{\text{enetr}}^{N_3}$ 为裂缝 N_3 相对于 $N+1$ 段地层的有效净压力,MPa; $\sigma_x^{i_3}(N_3)$ 为第 i 级压裂的第 3 射孔簇裂缝对裂缝 N_3 产生的最小水平地应力方向的诱导应力,MPa。

2.2.2 分段多簇压裂诱导应力场分布

第 N 段压裂在第 $N+1$ 段地层产生的诱导应力为

$$\begin{cases} \sigma_x^{N_3} = p_{\text{enetr}}^{N_3} \left(1 - \frac{\frac{L}{2c}}{\sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}}} + \frac{\frac{L}{2c}}{4\left(\sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}}\right)^3} \right) \\ \sigma_y^{N_3} = \nu(\sigma_x^{N_3} + \sigma_z^{N_3}) \\ \sigma_z^{N_3} = p_{\text{enetr}}^{N_3} \left(1 - \frac{\frac{L}{2c}}{\sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}}} - \frac{\frac{L}{2c}}{4\left(\sqrt{\left(\frac{L}{2c}\right)^2 + \frac{1}{4}}\right)^3} \right) \end{cases} \quad (6)$$

$$p_{90} = \frac{(6\nu - 3)(\sigma_H + \sigma_y^{N_3}) + (1 - 6\nu)(\sigma_v + \sigma_z^{N_3}) + 3(\sigma_h + \sigma_x^{N_3}) + (3K - a)p_p + \sigma_t}{3K} \quad (8)$$

其中 $K = \delta \left[\frac{a(1-2\nu)}{(1-\nu)} - \varphi \right]$ 。

$$p_{90} = \frac{(6\nu - 3)(\sigma_v + \sigma_z^{N_3}) + (1 - 6\nu)(\sigma_H + \sigma_y^{N_3}) + 3(\sigma_h + \sigma_x^{N_3}) + (3K - a)p_p + \sigma_t}{3K} \quad (9)$$

式中: ν 为泊松比; σ_v 为垂向地应力,MPa; σ_H 为最大水平地应力,MPa; σ_h 为最小水平地应力,MPa; p_p 为地层压力,MPa; σ_t 为岩石抗张强度,MPa; δ 为渗透性系数,地层可渗透时 $\delta = 1$,地层不可渗透时 $\delta = 0$; φ 为岩石的孔隙度; α 为 Biot 系数。

实际射孔簇破裂压力为二者之间的最小值,即 $p_f = \min(p_{90}, p_{90})$ 。

表 1 计算基本参数表

σ_t /MPa	σ_H /MPa	σ_v /MPa	ν	p_p /MPa	σ_t /MPa	δ	φ	α
60.5	69.8	71	0.3	35	1.8	1	0.11	0.6

第 $N+1$ 段压裂之前段内地层受到的诱导应力为之前 N 段压裂第 3 射孔簇裂缝对该段产生的诱导应力之和,即

$$\begin{cases} \sigma_x'' = \sum_{i=1}^N \sigma_x^{i_3} \\ \sigma_y'' = \sum_{i=1}^N \sigma_y^{i_3} \\ \sigma_z'' = \sum_{i=1}^N \sigma_z^{i_3} \end{cases} \quad (7)$$

式中: σ_x'' 、 σ_y'' 和 σ_z'' 分别为第 $N+1$ 段压裂之前该段内地层受到的最小水平地应力、最大水平地应力和垂向地应力方向的总诱导应力,MPa; $\sigma_x^{i_3}$ 、 $\sigma_y^{i_3}$ 和 $\sigma_z^{i_3}$ 为第 i 段压裂第 3 射孔簇裂缝对第 $N+1$ 段地层产生的最小水平地应力、最大水平地应力和垂向地应力方向的诱导应力,MPa。

3 待压段射孔簇破裂压力计算模型

在压裂前井眼周围应力分布计算模型的基础上,结合弹性力学理论和岩石拉伸破裂理论,根据迭加原理,即可得出在井筒内压、复合应力、压裂液渗滤效应以及先压裂缝诱导应力联合作用下的射孔水平井井壁处应力分布及破裂压力计算模型。

当射孔方位沿垂向地应力时,各射孔簇的破裂压力为

射孔方位沿最大水平地应力时,各射孔簇的破裂压力为

4 多簇压裂各射孔簇破裂压力分析

以某井 15 段压裂为例,按照实际射孔位置及缝内净压力参数,对 2-15 段压裂过程中各段内不同射孔簇的破裂压力进行了计算,计算基本参数见表 1,考虑诱导应力影响的各射孔簇破裂压力计算结果见表 2。

表 2 各射孔簇破裂压力计算结果

压裂段数	射孔簇 1	射孔簇 2	射孔簇 3	压裂段数	射孔簇 1	射孔簇 2	射孔簇 3
2	85.83	77.82	73.49	9	81.49	75.03	71.54
3	86.34	77.20	72.50	10	92.06	82.89	77.37
4	81.33	75.52	72.21	11	94.11	82.89	76.89
5	84.39	78.76	75.97	12	96.22	86.62	80.26
6	92.20	81.86	76.00	13	94.44	84.88	78.86
7	95.58	83.83	77.41	14	90.61	82.04	77.16
8	77.87	72.32	69.64	15	98.26	86.38	78.86

由诱导应力分布模型(1)可知,诱导应力随着和裂缝中心距离的增加而减小,由于射孔簇 1 靠近上一段压裂的最后一簇裂缝,因此射孔簇 1 受到的诱导应力最大,其破裂压力也最大,射孔簇 2 和射孔簇 3 随着距离上一段压裂最后一簇裂缝的距离变大,破裂压力逐渐降低。射孔簇 3 距离上一段压裂的位置最远,其破裂压力最低,因此射孔簇 3 最容易起裂形成裂缝,其次为射孔簇 2,最不容易破裂的位置为射孔簇 1。在分段多簇压裂过程中,由于之前压裂裂缝诱导应力的影响,段内各射孔簇的破裂压力存在较大差别,要想实现多射孔簇同时起裂较为困难,而且一旦本段内新裂缝产生以后,又会对未起裂射孔簇产生额外的诱导应力,进一步增大了未起裂射孔簇的破裂压力。分段多簇压裂时各簇的最好破裂时机在施工初期,此时本段内先起裂裂缝的诱导应力较小,随着时间的延长,先起裂裂缝在缝长及缝高方向不断扩展,其所产生的诱导应力不断增加,使得未起裂射孔簇的破裂压力不断增加,若施工后期没有明显的压力上升条件,这些射孔簇将不会起裂形成裂缝。因此分段多簇压裂时,应更加严格地进行射孔孔径以及射孔数量的设计,根据限流法的压裂原理,在短时间内迅速提高排量,利用射孔孔眼节流的摩阻作用提高水平井筒内的压力,从而达到未起裂射孔簇的破裂压力,在短时间内使各射孔簇依次起裂,实现多簇裂缝的起裂和扩展。

图 3 为该井各段内不同射孔簇间的最小水平地应力方向、最大水平地应力方向、垂向地应力方向的诱导应力差以及破裂压力差对比图。从图 3 可以看出,段内各射孔簇最小水平地应力方向的诱导应力差要明显高于最大水平地应力方向以及垂向地应力方向的诱导应力差,各簇最小水平地应力方向的诱导应力差在 2 ~ 6 MPa 之间,而破裂压力差却达到了 8 ~ 20 MPa,说明段内较小的地应力变化都会引起破裂压力的较大改变,从而使得段内各射孔簇破裂压力差异较大,各射孔簇同步起裂比较困难。

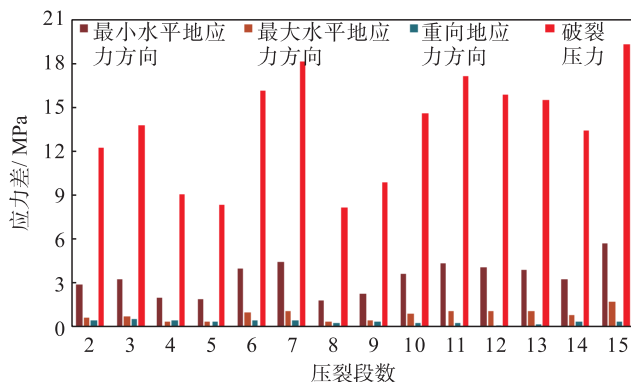


图 3 各射孔簇间应力差对比图

结论

1) 先压裂缝在射孔簇处产生的最小水平地应力方向的诱导应力抵消了一部分缝内净压力,应根据裂缝相对于周围地层的有效净压力来计算其所产生的诱导应力。

2) 水平井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,待压段内地层受到的诱导应力为之前各段最后一簇裂缝产生的诱导应力的叠加,而不是所有裂缝诱导应力的叠加。

3) 距离上一段压裂位置最远的射孔簇破裂压力最低,最不容易破裂的位置为距离上一段压裂位置最近的射孔簇。

4) 分段多簇压裂时各簇的最好破裂时机在施工初期,根据限流法的压裂原理,在短时间内迅速提高排量,利用射孔孔眼节流的摩阻作用提高水平井筒内的压力,从而达到未起裂射孔簇的破裂压力使得各射孔簇依次起裂,实现多簇裂缝的起裂和扩展。

5) 水平井分段多簇压裂段内较小的应力变化会引起破裂压力的较大改变,从而使得段内各射孔簇的破裂压力差异较大,诱导应力引起的各射孔簇破裂压力的变化在进行射孔参数设计和压裂参数优化时必须得到重视。

参考文献:

- [1] 崔庆辉. 水力压裂微地震监测质量监控方法研究[J]. 天然气与石油, 2016, 34(5): 42-44.
Cui Qinghui. Research on Quality Control Method of Hydraulic Fracturing Microseismic Monitoring [J]. Natural Gas and Oil, 2016, 34(5): 42-44.
- [2] Cheng Y M. Mechanical Interaction of Multiple Fractures-exploring Impacts of the Selection of the Spacing /Number of Perforation Clusters on Horizontal Shale-gas Wells [J]. SPE Journal, 2013, 17(4): 992-1001.
- [3] Wu K, Olson J E. Investigation of Critical in Situ and Injection Factors in Multi-fractures: Guidelines for Controlling Fracture Complexity [C] // Paper 163821 Presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 4-6 February, 2013, Woodlands, Texas, USA. New York: SPE, 2013.
- [4] 周再乐, 张广清, 熊文学, 等. 水平井限流压裂射孔参数优化[J]. 断块油气田, 2015, 22(3): 374-378.
Zhou Zaile, Zhang Guangqing, Xiong Wenxue, et al. Performance Parameter Optimization of Limit Entry Fracturing for Horizontal Wells [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(3): 374-378.
- [5] 尚希涛, 何顺利, 刘广峰, 等. 水平井分段压裂破裂压力计算[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(2): 96-100.
Shang Xitao, He Shunli, Liu Guangfeng, et al. Breakdown Pressure Calculation of Staged Fracturing For Horizontal Wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(2): 96-100.
- [6] 朱新春. 泾河油田分段多簇压裂起裂机理分析及参数设计[J]. 断块油气田, 2016, 23(2): 226-229.
Zhu Xinchun. Mechanism and Parameter Design of Segmented Multi-Cluster Fracturing in Jinghe Oilfield [J]. Fault-Block & Gas Field, 2016, 23(2): 226-229.
- [7] 李勇明, 陈曦宇, 赵金洲, 等. 水平井分段多簇压裂缝间干扰研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2016, 38(1): 76-83.
Li Yongming, Chen Xiyu, Zhao Jinzhou, et al. The Effects of Crack Interaction in Multi-Stage Horizontal Fracturing [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2016, 38(1): 76-83.
- [8] 潘林华, 程礼军, 张 焯, 等. 页岩水平井多段分簇压裂起裂压力数值模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3639-3648.
Pan Linhua, Cheng Lijun, Zhang Ye, et al. Numerical Simulation of Fracturing Pressure in Multiple Clusters Staged Hydraulic Fracture of Shale Horizontal Well [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3639-3648.
- [9] Camron M, George W, Erik R. Evaluation of Production Log Data from Horizontal Wells Drilled in Organic Shales [C] // Paper 144326 Presented at the SPE North American Unconventional Gas Conference and Exhibition, 14-16 June, 2011, Woodlands, Texas, USA. New York: SPE, 2011.
- [10] 李海涛, 卢 宇, 谢 斌, 等. 水平井多段分簇射孔优化设计[J]. 特种油气藏, 2016, 23(6): 133-136.
Li Haitao, Lu Yu, Xie Bin, et al. Multi-stage Clustering Perforation Optimization in Horizontal Well [J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2016, 23(6): 133-136.
- [11] Hossain M M, Rahman M K, Rahman S S. A Comprehensive Monograph for Hydraulic Fracture Initiation from Deviated Well Bores under Arbitrary Stress Regimes [C] // Paper 54360 Presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 20-22 April, 1999, Jakarta, Indonesia. New York: SPE, 1999.
- [12] Hossain M M, Rahman M K, Rahman S S. Hydraulic Fracture Initiation and Propagation: Roles of Well-bore Trajectory, Perforation and Stress Regimes [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2000, 27(3): 129-149.
- [13] 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): 87-93.
Guo Tiankui, Zhang Shicheng, Liu Weilai, et al. Initiation Pressure of Multi-stage Fracking for Perforated Horizontal Wells of Gas Reservoirs [J]. Natural Gas Engineering, 2013, 33(12): 87-93.
- [14] 许超兰, 谭 鹏. 尕斯油田薄互层控缝高压裂技术研究[J]. 天然气与石油, 2015, 33(6): 51-54.
Xu Chaolan, Tan Peng. Research on Controlling Slot Height of Fracturing Technology in Thin Interbedded Layer of Gasi Oil Field [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33(6): 51-54.
- [15] 尹 建, 郭建春, 邓 燕. 裂缝干扰下水平井破裂点影响因素分析[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(2): 88-93.
Yin Jian, Guo Jianchun, Deng Yan. Analysis of Influencing Factors for Breakdown Point in Horizontal Wells under Fracture Interference [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(2): 88-93.
- [16] 刘立峰, 冉启全, 王 欣, 等. 致密储层水平井体积压裂段间距优化方法[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(3): 84-87.
Liu Lifeng, Ran Qiquan, Wang Xin, et al. Method of Optimizing The Spacing between Volumetric Fracturing Stages in Horizontal Wells in Tight Reservoir [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(3): 84-87.
- [17] 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. Perforation Spacing Optimization for Stages Fracturing of Horizontal Well [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40 (5): 67 - 71.
- [18] 邵尚奇, 田守增, 李根生, 等. 水平井缝网压裂裂缝间距的优化[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 86 - 90.
- Shao Shangqi, Tian Shouceng, Li Gensheng, et al. Fracturing Spacing Optimization for Fracture-Network Fracturing in Horizontal Wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42 (1): 86 - 90.
- [19] 曾顺鹏, 张国强, 韩家新, 等. 多裂缝应力阴影效应模型及水平井分段压裂优化设计[J]. 天然气工业, 2015, 35(3): 55 - 59.
- Zeng Shunpeng, Zhang Guoqiang, Han Jiabin, et al. Model of Multi-Fracture Stress Shadow Effect and Optimization Design for Staged Fracturing of Horizontal Wells [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35 (3): 55 - 59.
- [20] 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.
- [21] Wu K, Olson J E. A Simplified Three-Dimensional Displacement Discontinuity Method for Multiple Fracture Simulations [J]. International Journal of Fracture, 2015, 193 (2): 191 - 204.
- [22] Wu K, Olson J E. Numerical Investigation of Complex Hydraulic-Fracture Development in Naturally Fractured Reservoirs [C] // Paper 173326 - MS Presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 3 - 5 February, 2015, Woodlands, Texas, USA. New York: SPE, 2015.
- [23] 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.

(上接第 79 页)

- Guo Feng, Tang Hai, Qiu Zigang. Establishment of New Water Drive Characteristic Curve and Application in Xinjiang Oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36 (3): 322 - 325.
- [13] 张 枫, 曹肖萌, 易继贵, 等. 一种评价水驱特征曲线适用性的方法[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3): 423 - 428.
- Zhang Feng, Cao Xiaomeng, Yi Jigui, et al. A Method of Evaluation Suitability of Waterflood Curve [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25 (3): 423 - 428.
- [14] 高文君, 宋成元. 经典水驱油理论对应水驱特征曲线研究[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(3): 307 - 310.
- Gao Wenjun, Song Chengyuan. A Study of Water-Drive Type Curves Corresponding to the Classical Theories for Water Displacing Oil [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35 (3): 307 - 310
- [15] 邓 森, 王怒涛, 饶庆锋, 等. 考虑摩阻损失的水平井长度优化[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(1): 61 - 64.
- Deng Sen, Wang Nutao, Rao Qingfeng, et al. Optimization of the Horizontal Well Length Considering the Friction Loss [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2017, 36 (1): 61 - 64.
- [16] 俞启泰. 水驱特征曲线研究(一)[J]. 新疆石油地质, 1996, 17(4): 364 - 369.
- Yu Qitai. Study on Water Drive Characteristic Curve (1)[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1996, 17 (4): 364 - 369.
- [17] 俞启泰. 水驱特征曲线研究(二)[J]. 新疆石油地质, 1997, 18(1): 62 - 66.
- Yu Qitai. Study on Water Drive Characteristic Curve (2) [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1997, 18 (1): 62 - 66.
- [18] 郑 强, 石 军, 孙 超, 等. 含水率超过 98% 油藏采收率标定方法[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(5): 562 - 565.
- Zheng Qiang, Shi Jun, Sun Chao, et al. Research on Calibration Methods of Recovery Factor for Reservoirs with over 98 % Water Cut [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35 (5): 562 - 565.
- [19] 陈元千, 邹存友, 张 枫. 水驱曲线法在油田开发评价中的应用[J]. 断块油气田, 2011, 18(6): 770 - 771.
- Chen Yuanqian, Zou Cunyou, Zhang Feng. Application of Water Drive Curve Method in Oilfield Development Evaluation [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18 (6): 770 - 771.
- [20] 陈元千, 王惠芝. 丙型水驱曲线的扩展推导及其在埕北油田的应用[J]. 中国海上油气, 2004, 16(6): 392 - 394.
- Chen Yuanqian, Wang Huizhi. An Extended Derivation of Type C Water Drive Curve and Its Application in Chengbei Oilfield [J]. China Offshore Oil and Gas, 2004, 16 (6): 392 - 394.