

引用格式:侯静.致密油水平井多簇裂缝扩展数值模拟研究[J].油气地质与采收率,2024,31(3):137-146.
HOU Jing.Numerical simulation studies on multi-cluster fracture propagation in tight-oil horizontal wells[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2024,31(3):137-146.

致密油水平井多簇裂缝扩展数值模拟研究

侯静^{1,2,3}

(1.中国石油大庆油田有限责任公司采油工艺研究院,黑龙江大庆163453;2.黑龙江省油气藏增产增注重点实验室,黑龙江大庆163453;3.多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室,黑龙江大庆163453)

摘要:大庆油田致密油水平井近年来主要采用密切割布缝进行压裂改造,多簇裂缝扩展将产生诱导应力,从而导致各簇裂缝延伸均匀程度不一致。为此,采用有限元软件ABAQUS建立了大庆油田致密油水平井多簇裂缝扩展数值模型,采用扩展有限元(XFEM)模拟方法,研究了2个布缝参数(簇距、段内簇数)、3个压裂施工参数(压裂工艺、施工排量及液体黏度)对裂缝扩展的影响。同时对比分析模拟结果与矿场实际光纤测试的各簇产能贡献结果,发现模拟的各簇裂缝长度与各簇的产油贡献具有很好的一致性,证实了模拟结果的正确性。模拟结果表明:当簇距缩小至5 m时,各簇应力干扰明显,不利于裂缝扩展,当簇距达到10 m及以上时,平均单簇裂缝半长变化不明显,合理簇距约为10 m。平均单簇裂缝半长随段内簇数的增加呈增大趋势,但非均匀延伸程度也随之增大;与桥塞段内多簇同时改造相比,连续油管单簇依次改造模式更有利于裂缝延伸;平均单簇裂缝半长随施工排量的升高呈增大趋势,提高施工排量还能促进裂缝均匀延伸。平均单簇裂缝半长随液体黏度的升高呈增大趋势,可适当提高高黏液体比例。

关键词:致密油;水平井;裂缝扩展;扩展有限元;大庆油田

文章编号:1009-9603(2024)03-0137-10

DOI:10.13673/j.pgre.202311006

中图分类号:TE319

文献标识码:A

Numerical simulation studies on multi-cluster fracture propagation in tight-oil horizontal wells

HOU Jing^{1,2,3}

(1.Research Institute of Oil Production Engineering of Daqing Oilfield Co. Ltd., Daqing City, Heilongjiang Province, 163453, China; 2.Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Stimulation, Daqing City, Heilongjiang Province, 163453, China; 3.National Key Laboratory for Multi-resource Collaborated Green Development of Continental Shale Oil, Daqing City, Heilongjiang Province, 163453, China)

Abstract: In recent years, tight oil horizontal wells in Daqing oilfield are mainly fractured by close cutting. However, the multi-cluster fracture propagation generates induced stress, which leads to uneven fracture extension in each cluster. To this end, the finite element software ABAQUS was used to establish the numerical model of multi-cluster fracture propagation in horizontal wells in Daqing tight-oil reservoir. The effects of two fracture parameters (cluster spacing, clusters within one fracturing stage) and three construction parameters (fracturing processes, construction displacement, and liquid viscosity) on fracture propagation were studied by the extended finite element (XFEM) simulation method. At the same time, it is found that there is a good consistency between the simulated fracture length of each cluster and the oil production contribution of each cluster when the simulated result is compared with the capacity contribution result of each cluster tested by actual optical fiber in the field. This confirms the correctness of the simulation results. The simulation results show that the stress interference of each cluster is obvious when the cluster spacing

收稿日期:2023-11-18。

作者简介:侯静(1982—),女,黑龙江大庆人,工程师,从事采油工程研究工作。E-mail:houjing@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油勘探与生产分公司科技项目“大庆水平井体积改造技术提升攻关与现场试验”(2022ZS0606)。

is reduced to 5 m, which is not conducive to fracture propagation. The mean fracture half-length of a single cluster does not change significantly when the cluster spacing reaches 10 m or more, and the reasonable cluster distance is about 10 m. The fracture half-length increases with increased clusters within one fracturing stage, but the non-uniform extension also becomes obvious. Compared with the simultaneous stimulation of multiple clusters in the bridge plug stage, the coiled tubing single-cluster stimulation mode is more favorable to fracture propagation. The average half-length of single cluster fractures increases with the rise of the construction displacement, and the uniform extension of fractures can be promoted by increasing the construction displacement. The average fracture half-length of a single cluster rises with the increase of liquid viscosity, and the proportion of high viscous liquid can be increased appropriately.

Key words: tight oil; horizontal well; fracture propagation; extended finite element; Daqing oilfield

大庆油田致密油资源丰富,是油田重要的接替资源,但由于其储层非均质性强、物性差,需要采用压裂进行改造^[1-9]。自2011年开始,大庆油田开始采用水平井体积压裂改造技术对致密油资源进行动用,经过十余年的发展,大庆致密油年产量已占外围油田总产量的15%,为外围油田的持续稳产做出了突出贡献。大庆油田致密油水平井簇距由初期的100 m左右逐步缩至5~10 m左右,段内簇数由早期的2—3簇增至5—6簇为主,施工排量也由早期的10 m³/min提高至14 m³/min。与初期相比,整体布缝参数和施工参数均发生了较大的改变,但在上述条件下致密油水平井多簇裂缝扩展规律仍不明确,亟需研究大庆致密油水平井多簇裂缝扩展规律。

多簇裂缝扩展产生的诱导应力会造成缝间干扰,改变各簇压裂裂缝周围初始应力场的大小及方位,相较于单条压裂裂缝扩展,各簇裂缝在扰动应力场易出现转向及止裂(裂缝扩展停止)的情况,致使段内多簇裂缝呈现非均匀、非对称及复杂裂缝形态^[10]。针对上述多簇压裂裂缝扩展的典型特征,为了进一步量化研究多簇压裂裂缝延伸规律,已进行了广泛研究,目前中外研究主要采用ABAQUS商业软件或者建立相应数值模型进行裂缝形态扩展模拟,其中采用ABAQUS商业软件进行模拟研究包括cohesive单元和扩展有限元(XFEM)2种方法。张汝生等采用cohesive单元模拟了水力压裂扩展过程^[11];张广明等采用cohesive单元进行了水平井水力压裂的三维有限元数值模拟研究^[12];侯雅儒建立了cohesive三维扩展模型,模拟了不同地质和工程因素对裂缝起裂压力的影响^[13];曲占庆等采用扩展有限元方法进行数值模拟,分析了段内2—3簇布缝不同缝间距、缝长、水平应力差对裂缝扩展的影响^[14];杨兆中等分别建立了多簇裂缝扩展数值模型和方程组,重点分析了不同簇距、缝长及导流能力对多簇裂缝扩展的影响^[15-17]。

以上研究对致密油水平井压裂优化设计提供了一定指导,但仍存在以下局限性:一是cohesive黏聚单元研究方法需要预制裂缝延伸路径^[18-20],无法模拟裂缝受应力干扰而发生偏转,与实际裂缝延伸存在一定偏差;二是前期扩展有限元方法裂缝扩展数值模型重点分析了布缝参数对多簇裂缝扩展的影响,未同时系统考虑布缝参数和压裂施工参数对于裂缝扩展的影响;三是前期模拟研究基础参数与大庆油田致密油水平井施工参数存在一定差异。为此,采用扩展有限元方法建立水平井多簇裂缝起裂及延伸数值模型,该方法无需预制裂缝路径,裂缝延伸过程与实际裂缝扩展更相近,系统模拟分析不同布缝参数和压裂施工参数对裂缝起裂和延伸的影响,与以往研究相比,数值模型考虑的参数更全面,也更适合于大庆油田致密油水平井,模拟结果可为致密油水平井的压裂优化设计提供指导。

1 模型的建立

1.1 扩展有限元方法

传统有限元对位移场的描述是基于单元的,单元之间的位移可以是协调的,也可以是不协调的,但是每个单元内部的位移场 $u^e(x)$ 总是通过节点位移形函数 $N_i(x)$ 和单元节点位移 u_i 表达^[21]:

$$u^e(x) = \sum_i N_i(x) u_i \quad (1)$$

扩展有限元法是在不改变计算网格结构的前提下,通过引入2个局部加强函数,即沿裂纹面的间断跳跃函数 $H(x)$ 表征间断位移场,缝尖应力渐进函数 $F_a(x)$ 表征奇异位移场。局部加强函数只针对与裂缝相关的单元和节点进行处理^[22]。

位移近似函数 u 表示为:

$$u = \sum_{i=1}^m N_i(x) [u_i + H(x) \mathbf{a}_i + F_a(x) \mathbf{b}_i^a] \quad (2)$$

$H(x)$ 主要用来判断某点处于何侧裂缝面,当点在裂纹上方时为1,其他情况为-1^[23]:

$$H(x) = \begin{cases} 1 & i(x - x^*) \cdot n \geq 0 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

当压裂改造对象为各项同性材料时, $F_a(x)$ 为:

$$F_a(x) = \left[\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (4)$$

裂缝内液体的切向流动计算公式为^[24]:

$$q = -\frac{w^3}{12\mu} \nabla p_f \quad (5)$$

法向流动计算公式为:

$$\begin{cases} q_i = c_i(p_i - p_i) \\ q_b = c_b(p_i - p_b) \end{cases} \quad (6)$$

1.2 模型的建立

以大庆致密油实际地质和工程参数建立水平井多簇裂缝起裂及扩展数值模型。模型中水平井井筒为最大水平主应力方向, 射孔簇与裂缝延伸方

向一致, 为最小水平主应力方向, 在射孔簇位置预留 1 m 长裂缝用来模拟射孔后形成的裂缝通道, 其中 5 簇裂缝压裂模型如图 1 所示。为减小模拟计算工作量, 采用 1/2 对称模型, 模型整体宽度设定为 200 m, 具体模型参数如表 1 所示。

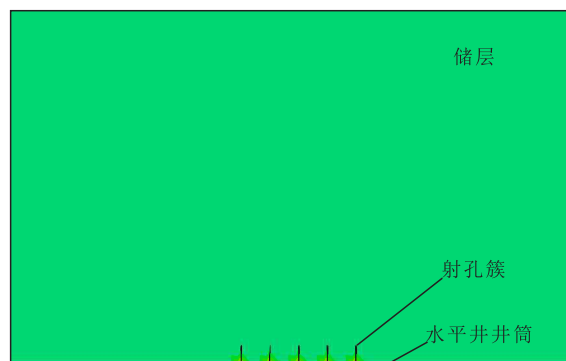


图 1 水平井段内 5 簇裂缝压裂模型
Fig.1 Fracturing model of 5 clusters within one stage of horizontal well

表 1 大庆致密油水平井多簇裂缝起裂及扩展数值模型参数

Table 1 Numerical model of multi-cluster fracture initiation and propagation in Daqing tight-oil horizontal wells

参数	数值	参数	数值	参数	数值
基质渗透率/ mD	1	弹性模量/ GPa	41.4	施工排量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	14
孔隙度/ %	12	泊松比	0.25	渗流系数	1.5×10^{-6}
孔隙压力/ MPa	20	最大水平主应力/MPa	37	有效最小水平主应力/MPa	17
抗拉强度/ MPa	2	最小水平主应力/MPa	33	有效最大水平主应力/MPa	13

数值模拟以各簇均匀进液为前提条件, 重点聚焦于各簇均匀进液条件下段内多簇裂缝的扩展规律。主要模拟了压裂改造布缝参数和施工参数对大庆致密油水平井多簇裂缝扩展的影响, 结合前期大庆致密油水平井压裂施工长期效果和微地震监测裂缝形态的统计分析, 确定了影响裂缝扩展的压裂布缝参数主要有簇距和段内簇数, 压裂施工参数主要有压裂工艺、施工排量及液体黏度。

2 段内多簇压裂裂缝扩展影响因素分析

2.1 簇距

为明确不同簇距对裂缝延伸影响规律, 开展了套管桥塞工艺段内 5 簇同时压裂模拟, 簇距分别为 5, 10, 15, 20, 30 m (图 2), 总施工排量为 $14 \text{ m}^3/\text{min}$, 均匀分配各簇排量, 各簇排量为 $2.8 \text{ m}^3/\text{min}$, 总液量

为 400 m^3 。

图 2 和图 3 均表明: 当簇距缩小至 5 m 时, 缝间诱导应力的影响加剧, 导致裂缝延伸较困难, 特别是第 4 簇裂缝半长仅为 3 m, 平均单簇裂缝半长仅为 27 m; 当簇距为 10 ~ 30 m 时, 平均单簇裂缝半长增至 33 ~ 34 m, 且整体相差较小。为提高整体有效改造体积, 建议水平井段内多簇压裂簇距优选为 10 m 左右。

2.2 段内簇数

桥塞段内多簇压裂时, 段内不同簇数设计将导致缝间诱导应力干扰程度出现较大差异, 从而影响各簇裂缝均匀延伸程度。为此分别开展了段内 2, 4, 5, 6 和 8 簇同时压裂裂缝延伸模拟, 簇距均为 10 m, 均匀分配各簇流量, 总施工排量为 $14 \text{ m}^3/\text{min}$, 对应单簇施工排量分别为 7, 3.5, 2.3, $1.75 \text{ m}^3/\text{min}$, 总液量为 400 m^3 。

图 4 和图 5 均表明: 随着段内簇数的增加, 平均

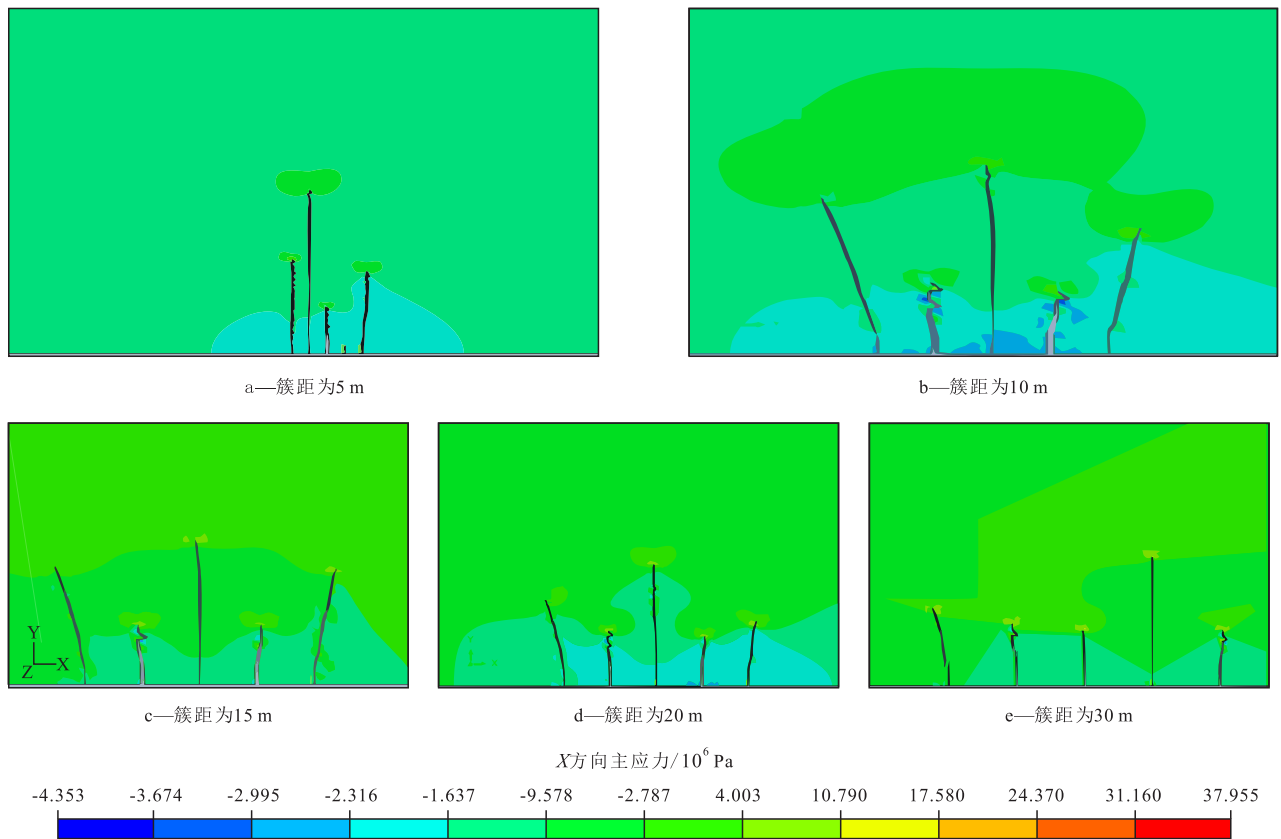


图2 不同簇距裂缝延伸模拟结果

Fig.2 Simulation results of fracture propagation with different cluster spacings

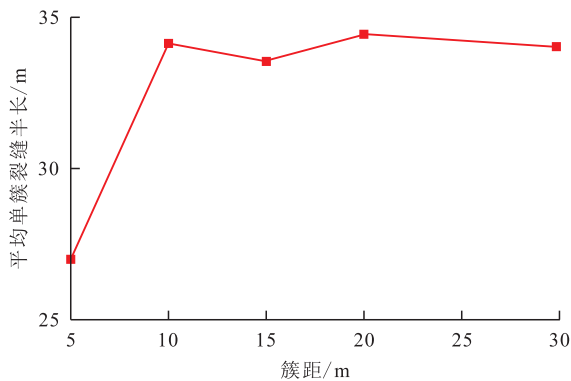


图3 簇距与平均单簇裂缝半长关系

Fig.3 Relation between cluster spacing and average fracture half-length of a single cluster

各簇裂缝半长呈增大趋势,当段内2簇增至段内8簇时,平均各簇裂缝半长提高了14%,但是受段内簇数增加影响,段内各簇非均匀延伸程度加剧。由图6可知,最大裂缝半长与最小裂缝半长的差距随着段内簇数的增加而加剧;该现象主要归因于多条裂缝张开所造成的缝间干扰加剧,致使中间裂缝承受的挤压力加剧,造成缝内净压力升高,从而提升了裂缝扩展的驱动力,导致压裂裂缝更长。非均匀延伸的加剧容易导致段内各簇剩余油的动用不充分,同时在平台井压裂施工过程中,容易形成部分缝长特别长的超级缝,为压裂施工带来一定风险,

因此在压裂设计中需要通过控制段内裂缝数量或通过段内暂堵方式以降低非均匀延伸程度。

2.3 压裂工艺

致密油水平井体积压裂目前主要采用套管桥塞压裂工艺与连续油管水力喷射环空加砂压裂工艺。其中连续油管水力喷射环空加砂压裂工艺为单簇改造方式,每段施工只压裂一簇裂缝,单簇施工排量大,但施工效率较低。套管桥塞段内多簇压裂工艺为段内多簇改造方式,每段施工压裂多条裂缝,单簇施工排量较小,施工效率高。

以5簇裂缝为研究对象,设定簇距为10和15 m,分别模拟连续油管水力喷射环空加砂压裂工艺和套管桥塞压裂工艺改造时的裂缝延伸情况,对比分析2种工艺对裂缝延伸的影响(图7)。其中连续油管水力喷射环空加砂压裂工艺每次压裂1簇,单簇排量为14 m³/min,模拟注入液量为80 m³,每簇注入完成后间隔1 h开始下一簇压裂施工,依次完成5簇压裂施工;套管桥塞压裂工艺,段内5簇同时压裂,总排量为14 m³/min,均匀分配各簇排量,各簇排量为2.8 m³/min,总液量为400 m³。

模拟结果(图8)表明:在相同簇距条件下,连续油管水力喷射环空加砂压裂工艺单簇改造平均裂

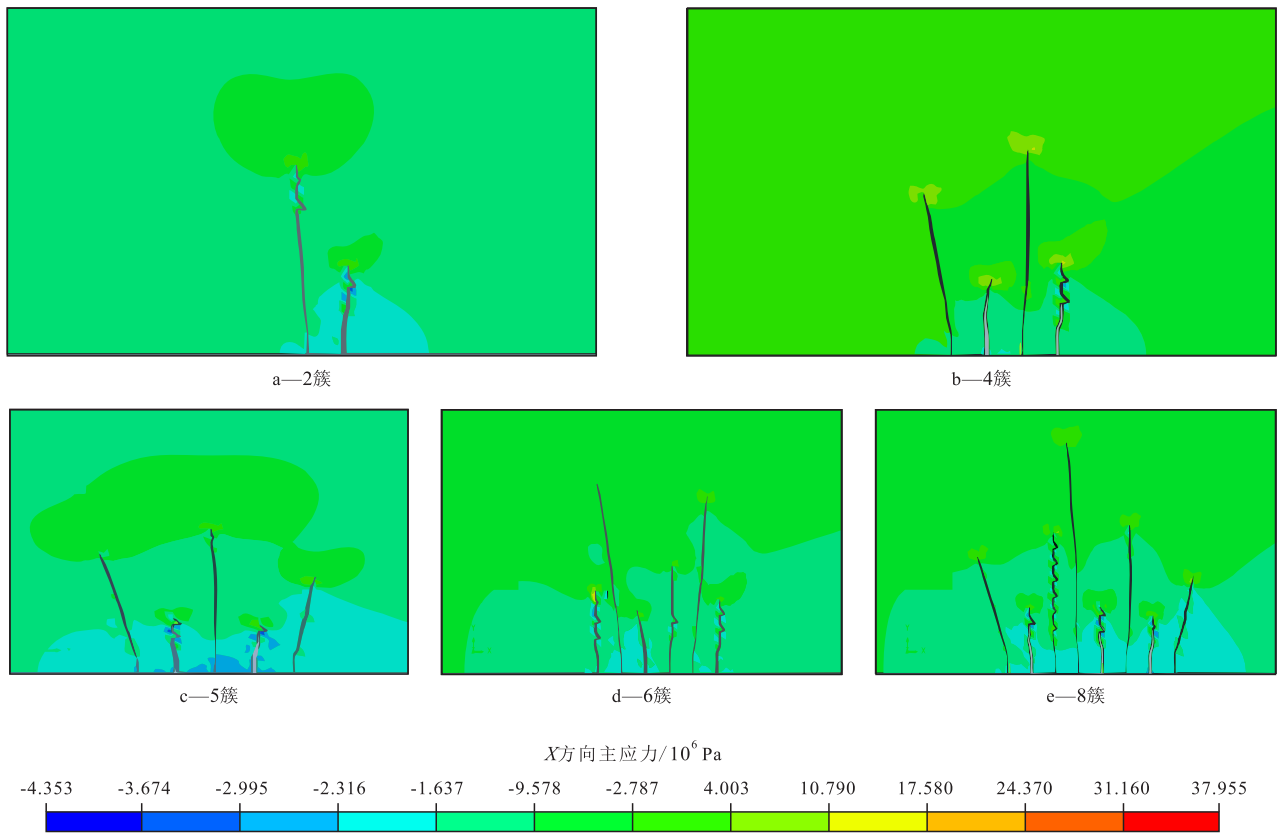


图4 段内不同簇数裂缝延伸模拟结果

Fig.4 Simulation results of fracture propagation for stages with different cluster numbers

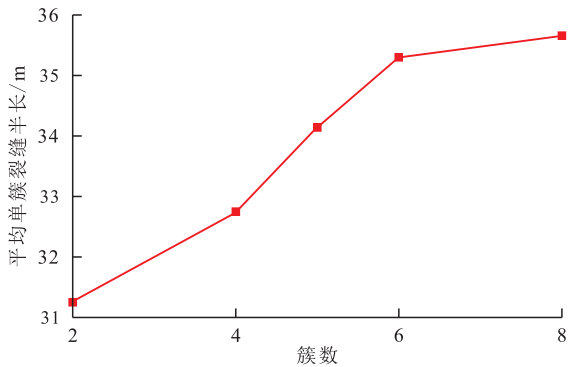


图5 段内簇数与平均单簇裂缝半长关系

Fig.5 Relationship between cluster in one stage and average fracture half-length of one cluster

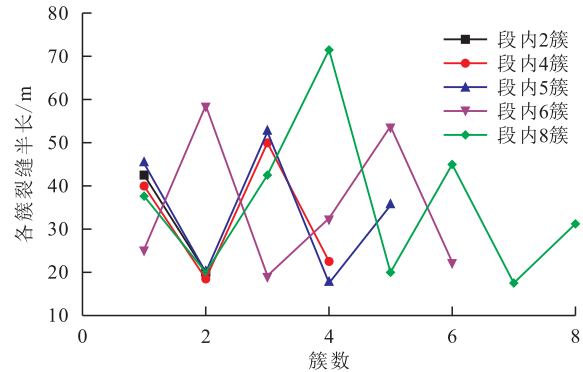


图6 不同簇数各簇裂缝半长

Fig.6 Fracture half-length of stages with different clusters

缝半长大于套管桥塞段内多簇同时起裂裂缝半长, 10和15 m簇距条件下连续油管水力喷射环空加砂压裂单簇依次压裂的平均单簇裂缝半长分别较套管桥塞多簇同时起裂提高6.1%和19%,连续油管水力喷射环空加砂压裂工艺更有利于裂缝延伸。

2.4 施工排量

压裂施工排量大小直接决定缝内净压力大小, 从而影响裂缝扩展形态及尺寸; 具体而言, 相较于低排量泵注压裂液, 在压裂裂缝失稳扩展前, 排量升高可产生较高的缝内净压力, 形成较高的裂缝扩展驱动力, 有助于裂缝在强缝间干扰应力作用下扩

展。针对套管桥塞压裂工艺开展段内5簇同时压裂模拟, 簇距为10 m, 均匀分配各簇流量, 总施工排量分别为8, 10, 12, 14, 16 m³/min, 对应单簇施工排量分别为1.6, 2.0, 2.4, 2.8, 3.2 m³/min, 总液量为400 m³。

图9和图10均表明: 段内5簇同时起裂时, 各簇裂缝延伸均匀程度不一致, 其中第1, 3, 5簇延伸较长, 第2, 4簇裂缝受缝间诱导应力影响, 延伸受抑制, 段内5簇条件下难以保证各簇裂缝均匀延伸。随着施工排量的增大, 平均单簇裂缝半长呈增大趋势, 排量由8 m³/min提高至16 m³/min, 平均单簇裂缝半长提高14.3%(图11)。同时可以发现, 最大裂

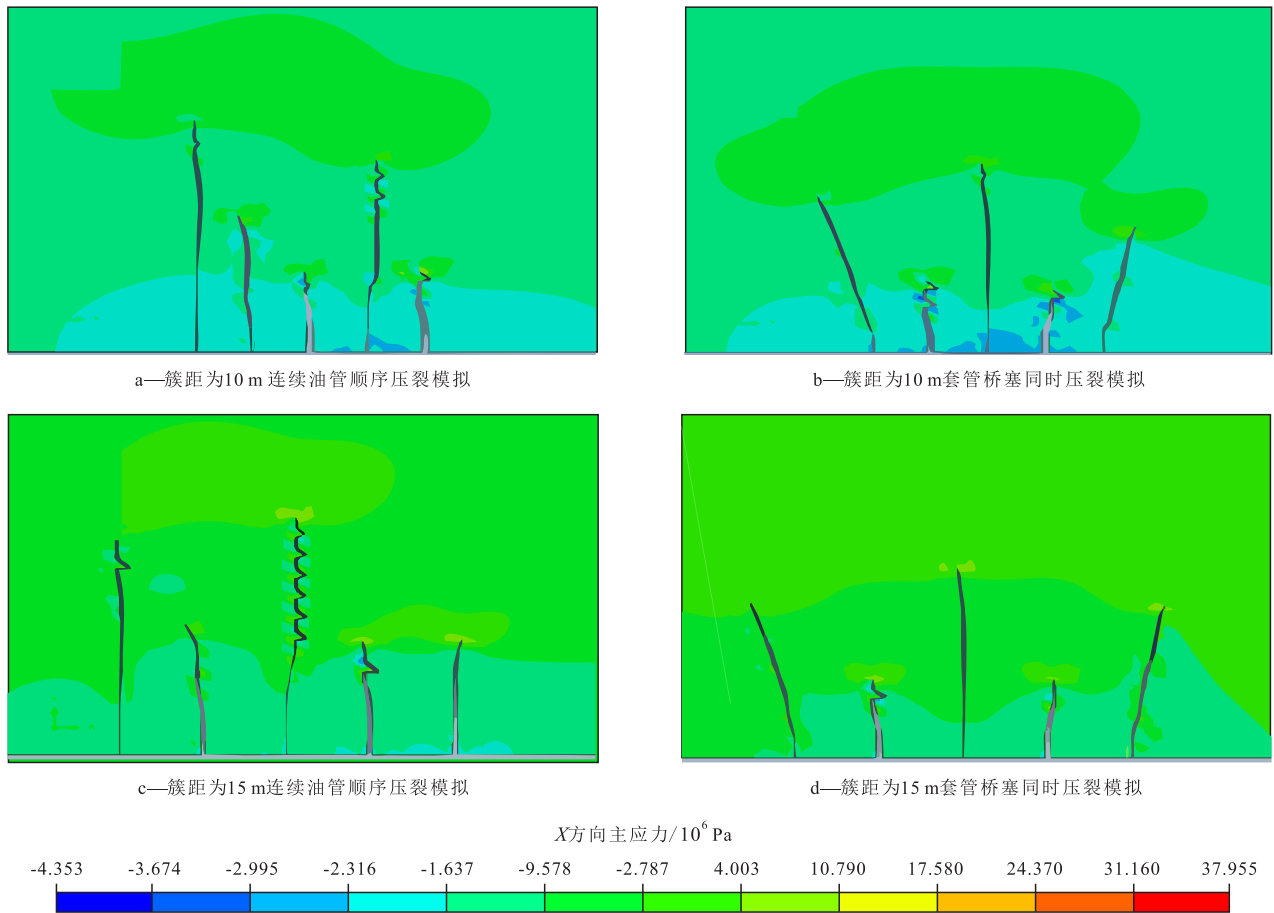


图7 不同压裂工艺下段内5簇压裂裂缝起裂规律

Fig.7 Fracture initiation law of fracturing fractures in stages with 5 clusters under different fracturing processes

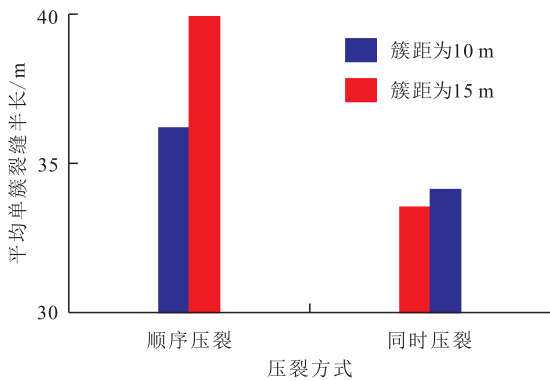


图8 不同压裂方式下平均单簇裂缝半长

Fig. 8 Average fracture half-length of single cluster under different fracturing modes

缝半长与最小裂缝半长的差距随着施工排量的增大而有所减小,表明提高排量能促进段内各簇裂缝延伸的均匀程度。

2.5 液体黏度

结合目前大庆油田常用的常规滑溜水、一体化滑溜水和胍胶液3种液体体系,其中常规滑溜水液体黏度取值为5 mPa·s,一体化滑溜水按照常用的滑溜水1,2,3,4取值分别为10,15,30和50 mPa·s,胍胶液液体黏度取值为150 mPa·s,开展6种液体黏

度条件下裂缝延伸数值模拟,分析液体黏度对于人工裂缝延伸的影响规律。按照桥塞压裂工艺,段内5簇,簇距为10 m,同时压裂,均匀分配各簇流量,施工排量为14 m³/min,总液量为400 m³(图12)。

液体黏度与平均单簇裂缝半长的关系(图13)表明:随着液体黏度的增大,平均单簇裂缝半长呈增大趋势,液体黏度由5 mPa·s增大到150 mPa·s时,平均单簇裂缝半长提高12.8%。大庆致密油天然裂缝不发育,难以形成较复杂的裂缝网络系统,可在考虑液体成本的前提下,适当提高高黏度液体比例,提高单井改造体积。

3 现场应用

根据上述数值模拟优化结果,在长垣南部致密油典型二类储层M2等区块开展现场试验14口水平井,整体上簇距为10 m左右,段内簇数以6簇为主,段内暂堵1次,施工排量提高至16 m³/min,采用以高黏度的胍胶压裂液体体系为主,压后单井初期日产量为13.2 t,单井330 d阶段累积产油量为3 246 t,

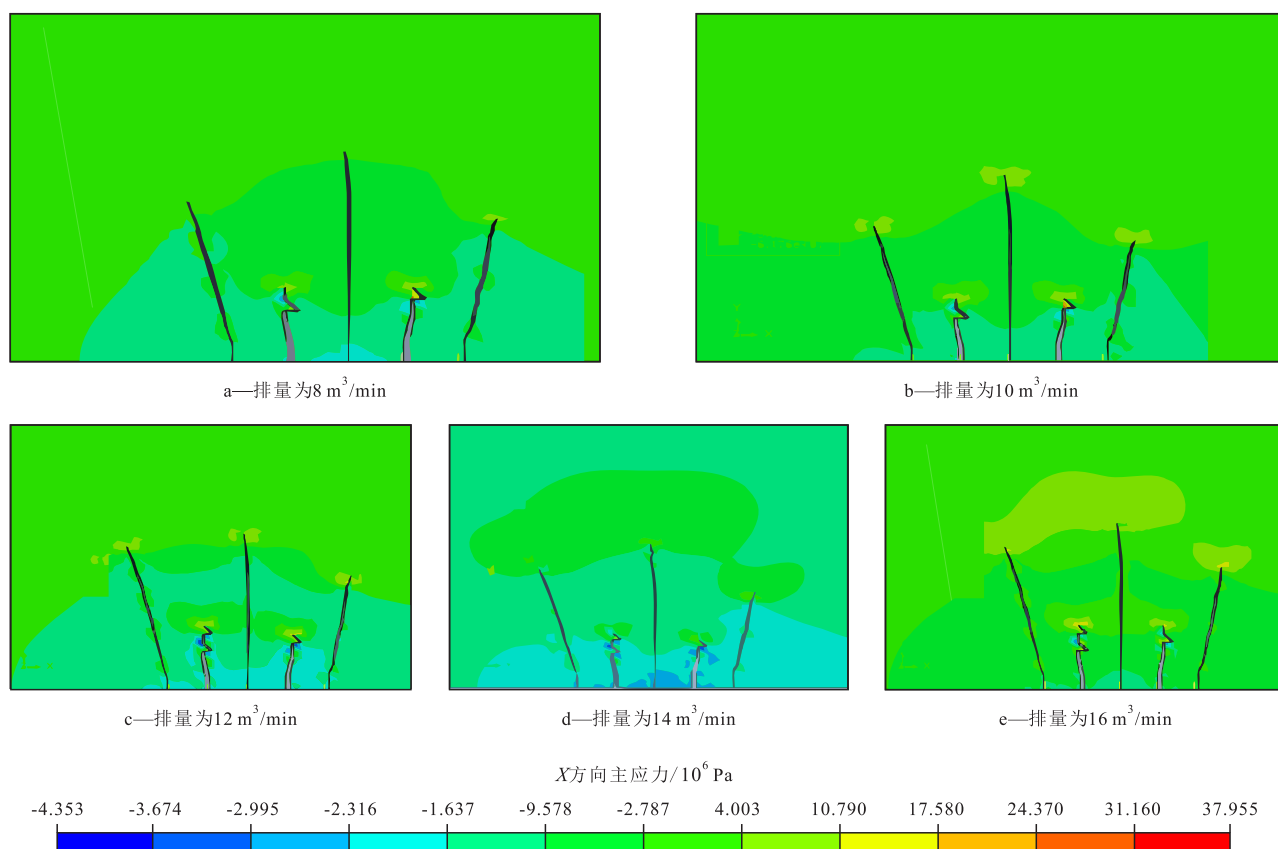


图9 不同排量裂缝延伸模拟结果

Fig. 9 Simulation results of fracture extension with different displacement

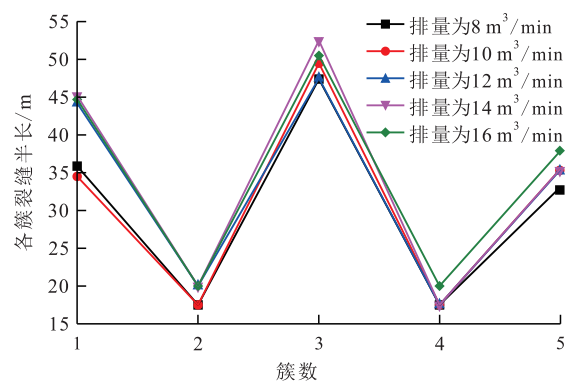


图10 不同排量下各簇裂缝半长

Fig. 10 Average fracture half-length of each cluster under different displacements

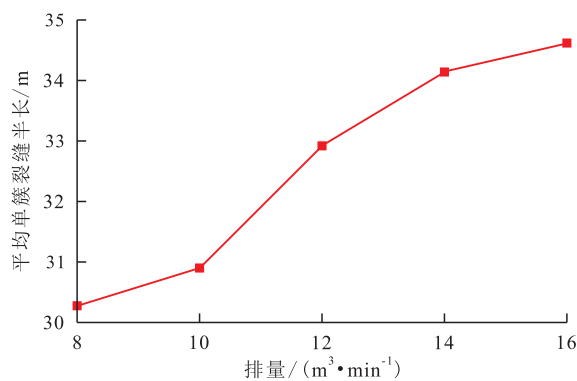


图11 排量与平均单簇裂缝半长的关系

Fig. 11 Relationship between displacement and average fracture half-length of single cluster

较以往长垣南部二类储层P8区块水平井(渗透率、孔隙度及储层厚度均与M2区块相当)330 d产油强度提升53.3%,取得了较好的生产效果。

同时在M2区块FP5井上开展了光纤产能监测,测定段内各簇日产液量。A井簇距为10 m为主,对比段内6簇压裂段各簇日产液量(图14)与段内6簇各簇裂缝半长数值模拟结果均表明:光纤测试单簇日产液量与各簇裂缝半长的变化规律具有较好的对应关系,第2和第5簇日产液量贡献高于其他4簇的,证明了数值模拟的正确性。

4 结论

施工排量及液体黏度3个压裂施工参数对致密油水平井多簇裂缝扩展的影响,取得以下认识:

(1)当簇距缩小至5 m时,部分簇裂缝延伸较困难,平均单簇裂缝半长较短,当簇距达到10 m及以上时,平均裂缝半长整体相差不大,建议水平井段内多簇压裂簇距优选为10 m左右。

(2)随着段内簇数的增加,平均单簇裂缝半长

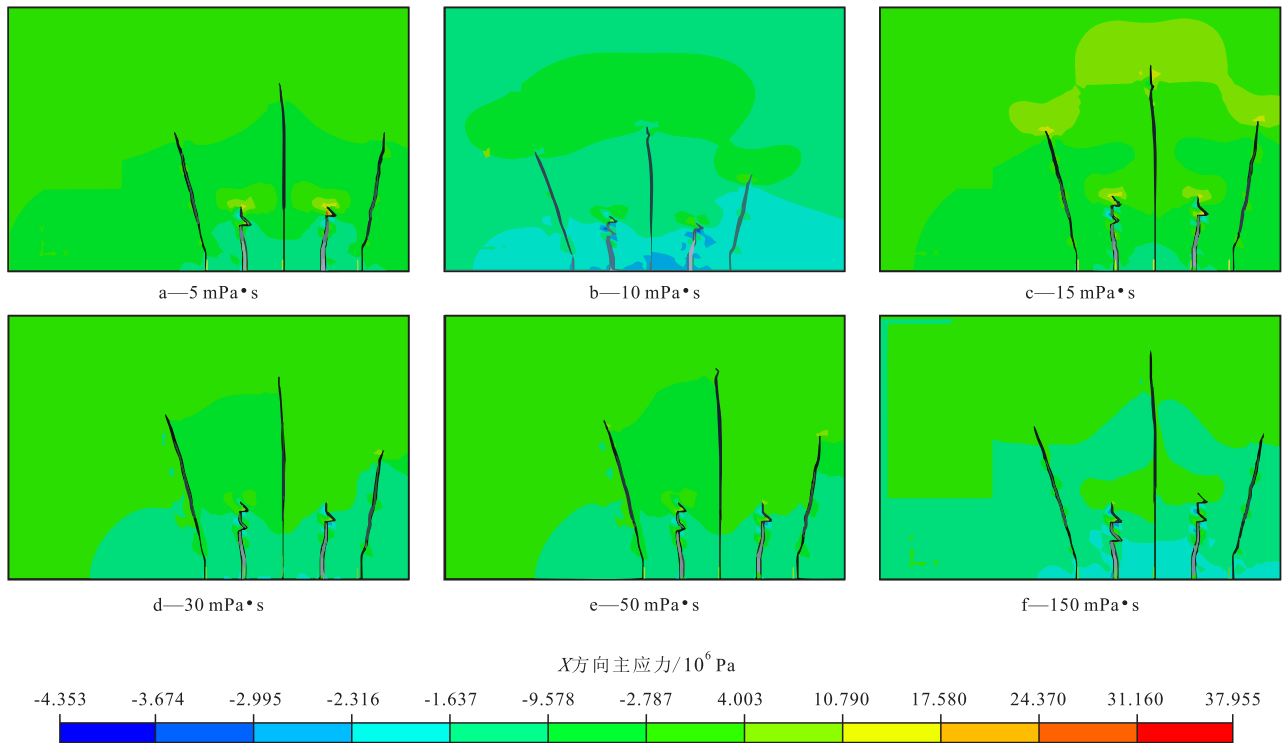


图 12 段内5簇不同液体黏度裂缝延伸模拟

Fig. 12 Simulation of fracture propagation in stages with 5 clusters for different liquid viscosities

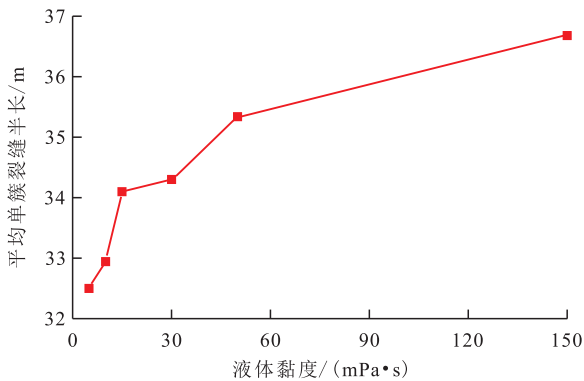


图 13 液体黏度与平均单簇裂缝半长的关系

Fig. 13 Relationship between liquid viscosity and average fracture half-length of single cluster

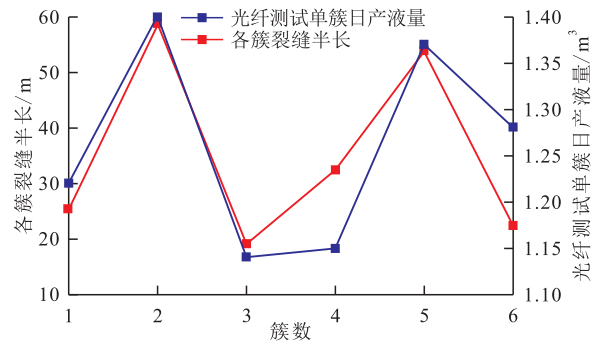


图 14 A 井光纤测试单簇日产液量与各簇裂缝半长对比

Fig. 14 Comparison between fluid production of single cluster monitored by optical fiber and fracture half-length of each cluster simulated in Well A

呈增大趋势,但段内各簇非均匀延伸程度增加,容易形成超级缝,为压裂施工带来一定风险,因此在压裂设计中需要通过控制段内裂缝数量或者通过段内暂堵方式以降低非均匀延伸程度。

(3)在相同簇距模拟条件下,连续油管水力喷射环空加砂单簇依次改造工艺平均单簇裂缝半长大于套管桥塞段内多簇同时起裂的,10和15 m簇距条件下单簇起裂平均单簇裂缝半长分别较段内多簇同时起裂的提高6.1%和19%,连续油管水力喷射环空加砂压裂工艺更有利于裂缝延伸。

(4)随着施工排量的增大,平均单簇裂缝半长呈增大趋势,提高施工排量能有效增大平均单簇裂缝半长,同时还能促进段内各簇裂缝延伸的均匀

程度。

(5)随着液体黏度的增大,平均单簇裂缝半长呈增大趋势,针对大庆致密油天然裂缝不发育,难以形成较复杂的裂缝网络系统,可在考虑液体成本的前提下,适当提高高黏度液体比例及单井改造体积。

符号解释

a_i, b_i^q —— 均为节点扩展自由度向量, a_i 只对位移形函数被裂纹内部切开的单元节点有效, b_i^q 只对节点位移形函数被裂纹尖端切开的单元节点有效;

c_t, c_b —— 上、下表面的液体滤失系数, 无因次;
 $F_s(x)$ —— 缝尖应力渐进函数表征奇异位移场;
 $H(x)$ —— 沿裂纹面的间接跳跃函数表征间断位移场;
 i —— 单元的节点;
 m —— 总单元数量;
 $N_i(x)$ —— 节点位移形函数;
 \mathbf{n} —— 单位外法线向量;
 p_t, p_b —— 上、下表面的孔隙压力, MPa;
 p_f —— 缝内压裂液实时压力, MPa;
 p_i —— 流体压力, MPa;
 \mathbf{q} —— 体积流量向量, m^3/s ;
 q_t, q_b —— 流进扩展面单元的上、下表面的体积流率, m^3/s ;
 r —— 极坐标系;
 u —— 位移近似函数;
 $u^e(x)$ —— 每个单元内部的位移场;
 u_i —— 单元节点位移, m;
 w —— 动态裂缝张开宽度, m;
 x —— 空间坐标;
 x^* —— 位于裂纹上距 x 最近点的空间坐标;
 θ —— 极坐标系, 裂纹尖端切线方向对应 $\theta=0$;
 μ —— 压裂液黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

参考文献

- [1] 罗群, 高阳, 张泽元, 等. 中国与美国致密油形成条件对比研究[J]. 石油实验地质, 2022, 44(2): 199-209.
 LUO Qun, GAO Yang, ZHANG Zeyuan, et al. A comparative study of geological conditions of tight oils in China and USA[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(2): 199-209.
- [2] 郑继明. 基于压裂返排数据的致密油有效改造体积计算方法[J]. 非常规油气, 2023, 10(4): 139-144.
 ZHENG Jiming. An approach to calculate the effective stimulated volume of tight oil based on the flowback data after hydraulic fracturing[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(4): 139-144.
- [3] 王小兵, 胡炎射, 李森, 等. 沉积岩致密油藏压裂裂缝导流能力及产能模型[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(4): 442-449.
 WANG Xiaobing, HU Yanshe, LI Sen, et al. Models for conductivity and productivity of hydraulic fractures in tight oil reservoirs in sedimentary rocks[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(4): 442-449.
- [4] 范家伟, 袁野, 李绍华, 等. 塔里木盆地深层致密油藏地质工程一体化模拟技术[J]. 断块油气田, 2022, 29(2): 194-198.
 FAN Jiawei, YUAN Ye, LI Shaohua, et al. Geology-engineering integrated simulation technology of deep tight oil reservoir in Tarim Basin[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(2): 194-198.
- [5] 张皎生, 杨焕英, 王晶, 等. 基于复杂缝网精细刻画的致密油气藏水平井多段压裂数值模拟技术[J]. 中国海上油气, 2023, 35(4): 103-111.
 ZHANG Jiaosheng, YANG Huanying, WANG Jing, et al. A method for numerical simulation of multi-stage fracturing of horizontal well in tight oil and gas reservoirs based on fine characterization of complex fracture network[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(4): 103-111.
- [6] 赵军, 闫雯雯, 徐通, 等. 朝阳沟阶地扶杨油层微孔裂隙结构及渗流机理分析[J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 194-206.
 ZHAO Jun, YAN Wenwen, XU Tong, et al. Analysis of microscopic pore structure and seepage mechanism of the Fuyang Oil Reservoir in Chaoyanggou Terrace[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 194-206.
- [7] 宋子学, 李恒双, 樊晓东, 等. 大庆长垣东部地区扶余油层多类型砂体储层综合评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(4): 55-63.
 SONG Zixue, LI Hengshuang, FAN Xiaodong, et al. Comprehensive classification and evaluation of multi-types sandbody reservoirs in Fuyu reservoirs of eastern Daqing placanticline[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(4): 55-63.
- [8] 乔磊, 刘奕杉, 车阳, 等. 松辽盆地难采储量钻完井技术现状及对策建议[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(5): 130-137.
 QIAO Lei, LIU Yishan, CHE Yang, et al. Technical status and countermeasures of drilling and completion technology for hard-to-recover reserves in Songliao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(5): 130-137.
- [9] 刘子军. 基于 Pearson 相关系数的低渗透砂岩油藏重复压裂井优选方法[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(2): 140-144.
 LIU Zijun. Method for selecting repeated fracturing wells in low-permeability sandstone reservoirs based on Pearson correlation coefficient[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(2): 140-144.
- [10] 徐泽昊, 刘向君, 梁利喜, 等. 砾岩油藏压裂裂缝遇砾扩展行为机理[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(3): 115-127.
 XU Zehao, LIU Xiangjun, LIANG Lixi, et al. Propagation mechanism of fractures caused by hydraulic fracturing when encountering gravel in conglomerate reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(3): 115-127.
- [11] 张汝生, 王强, 张祖国, 等. 水力压裂裂缝三维扩展 ABAQUS 数值模拟研究[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(6): 69-72.
 ZHANG Rusheng, WANG Qiang, ZHANG Zuguo, et al. Research of ABAQUS numerical simulation of 3D fracture propagation in hydraulic fracturing process[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(6): 69-72.
- [12] 张广明, 刘合, 张劲, 等. 水平井水力压裂的三维有限元数值模拟研究[J]. 工程力学, 2011, 28(2): 101-105.
 ZHANG Guangming, LIU He, ZHANG Jin, et al. Three dimensional finite element numerical simulation of horizontal well hydraulic fracturing[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(2): 101-105.
- [13] 侯雅儒. 水平井段内多簇压裂裂缝起裂与扩展规律研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
 HOU Yaru. Research on fracture initiation and propagation among multi-cluster fracturing in horizontal well[D]. Beijing:

- China University of Petroleum(Beijing), 2017.
- [14] 曲占庆,田雨,李建雄,等. 水平井多段分簇压裂裂缝扩展形态数值模拟[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2017,41(1): 102-109.
- QU Zhanqing, TIAN Yu, LI Jianxiong, et al. Numerical simulation study on fracture extension and morphology of multi-cluster staged fracturing for horizontal wells[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2017, 41(1): 102-109.
- [15] 杨兆中,易良平,李小刚,等. 致密储层水平井段内多簇压裂多裂缝扩展研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(A02): 3 870-3 878.
- YANG Zhaozhong, YI Liangping, LI Xiaogang, et al. Study on multiple-fracture extension within a stage in horizontal well of tight reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(A02): 3 870-3 878.
- [16] 何鑫.致密油水平井压裂数值模拟及裂缝参数优化[J].大庆石油地质与开发,2018,37(3):158-162.
- HE Xin. Numerical simulation and fracture parameter optimization for the horizontal well fracturing in tight oil reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(3): 158-162.
- [17] 王维,王贤君,王晓娟,等. 大庆油田致密油水平井段内多簇布缝数值模拟优化研究[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(5): 101-105.
- WANG wei, WANG Xianjun, WANG Xiaojuan, et al. Numerical simulation and optimization of multi-cluster fracture distribution in tight oil horizontal well section in Daqing oilfield[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2022, 36(5): 101-105.
- [18] 周鑫,刘向君,丁乙,等. 考虑隔层效应的水力裂缝与天然裂缝相交模拟[J]. 油气藏评价与开发,2022,12(3):515-525.
- ZHOU Xin, LIU Xiangjun, DING Yi, et al. Simulation of intersecting hydraulic fractures with natural fractures considering layer barrier effect[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(3): 515-525.
- [19] CARRIER B, GRANET S. Numerical modeling of hydraulic fracture problem in permeable medium using cohesive zone model[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 79: 312-328.
- [20] 白凯华. 基于ABAQUS的低渗透储层水力压裂数值模拟研究[D]. 西安:西安石油大学,2019.
- BAI Kaihua. Numerical simulation of hydraulic fracturing in low permeability reservoir based on ABAQUS [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019.
- [21] 方修君,金峰. 基于ABAQUS平台的扩展有限元法[J]. 工程力学,2007,24(7):6-10.
- FANG Xiujun, JIN Feng. Extended finite element method based on ABAQUS[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(7): 6-10.
- [22] 盛茂,李根生. 水力压裂过程的扩展有限元数值模拟方法[J]. 工程力学,2014,31(10):123-128.
- SHENG Mao, LI Gensheng. Extended finite element modeling of hydraulic fracture propagation [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(10): 123-128.
- [23] 陈峥嵘,齐宇,韩磊,等. 非均质致密储层水平井分段压裂裂缝扩展模拟[J]. 大庆石油地质与开发,2024,43(2):53-60.
- CHEN Zhengrong, QI Yu, HAN Lei, et al. Fracture propagation simulation of horizontal well staged fracturing in heterogeneous tight reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(2): 53-60.
- [24] 王强,贺甲元. 基于ABAQUS的压裂裂缝扩展模拟研究[J]. 油气藏评价与开发,2014,4(5):48-51.
- WANG Qiang, HE Jiayuan. Fracture spread simulation research based on ABAQUS[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2014, 4(5): 48-51.

编辑 单体珍