

DOI: 10.11779/CJGE201811022

致密砂岩储层水平井螺旋射孔参数优化研究

张儒鑫, 侯冰*, 单清林, 谭鹏, 吴越, 郭小锋

(油气资源与工程国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249)

摘 要: 射孔孔眼连接井筒和储层, 提供泄油通道、有效降低储层破裂压力和引导裂缝走向。开展大型真三轴物理模拟试验, 研究射孔长度、射孔密度、射孔孔径、射孔相位和射孔簇间距对裂缝起裂特征、扩展形态和储层破裂压力的影响规律。试验结果表明: 射孔参数的改变本质上是改变射孔孔间距, 孔间距决定孔眼之间的连通性, 影响近井筒裂缝扩展形态和岩石破裂压力; 射孔孔径和射孔密度的增加, 减小孔间距, 有利于裂缝间相互沟通, 降低近井筒裂缝复杂性和岩石破裂压力; 射孔相位的增大, 增大孔间距, 易产生分层复杂裂缝, 岩石破裂压力增高; 而射孔长度和射孔簇间距的变化对裂缝扩展形态没有影响。根据试验结论, 给现场提出了射孔参数优化的理论基础和施工建议。

关键词: 螺旋射孔; 参数优化; 裂缝扩展形态; 水力压裂; 岩石破裂压力; 物理模拟试验

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)11-2143-05

作者简介: 张儒鑫(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事油气井岩石力学与工程的研究工作。E-mail: 517956254@qq.com。

Parameter optimization of spiral perforations in horizontal well with tight sandstone reservoir

ZHANG Ru-xin, HOU Bing, SHAN Qing-lin, TAN Peng, WU Yue, GUO Xiao-feng

(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The perforation, a channel connecting wellbore with reservoir, provides the path of oil drainage, reduces the fracturing pressure of reservoir, and determines the direction of fracture propagation. A series of large true tri-axial physical simulation experiments are conducted to study the effects of perforation length, density, diameter, phase and spacing on the characteristics of fracture initiation, behaviors of fracture propagation and fracturing pressure. The experimental results show that the change of perforation parameters affects the perforation spacing, and the distance of two adjacent perforations. It decides the interaction between the two adjacent perforations, and then determines the fracture propagation geometry. The increasing perforation diameter and density reduce the perforation spacing, which is beneficial for fractures to link up with each other and to decrease fracture complexity and fracturing pressure of nearby well bores. The increase of perforation phase, whereas, enlarges the perforation spacing, forming the layered fracture with a high fracturing pressure. In addition, the changes of the perforation length and spacing have no effect on fracture morphology. Thus, according to the experimental results, some theoretical bases and suggestions about the parameter optimization of perforations are put forward for the field operation.

Key words: spiral perforation; parameter optimization; fracture propagation geometry; hydraulic fracture; fracturing pressure; physical simulation experiment

0 引 言

深层致密储层具有埋藏深、低孔低渗、高温高压等特点, 采用射孔压裂进行体积改造时, 常常遇到储层破裂压力高、近井筒裂缝形态复杂、加砂难度大以及压裂后增产效果不明显等问题。通过优化螺旋射孔参数, 可以降低储层破裂压力, 提高主裂缝延伸能力, 改善近井筒渗流能力。

Daneshy^[1]首先发现射孔的存在对裂缝形态和岩石破裂压力有影响, 与最大水平主应力方向夹角越小的射孔孔眼越容易起裂。张广清等^[2]通过有限元分析

发现, 射孔密度和射孔方位角为影响破裂压力的主要因素, 而射孔长度和射孔直径对其影响不大。Behrman等^[3]开展大型真三轴试验研究直井 180° 相位射孔下, 射孔方位、岩石孔压、压裂液性质以及泵入速率对裂缝起裂规律的影响。侯冰等^[4]通过物理模拟试验发现, 射孔方位角较小, 水平应力差较大时近井区域裂缝扭

基金项目: 国家自然科学基金项目(51574260, 51490651, 51221003)

收稿日期: 2017-05-23

*通讯作者(E-mail: houbing@vip.163.com)

曲程度小。Veeken 等^[5]发现优化射孔方位角、射孔孔径和射孔长度,可以提高起裂孔眼沟通能力和降低裂缝扭转程度。

因此,研究优化射孔参数对认识掌握岩石破裂压力和裂缝扩展形态是十分有必要的。目前,在压裂施工现场的人员凭借经验设置射孔参数,缺少理论依据,增产效果不高。对射孔参数的优化研究大多在于数模计算,依靠破裂压力来判断射孔参数的好坏,而忽略了压裂后近井筒裂缝形态的问题。在压裂施工时不同的射孔参数组合可能会造成复杂的裂缝形态,如转向裂缝、T 形缝、螺旋形裂缝等等,由于其缝短、缝窄或缝弯曲程度过大,导致后期加砂困难、过早脱砂、流体在裂缝中摩阻高等问题^[6-8]。

本文开展大型真三轴室内物理模拟试验,模拟致密砂岩储层水平井螺旋射孔压裂过程,研究射孔长度、射孔密度、射孔孔径、射孔相位和射孔簇间距对裂缝起裂特征、扩展形态和岩石破裂压力的影响,得到相关结论优化射孔参数,给现场压裂设计、施工提出合理化建议。

1 水力压裂物理模拟试验设计

1.1 试样制备

试验采用的 300 mm×300 mm×300 mm 混凝土浇筑试样是由水泥与石英砂按 1:1 的体积比浇筑凝固而成,试样的基本参数如表 1 所示。水平井筒由外径 14 mm,内径 10 mm 的钢管模拟,在井筒上钻孔模拟螺旋射孔,并塞入不同长度的纸轴以模拟射孔压裂,井筒方向与最小水平主应力方向平行。从井筒头向下顺时针给每个射孔孔眼编号(例:1-1 为第 1 簇第 1 射孔孔眼,2-1 为第 2 簇第 1 射孔孔眼,依次类推)(图 1)。



图 1 人工试样制作示意图

Fig. 1 The schematic of making artificial sample

模拟胍胶压裂液体系主要由 3 g 胍胶,2 g 荧光粉(方便观察和分析试验结果)和清水混合充分搅拌而成,采用 0.3 mL/min 的排量注入模拟井筒里压裂试样。模拟胍胶压裂液体系的基本性质参数如表 2 所示。

表 1 人工试样基本岩性参数

Table 1 Lithologic parameters of artificial sample

| 弹性模量/GPa | 泊松比 | 单轴抗压强度/MPa | 单轴抗拉强度/MPa | 渗透率/mD | 孔隙度/% |
|----------|-----|------------|------------|--------|-------|
| 7.86 | 0.2 | 20.89 | 1.53 | 0.1 | 1.54 |

表 2 胍胶压裂液体系的基本性质参数

Table 2 Parameters of fracturing fluid

| θ_{300} | θ_{600} | AV /cp | PV/cp | YP /lb/100ft ² |
|----------------|----------------|--------|-------|---------------------------|
| 23 | 33 | 16.5 | 10 | 13 |

1.2 试验参数设置

试验主要研究在正断层地层中(最大水平主应力、最小水平主应力和垂向应力分别为 24, 21, 30 MPa),不同射孔参数对水力裂缝起裂、扩展和岩石破裂压力的影响。根据现场射孔参数施工数据,按照相似理论^[9]设置实验室条件下不同射孔参数组合,具体试验方案如表 3 所示。

表 3 试验方案

Table 3 Experimental schemes

| 编号 | 孔长/mm | 孔径/mm | 孔密/孔/cm | 相位/(°) | 簇间距/mm |
|----|-------|-------|---------|--------|--------|
| 1 | 30 | 2 | 12 | 60 | 20 |
| 2 | 40 | 2 | 12 | 60 | 20 |
| 3 | 30 | 4 | 12 | 60 | 20 |
| 4 | 30 | 2 | 18 | 60 | 20 |
| 5 | 30 | 2 | 12 | 90 | 20 |
| 6 | 30 | 2 | 12 | 60 | 40 |

其中,孔长 30 mm,孔径 2 mm,孔密 12 孔/cm,相位 60°,簇间距 20 mm 的射孔参数组合为现场施工常用的螺旋射孔参数组合。

按照试验方案做出 10 块人工混凝土浇筑试样后,在干燥环境中放置半个月,充分晾干达到其强度要求。避免人工混凝土浇筑试样的强度不够,影响试验效果。

1.3 试验装置和过程

采用中国石油大学(北京)的真三轴水力压裂系统^[10]开展试验,如图 2 所示。试验操作步骤如下:①将试样放入真三轴试验架中,然后安装压力板和其他部件。为了保证试样表面受到均匀加压和防止压板与试样之间发生剪切滑移,压力板与试样之间加入一橡胶垫片。②装置安装完毕以后,由围压加载装置向试样加载三轴围压。确保试样受压平衡,加载过程分三步进行。首先,三轴应力同时加载至最小水平主应力值,再将最大水平主应力和垂向应力加载至最大水平主应力值,最后将垂向应力加载至其设定值。当围压应力加载完毕后,应等待 30 min 左右再泵入压裂液,

防止围压应力不平衡。③将压裂液由注入系统按设定的排量泵入井筒, 开始压裂直到试样破裂后, 停止泵入。④保存试验采集的数据, 并沿人工水力裂缝打开试样, 观察记录射孔起裂位置和裂缝扩展形态。

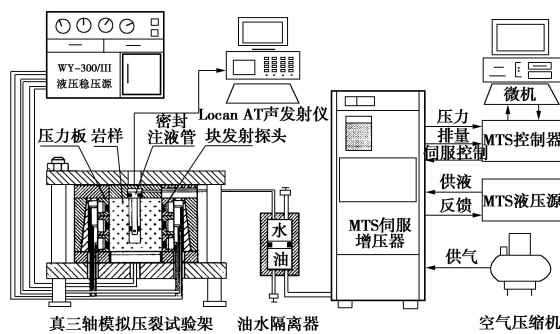


图 2 模拟压裂试验流程图

Fig. 2 Flow diagram of hydraulic fracture simulation experiemnt

2 试验结果分析

压裂结束后, 将人工混凝土浇筑试样沿着水力裂缝走向打开, 观察发现水力裂缝总是沿着最大水平主应力方向扩展, 即垂直于最小主应力方向(井筒方向)。而水力压裂所形成的裂缝面大致分为 3 种形态: ①单一平整裂缝面; ②螺旋形裂缝面; ③多层独立平整裂缝面, 见图 3 所示。各人工混凝土浇筑试样具体的裂缝起裂方式和扩展裂缝面形态见表 4 所示。

表 4 试验结果

Table 4 Experimental results

| 编号 | 破裂压力 /MPa | 裂缝面形态 |
|----|--------------|--|
| 1 | 22.46 | 1 个射孔孔眼起裂, 沿最大水平主应力方向扩展, 裂缝扩展面单一平整 |
| 2 | 18.7 | 1 个射孔孔眼起裂, 沿最大水平主应力方向扩展, 裂缝扩展面单一平整 |
| 3 | 24.89 | 相邻 3 个射孔孔眼起裂, 裂缝扩展时相互沟通连接, 形成螺旋形裂缝面 |
| 4 | 26.57 | 相邻 5 个射孔孔眼起裂, 形成螺旋形裂缝面 |
| 5 | 25.82 | 相邻 2 个射孔孔眼起裂, 裂缝扩展时互不沟通, 各自沿着最大水平主应力方向扩展 |
| 6 | 26.45 | 相邻 2 个射孔孔眼起裂, 裂缝扩展时互不沟通, 各自沿着最大水平主应力方向扩展 |

泵压曲线形状取决于裂缝起裂方式和裂缝扩展形态。从泵压曲线前部分形状可知裂缝起裂方式, 若起裂孔眼同时起裂则曲线存在一个尖点, 若起裂孔眼依次起裂则曲线存在多个尖点; 从泵压曲线后部分形状可知裂缝扩展形态, 裂缝扩展形态单一平整则曲线后部分平稳, 裂缝复杂弯曲有重合则曲线后部分上下波

动, 见图 4。

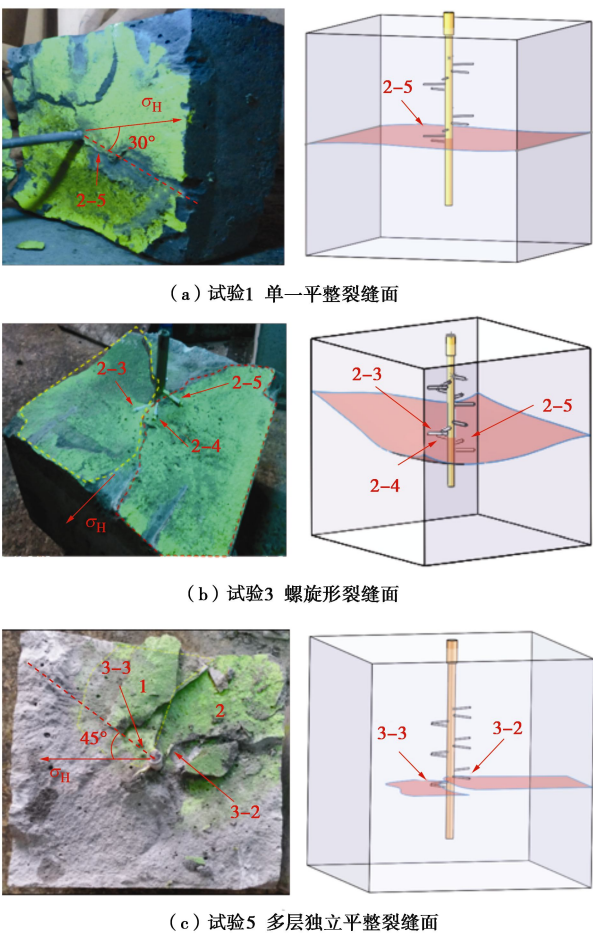


图 3 水平井螺旋射孔水力裂缝起裂位置与扩展形态

Fig. 3 Fracture initiation and propagation of spiral perforation in horizontal well

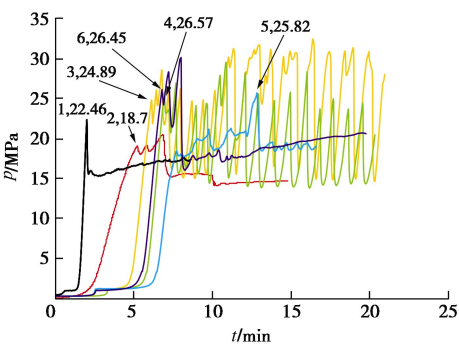


图 4 水平井螺旋射孔泵压曲线

Fig. 4 Fracture curves of spiral perforation in horizontal well

3 射孔参数影响分析

通过以上分析, 发现射孔参数的变化本质上改变孔间距大小 (AB 两点距离), 见图 5 所示。孔间距影响起裂孔眼之间的连通性, 进而影响裂缝扩展形态和岩石破裂压力。

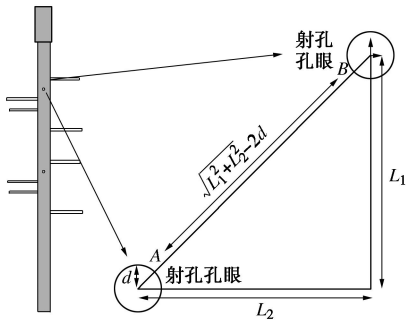


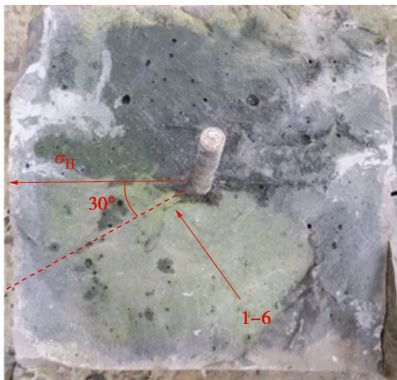
图 5 孔间距定义示意图

Fig. 5 Definition of perforation spacing

3.1 射孔长度的影响

射孔长度的变化并未改变相邻射孔孔间距，孔眼间相互作用和连通性并没有改善，水力裂缝起裂方式和扩展形态变化不大。试验 2 中靠近最大主应力方向上的射孔孔眼起裂，形成垂直于井筒的单一裂缝扩展面，与试验 1 的裂缝形态一致，见图 6。

从两者泵压曲线看出射孔长度的增加，使试验 2 的破裂压力降低。由于裂缝扩展时存在憋压现象，所受摩阻较大，导致试验 2 曲线较试验 1 曲线有多个尖点并且上下波动。



试验2

图 6 射孔长度为 4 cm 的水力裂缝起裂位置与扩展形态
Fig. 6 Fracture initiation and propagation under perforation length of 4 cm

3.2 射孔孔径的影响

对比试验 1 和 3 的试验结果，发现射孔孔径由 2 mm 增加至 4 mm，起裂孔眼数目增加，对裂缝形态影响很大。小孔眼条件下，裂缝之间水力裂缝连接性较差，裂缝起裂后倾向独立扩展，无法形成沟通尽量多孔眼的主裂缝。射孔孔径增加不仅造成单孔起裂压力降低，并且减少射孔孔间距，孔间作用增强，造成多孔眼依次起裂，使水力裂缝能有效沟通，形成螺旋型主裂缝扩展面，降低近井复杂裂缝形态。

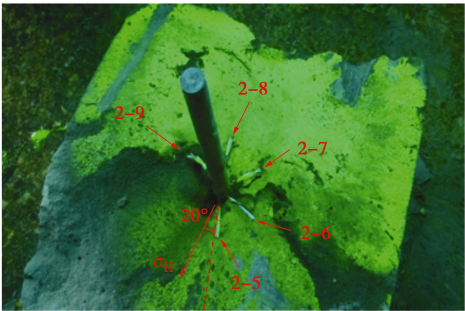
裂缝沿最大主应力方向扩展过程中存在憋压现象，导致试验 3 的最终破裂压力反而高于试验 1（理论上射孔孔径增加，岩石破裂压力降低）。对比试验 1

和试验 3 的泵压曲线可看出，试验 3 中的射孔孔眼依次起裂和不平整的螺旋型水力裂缝面引起缝内压裂液流速不均，两者作用导致曲线上下波动不平稳。

3.3 射孔密度的影响

射孔密度由 12 孔/cm 增加至 18 孔/cm（试验 1 和 4 对比），发现高孔密条件下，孔间距大幅度减小，孔间作用增强，易多孔起裂，相互沟通连接形成螺旋形裂缝面，见图 7。

起裂孔眼依次起裂和孔间相互沟通过程中存在憋压现象，导致试验 4 的曲线上下波动并且岩石破裂压力值增大（理论上射孔密度的增加，能降低试验破裂压力^[11]）。

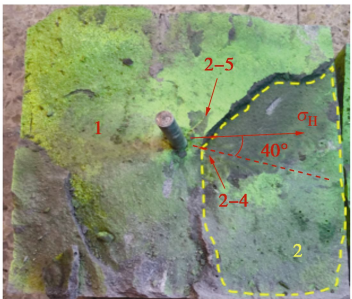


试验4

图 7 射孔密度为 18 孔/cm 的水力裂缝起裂位置与扩展形态
Fig. 7 Fracture initiation and propagation under perforation density of 18 holes/cm

3.4 射孔相位的影响

射孔相位由 60° 变为 90°（对比试验 1 和 5），由于射孔相位变大，间接导致孔间距相对增大，相邻射孔孔眼之间的相互连通作用变弱，不利于水力裂缝的相互连接，易产生分层裂缝面，增加近井裂缝复杂性。从其泵压曲线可以看出，射孔相位的增加，岩石破裂难度加大，破裂压力增高。破裂压力随射孔相位的变化规律与 Alekseenko 等^[12]的数值模拟结果一致。



试验6

图 8 射孔簇间距为 4 cm 的水力裂缝起裂位置与扩展形态
Fig. 8 Fracture initiation and propagation under perforation spacing of 4 cm

3.5 射孔簇间距的影响

射孔簇间距由 2 cm 变为 4 cm 时（对比试验 1 和 6），同一射孔簇上的孔间距未改变，相邻射孔孔眼之

间连通性未改善, 多孔起裂时易形成多层独立平整裂缝面(图 8)。试验 9 的起裂点多于试验 1, 导致其压裂曲线有多个尖点, 但都形成平整裂缝面, 因此曲线后部分走向趋势一致。

4 结论与认识

(1)射孔孔径和射孔密度的增加均能减小射孔间距, 易多孔眼起裂, 水力裂缝间能够相互作用, 有效沟通, 降低近井复杂裂缝形态和岩石破裂压力。因此现场在保证套管强度的基础上, 可适当增加射孔孔径或射孔密度(20 孔/m 或 22 孔/m), 一方面降低破裂压力, 另一方面在一定程度上增加相邻孔眼间水力裂缝的连接性, 形成沟通多孔眼的主裂缝面。

(2)射孔相位角度增加不利于水力裂缝的相互连接, 易产生分层裂缝面, 增加了近井裂缝复杂性, 并且破裂压力值高。通过大量调研发现, 相比于 90° 与 120° 射孔相位, 45° 与 60° 射孔相位破裂压力更低。考虑射孔对套管强度的影响, 现场应优选 60° 射孔相位, 一方面减小射孔间水力裂缝的连接距离, 降低裂缝复杂性, 另一方面有利于降低破裂压力。

(3)改变射孔孔深对压裂形成的横切缝扩展形态影响不大, 射孔参数优化设计时可弱化其产生的影响。

(4)在真三轴水力压裂物理模拟试验中, 由于试件的尺寸过小, 裂缝从一簇起裂之后会快速扩展至边界, 射孔簇对裂缝形态的影响不明显, 有待进一步数值模拟研究。

参考文献:

- [1] DANESHY A A. Experimental investigation of hydraulic fracturing through perforations[J]. Journal of Petroleum Technology, 1973, **25**(10): 1201 - 1206.
- [2] 张广清, 陈 勉, 殷有泉, 等. 射孔对地层破裂压力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(1): 40 - 44. (ZHANG Guang-qing, CHEN Mian, YIN You-quan, et al. Study on influence of perforation on formation fracturing pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(1): 40 - 44. (in Chinese))
- [3] BEHRMANN L A, ELBEL J L. Effect of perforations on fracture initiation[J]. Journal of Petroleum Technology, 1991, **43**(5): 608 - 615.
- [4] 侯 冰, 陈 勉, 刁 策, 等. 砂泥交互储层定向井压裂裂缝穿层扩展真三轴试验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, **15**(26): 54 - 59. (HOU Bing, CHEN Mian, DIAO Ce, et al. True triaxial experimental study of hydraulic fracture penetrating sand and mud interbedding in deviated wellbore[J]. Science Technology and Engineering, 2015, **15**(26): 54 - 59. (in Chinese))
- [5] VEEKEN M, DAVIES D R, WALTERS J V. Limited communication between hydraulic fracture and deviated wellbore[C]// SPE 18982-MS. Presented at the SPE Joint Rocky Mountain Regional/Low Permeability Reservoirs Symposium and Exhibition. Denver, 1989.
- [6] VAN De Ketterij R G, DE PATER C J. Impact of perforations on hydraulic fracture tortuosity[J]. SPE Production & Facilities, 1999, **14**(02): 117 - 130.
- [7] 姜 浒, 陈 勉, 张广清, 等. 定向射孔对水力裂缝起裂与延伸的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(7): 1321 - 1326. (JIANG Hu, CHEN Mian, ZHANG Guang-qing, et al. Impact of oriented perforation on hydraulic fracture initiation and propagation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(7): 1321 - 1326. (in Chinese))
- [8] WATERS G, WENG X W. The impact of geomechanics and perforations on hydraulic fracture initiation and complexity in horizontal well completions[C]// SPE 18164. Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dubai, 2016.
- [9] 柳贡慧, 庞 飞, 陈治喜. 水力压裂模拟试验中的相似准则[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2000, **24**(5): 45 - 48. (LIU Gong-hui, PANG fei, CHEN Zhi-xi. Development of scaling laws for hydraulic fracture simulation tests[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2000, **24**(5): 45 - 48. (in Chinese))
- [10] 侯 冰, 张儒鑫, 刁 策, 等. 大斜度井水力压裂裂缝扩展模拟试验分析[J]. 中国海上油气, 2016, **28**(5): 85 - 91. (HOU Bing, ZHANG Ru-xin, DIAO Ce, et al. Experimental study on hydraulic fracture propagation in highly deviated wells[J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, **28**(5): 85 - 91. (in Chinese))
- [11] 虞建业, 沈 飞, 顾庆宏, 等. 水平井射孔参数对压裂起裂压力的影响[J]. 油气地质与采收率, 2011, **18**(1): 105 - 107, 110 - 118. (YU Jian-ye, SHEN Fei, GU Qing-hong, et al. Influence of perforation parameters on hydraulic fracturing of fracture pressure in horizontal well[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, **18**(1): 105 - 107, 110 - 118. (in Chinese))
- [12] ALEKSEENKO O P, POTAPENKO D I, CHEMA S G et al. 3D modeling of fracture initiation from perforated noncemented wellbore[J]. SPE Journal, 2012, **18**(3): 589 - 600.