

·油气钻采工程·

工程参数对致密油藏压裂水平井产能的影响

林旺^{1,2}, 范洪富¹, 刘立峰², 孙兵²

(1.中国地质大学(北京),北京 100083; 2.中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要: 中国陆相致密油藏储层物性差,非均质性强,大规模体积压裂往往形成复杂的缝网结构,次级裂缝对产能的影响有着不可忽略的影响。为此,利用数值模拟方法,通过局部加密网格的方法,设计包含主裂缝和次级裂缝的椭圆形缝网,对新疆X油田致密油藏在经过大规模体积压裂后的单井生产动态进行模拟,分析压裂水平井的产能影响因素。结果表明,水平井单井产能随水平井段长度、压裂规模、储层改造体积、缝网复杂程度和裂缝导流能力的增加而增大,但增幅越来越小,均存在一个最优范围。利用正交试验法,将工程参数对产能的影响程度进行排序,发现对致密油藏压裂水平井产能影响程度由大到小依次为储层改造体积、压裂规模、缝网复杂程度、水平井段长度和裂缝导流能力。

关键词: 致密油藏 压裂水平井 储层改造体积 压裂规模 缝网复杂程度

中图分类号: TE357.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2017)06-0120-07

Effect of engineering parameters on fractured horizontal well productivity in tight oil reservoirs

Lin Wang^{1,2}, Fan Hongfu¹, Liu Lifeng², Sun Bing²

(1.China University of Geosciences(Beijing), Beijing City, 100083, China; 2.PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China)

Abstract: The continental tight oil reservoirs in China have poor physical properties and strong heterogeneity. Large-scale stimulated reservoir volume(SRV)fracturing often induces complex fractured networks, and the influence of secondary fractures on productivity cannot be ignored. An ellipsoid fracture network including main fractures and secondary fractures was designed by local grid refinement, and the production dynamic of fractured horizontal wells in Xinjiang X Oilfield was simulated by numerical simulation. The influencing factors of the productivity of the fractured horizontal wells were analyzed. The results show that the productivity of horizontal well increases with the increase of length of the horizontal section, fracturing scale, SRV, fracture network complexity and fracture conductivity, but the trend of increasing gradually decreases. There is an optimal range for each parameter. The orthogonal experiment was also used to sort the influencing degree of each engineering parameter on the productivity, and it is shown that the SRV has the greatest influence on the productivity of the fractured horizontal well in tight oil reservoirs, which is followed by fracture scale, fracture network complexity, horizontal well length and fracture conductivity.

Key words: tight oil reservoir; fractured horizontal well; simulated reservoir volume; fracture scale; complex degree of fracture network

近年来,伴随世界油气需求的持续增长和常规油气产量的不断下降,致密油已成为石油行业开发的热点^[1-8]。中国致密油以陆相沉积为主,分布面积

偏小、物性差,具有产量低、采收率低、效益差的特点,需要采用大规模的体积压裂与水平井相结合的技术才能进行有效经济地开发^[9]。目前中外对于致

收稿日期:2017-07-03。

作者简介:林旺(1982—),男,广西桂林人,工程师,在读博士研究生,从事油气田开发研究。联系电话:15001237631, E-mail: linwang2010@petrochina.com.cn。

基金项目:国家“863”项目“致密砂岩油气藏数值模拟技术与软件”(2013AA064902)。

密油藏压裂水平井产能的研究方法主要分为3类:一是利用水电相似原理进行电模拟^[10-16],二是利用等值渗流阻力法、势叠加原理及保角变换原理等方法^[17-28],三是数值模拟分析方法^[29-35]。前2类仅能计算均质油藏产能,第3类克服了物理模拟与解析法的不足,可以进行复杂压裂井的产能分析,但目前的研究大多局限于简单裂缝的分析^[30-31]。由于致密油藏脆性的非均质性强,大规模体积压裂往往形成复杂的缝网结构,次级裂缝对产能有着不可忽略的影响。为此,笔者利用Eclipse数值模拟软件,对新疆X油田的致密油藏在经过大规模体积压裂后的单井产能进行模拟研究,获得压裂水平井不同工程参数下的产量曲线以及5 a的累积产油量,分析水平井段长度、压裂规模、储层改造体积、缝网复杂程度和裂缝导流能力等参数对单井产能的影响规律,并利用正交试验法,对各因素的影响程度进行排序,确定单井产能的主控因素,以期为压裂水平井工程参数的优化设计提供依据。

1 油藏概况

新疆X油田致密油资源量大,是中国首批重点攻关的致密油开发研究试验区。该储层岩石化学成分复杂,以溶孔、粒内溶孔为主,孔喉细小、孔隙结构复杂,储层物性差。油藏埋深为3 050 m,有效储层厚度为10 m,基质孔隙度为12%,基质渗透率为0.01 mD,具有典型的低孔、低渗透特征;地层温度为81.23 ℃,地层压力为36.77 MPa,属于正常温压系统;地面原油密度为843 kg/m³,地层原油粘度为10.58 mPa·s,地层体积系数为1.06,地层压缩系数为 8.41×10^{-4} MPa⁻¹,溶解气密度为1.22 kg/m³,地层水密度为1 000 kg/m³,原始含水饱和度为22%。

2 模型建立

为了研究压裂水平井工程参数对新疆X油田致密油藏水平井单井产能的影响规律,以该油藏的实际地质和流体参数为依据,运用Eclipse软件的黑油模型,以油水两相为研究对象,选择单孔单渗的渗流模型,通过局部加密网格的方法,设计包含主裂缝和次级裂缝的椭球形缝网,模拟体积压裂形成缝网条件下的产能。模型网格和压裂水平井工程参数基础数据主要包括:储层规模为2 000 m×500 m×10 m,网格规模为20 m×20 m×10 m,网格数量为100×25×1共2 500个,水平井段长度为1 560 m,井

筒半径为0.1 m。人工裂缝参数主要包括:压裂级数为17级,主裂缝导流能力为200 mD·m,次级裂缝导流能力为60 mD·m,裂缝半长为140 m,次级裂缝数量为4条,假定为单簇压裂。

3 压裂水平井产能影响因素及影响程度

3.1 影响因素

3.1.1 水平井段长度

水平井段长度是影响压裂水平井产能的重要因素。水平井段越长,井控储量越大,定产生产的稳产期越长。在保持压裂级数、裂缝长度、裂缝导流能力等人工裂缝参数不变的条件下,模拟不同水平井段长度下5 a的累积产油量。模拟结果(图1,图2)表明:①随着生产的进行,累积产油量增幅逐渐变缓,即产油量越来越低。这是压力降落波及到储层改造区域之外,基质的渗流能力比储层改造区域的渗流能力低所致。②累积产油量随着水平井段长度的增加而增加,当水平井段长度大于1 300 m时,累积产油量增幅逐渐变小。这是因为:在压裂级数不变的条件下,水平井段越长,裂缝间距越大,裂缝间的干扰也越小,当水平井段足够长时,裂缝

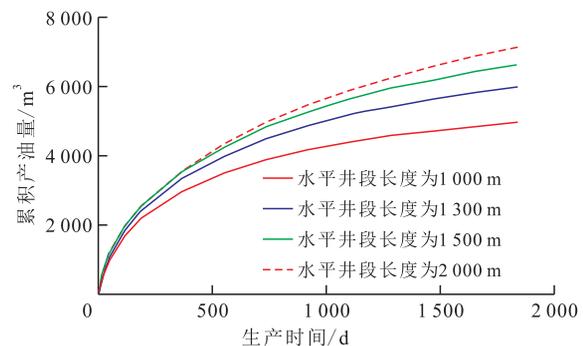


图1 不同水平井段长度时累积产油量随时间的变化
Fig.1 Variation of cumulative oil production of different horizontal lengths with time

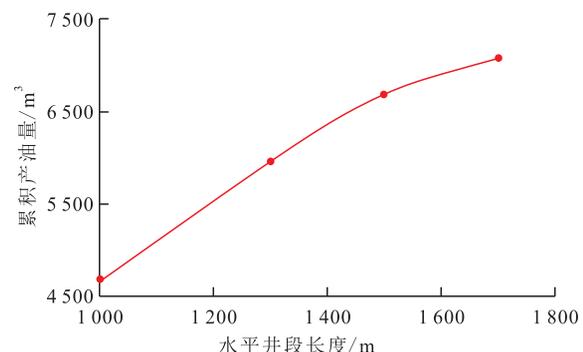


图2 不同水平井段长度时5 a末累积产油量对比
Fig.2 Five-year production of different horizontal lengths

间的干扰就更小,若再增加水平井段长度,对裂缝间干扰的改善也越来越小,对累积产油量增加的贡献也就越来越小。因此,为获得既经济又高产的压裂效果,最优的水平井段长度为1 300~1 700 m。

3.1.2 压裂规模

水平井的压裂规模可以用压裂级数来表征,压裂级数越多,泵注的压裂液越多,压裂规模越大。为了研究压裂规模对产能的影响,保持水平井段长度、裂缝长度、裂缝导流能力等参数不变,压裂级数分别取14,15,16,17,18,19和20,分析生产5 a的累积产油量。

由图3可以看出:随着生产的进行,累积产油量增幅越来越缓慢,反映了日产油量越来越小。这是由于生产初期的高产消耗了更多地层能量所致。图4表明,累积产油量随着压裂级数的增加而增加,但当压裂级数大于18时,累积产油量增幅变小。这是因为,压裂规模越大,产能越高,但储层的可动面积是一定的,当压裂规模达到一定程度后,再加大压裂规模,储层内的原油已大部分被动用,产能的增幅不再显著。因此,最优的水平井压裂级数为17~19。

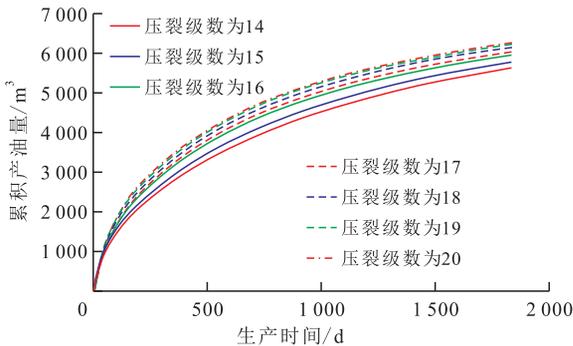


图3 不同压裂级数时累积产油量随时间的变化

Fig.3 Variation of cumulative oil production of different numbers of fracture sections with time

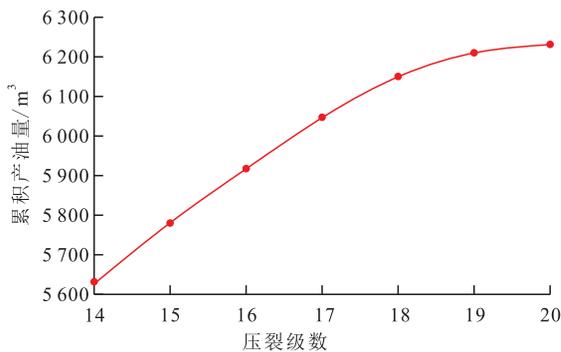


图4 不同压裂级数时5 a末累积产油量对比

Fig.4 Five-year production of different numbers of fracture sections

3.1.3 储层改造体积

采用矩形裂缝模型,当储层厚度一定时,体积

压裂的储层改造体积可以用主裂缝长度和水平井筒长度表征。为了研究储层改造体积对产能的影响,保持压裂级数、次级裂缝长度、裂缝导流能力等参数不变,模拟计算储层改造体积分别为 260×10^4 , 312×10^4 , 364×10^4 , 416×10^4 , 468×10^4 和 546×10^4 m³时的累积产油量。结果表明,累积产油量随着生产的进行增幅越来越小(图5),即日产油量越来越小,同时,5 a末的累积产油量随着储层改造体积的增加而增加,但增幅越来越小(图6),当储层改造体积增至约 416×10^4 m³时,累积产油量出现明显拐点。因此,最优的储层改造体积为 $416 \times 10^4 \sim 480 \times 10^4$ m³。

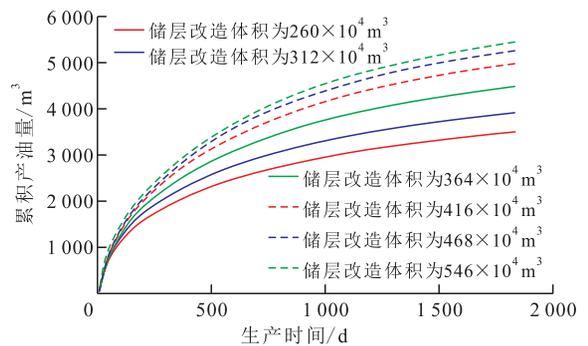


图5 不同储层改造体积时累积产油量随时间的变化

Fig.5 Variation of cumulative oil production of different SRVs with time

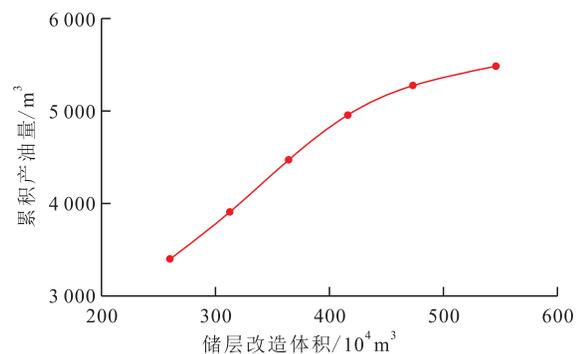


图6 不同储层改造体积时5 a末累积产油量对比

Fig.6 Five-year production curve of different SRVs

3.1.4 缝网复杂程度

在其他人工裂缝参数不变的情况下,缝网复杂程度可以用次级裂缝的数量来表征。理论上讲,缝网越复杂,体积裂缝能够控制的区域越大,产能越高。但是当缝网过于复杂时,次级裂缝间可能会形成干扰,产能增加不明显。因此存在最优的次级裂缝数量。

为了研究缝网复杂程度对产能的影响,保持水平井段长度、压裂级数、主裂缝长度、次级裂缝长度、裂缝导流能力等参数不变,次级裂缝数量分别取2,4,6和8条,分析生产5 a的累积产油量。模拟结果(图7,图8)表明:随着时间的增加,累积产油量

增幅越来越小,说明日产油量逐渐下降;随着次级裂缝数量的增多,累积产油量逐渐增加,但当次级裂缝数量大于6条时,累积产油量增幅明显变小。这是因为,6条次级裂缝时已经基本动用裂缝附近的储层,再增加次级裂缝数量对累积产油量的贡献就很小了。因此最优的次级裂缝数量为5~7条。

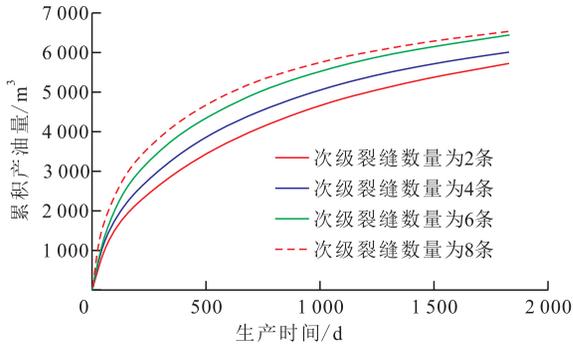


图7 不同缝网复杂程度时累积产油量随时间的变化
Fig.7 Variation of cumulative oil production with time at different complex degrees of fracture network

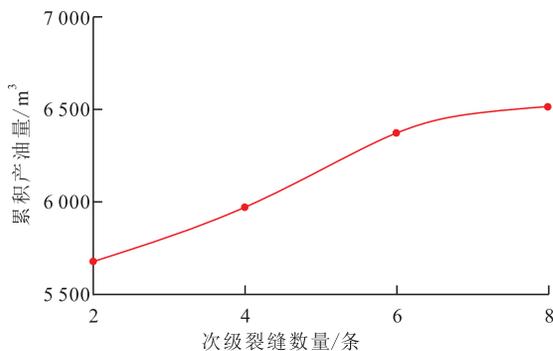


图8 不同缝网复杂程度时5 a末累积产油量对比
Fig.8 Five-year oil production at different complex degrees of fracture network

3.1.5 裂缝导流能力

裂缝导流能力是影响产能的重要因素,裂缝的导流能力与压裂液排量、砂浓度、支撑剂性质等相关。为了研究裂缝导流能力对产能的影响,保持水平井段长度、压裂级数、主裂缝长度、次级裂缝长度和次级裂缝数量等参数不变,主裂缝导流能力取100, 150, 200, 250和300 mD·m,分析生产5 a的累积产油量。

模拟结果(图9,图10)表明:随着生产时间的进行,累积产油量增幅越来越缓慢;累积产油量随着裂缝导流能力的增加而增加,但当导流能力大于200 mD·m时,累积产油量增幅明显变小。这是因为,裂缝导流能力只是提高了裂缝中的流体流动能力,当裂缝中的流动能力足以排出从基质流入到裂缝中的流体时,油井产量就取决于流体从基质到裂缝中的流动能力了。因此,最优的人工裂缝导流能力为200~300 mD·m。

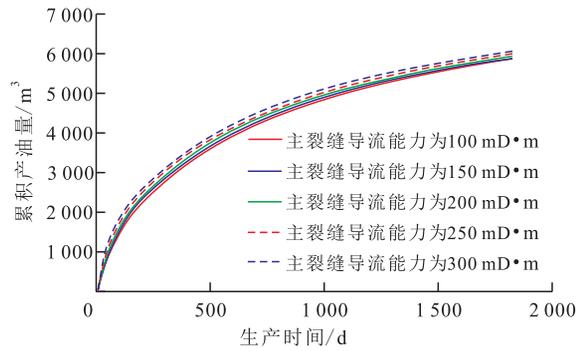


图9 不同裂缝导流能力时累积产油量随时间的变化
Fig.9 Variation of cumulative oil production with time under different fracture conductivities

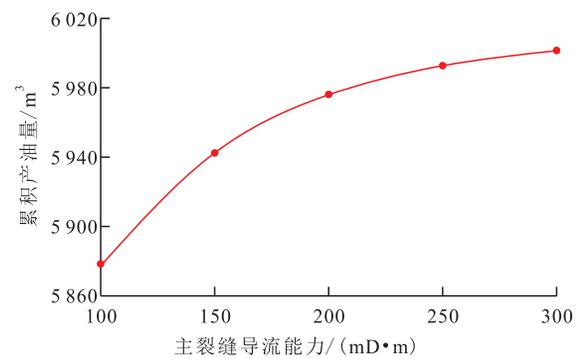


图10 不同裂缝导流能力时5 a末累积产油量对比
Fig.10 Five-year oil production under different fracture conductivities

3.2 影响程度

正交试验设计和分析方法是目前最常用的工艺优化试验设计和分析方法,采取部分试验来代替全面试验的方法,通过对代表性试验的结果分析以了解全面试验的情况,是部分因子设计的主要方法^[36]。正交试验以概率论、数理统计和实践经验为基础,利用标准化正交表设计试验方案,并对结果进行计算分析,根据各因素水平分别求解因素各水平下的总响应值和平均响应值,并根据各水平下的平均响应值求出因素水平对目标的效应极差,根据极差大小判断主次因素的顺序。

为研究工程参数对致密油藏水平井压裂后产能的影响程度,考虑水平井段长度、压裂级数、储层改造体积、次级裂缝数量和人工裂缝导流能力共5个参数,按照标准化正交表设计正交试验,每个参数设计3个水平,共设计18个实验方案(表1),分别进行模拟计算并进行统计分析。

模拟统计结果(图11)表明,储层改造体积对致密油藏压裂水平井产能影响最大,压裂级数(压裂规模)次之,裂缝导流能力最小。因此,在工艺及经济条件允许的前提下,应优先提高储层改造体积和压裂级数(压裂规模),再考虑增加水平井段长度和次级裂缝数量(缝网复杂程度)。

表1 工程参数正交试验方案及模拟结果

Table1 Orthogonal experiment plans and simulated result of different engineering parameters

方案编号	水平井段长度/m	压裂级数	储层改造体积/ 10^4 m^3	次级裂缝数量/条	裂缝导流能力/($\text{mD}\cdot\text{m}$)	5 a 累积产油量/ m^3
1	1 400	17	338	2	200	5 409
2	1 400	18	364	4	250	6 276
3	1 400	19	390	6	300	7 485
4	1 500	17	338	4	250	6 089
5	1 500	18	364	6	300	7 109
6	1 500	19	390	2	200	6 636
7	1 600	17	364	2	300	6 268
8	1 600	18	390	4	200	7 046
9	1 600	19	338	6	250	7 131
10	1 400	17	390	6	250	7 015
11	1 400	18	338	2	300	5 622
12	1 400	19	364	4	200	6 494
13	1 500	17	364	6	200	6 811
14	1 500	18	390	2	250	6 536
15	1 500	19	338	4	300	6 415
16	1 600	17	390	4	300	7 099
17	1 600	18	338	6	200	6 876
18	1 600	19	364	2	250	6 566

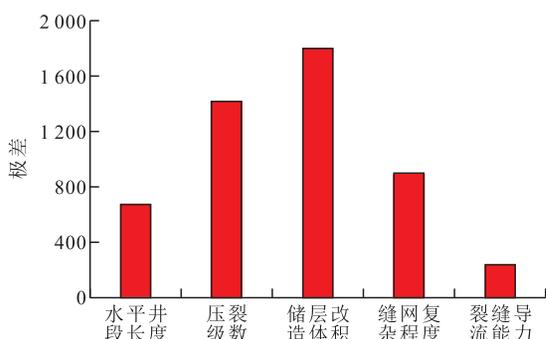


图11 工程参数对致密油藏压裂水平井产能影响程度

Fig.11 Influencing degree of different engineering parameters on the productivity of fractured horizontal well in tight oil reservoir

4 结论

致密油藏压裂水平井单井产能随水平井段长度、压裂规模、储层改造体积、缝网复杂程度和人工裂缝导流能力的增加而增大,但增幅越来越小,对于一个特定的油藏来说,各参数均存在一个最优范围,需要对各参数分别进行优选。

对于新疆X油田致密油藏,最优的水平井段长度为1 300~1 700 m,最优压裂级数为17~19,最优储层改造体积为 $416\times 10^4\sim 480\times 10^4 \text{ m}^3$,最优次级裂缝数量为5~7条,最优人工裂缝导流能力为200~300

$\text{mD}\cdot\text{m}$ 。

利用正交试验法将压裂水平井工程参数对单井产能的影响程度进行分析,结果表明,储层改造体积对致密油藏压裂水平井产能影响最大,压裂级数(压裂规模)次之,裂缝导流能力最小,次级裂缝数量(缝网复杂程度)、水平井段长度居中。

参考文献:

- [1] 时保宏,黄静,陈柳,等.鄂尔多斯盆地晚三叠世湖盆中部延长组7储层致密化因素分析[J].石油实验地质,2016,38(4):528-535.
Shi Baohong, Huang Jing, Chen Liu, et al. Compaction factors of tight reservoirs in the seventh member of Yanchang Formation in the central Ordos Basin during the Late Triassic[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(4): 528-535.
- [2] 崔景伟,朱如凯,李士祥,等.致密砂岩油可动量及其主控因素:以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7为例[J].石油实验地质,2016,38(4):536-542.
Cui Jingwei, Zhu Rukai, Li Shixiang, et al. Movable oil and its controlling factors in tight sandstones: A Case study of the Triassic Chang7 reservoir, Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(4): 536-542.
- [3] 史杰青,邓南涛,张文哲,等.国外致密油增产技术发展及中国致密油开发建议[J].当代化工,2015,44(2):335-337.
Shi Jieqing, Deng Nantao, Zhang Wenzhe, et al. Development of yield-increasing technique of overseas tight oil and suggestions on exploitation and development of Chinese tight oil [J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, 44(2): 335-337.
- [4] 张涵冰,彭军,杨素举,等.致密砂岩储层成岩作用及其控制因素分析:以塔里木盆地顺托果勒地区志留系柯坪塔格组下段为例[J].石油实验地质,2016,38(4):543-550.
Zhang Hanbing, Peng Jun, Yang Suju, et al. Diagenesis and controlling factors of tight sandstone reservoirs: A case study of the lower member of Silurian Kepingtage Formation in Shuntuoguole area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(4): 543-550.
- [5] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J].石油学报,2012,33(2):173-187.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [6] 张以明,付小东,郭永军,等.二连盆地阿南凹陷白垩系腾一下段致密油有效储层物性下限研究[J].石油实验地质,2016,38(4):551-558.
Zhang Yiming, Fu Xiaodong, Guo Yongjun, et al. Petrophysical property limits of effective tight oil reservoirs in the lower part of the first member of Cretaceous Tengger Formation, A'nan Sag, Erlian Basin, North China [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(4): 551-558.

- [7] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [8] 张新顺, 王红军, 马锋, 等. 致密油资源富集区与“甜点区”分布关系研究——以美国威利斯顿盆地为例[J]. 石油实验地质, 2015, 37(5): 619-626.
Zhang Xinshun, Wang Hongjun, Ma Feng, et al. Relationship between resource-rich regions and sweet spots for tight oils: A case study of the Williston Basin in the USA[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5): 619-626.
- [9] 杜金虎, 刘合, 马德胜, 等. 试论中国陆相致密油有效开发技术[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 198-205.
Du Jinhu, Liu He, Ma Desheng, et al. Discussion on effective development techniques for continental tight oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 198-205.
- [10] 李廷礼, 李春兰. 低渗油气藏压裂水平井产能电解模拟实验研究[J]. 中国海上油气, 2005, 17(6): 389-393, 397.
Li Tingli, Li Chunlan. The electrolytic simulation experiment research of fractured horizontal well's productivity in low permeability reservoirs[J]. China Offshore Oil and Gas, 2005, 17(6): 389-393, 397.
- [11] 高海红, 程林松, 曲占庆. 压裂水平井裂缝参数优化研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2006, 21(2): 29-32.
Gao Haihong, Cheng Linsong, Qu Zhanqing. Optimization of the fracture parameters of fractured horizontal wells[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2006, 21(2): 29-32.
- [12] 高海红, 曲占庆, 赵梅. 压裂水平井产能影响因素的实验研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(4): 73-76.
Gao Haihong, Qu Zhanqing, Zhao Mei. Experimental study on the factors affecting the productivity of fractured horizontal well[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2008, 30(4): 73-76.
- [13] 吴晓东, 隋先富, 安永生, 等. 压裂水平井电模拟实验研究[J]. 石油学报, 2009, 30(5): 740-743.
Wu Xiaodong, Sui Xianfu, An Yongsheng, et al. Electrolytic simulation experiment of fractured horizontal well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 740-743.
- [14] 袁帅, 李春兰, 曾保全, 等. 压裂水平井裂缝参数优化实验[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(4): 99-103.
Yuan Shuai, Li Chunlan, Zeng Baoquan, et al. Experimental study on optimization of fracture parameters in horizontal well fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 99-103.
- [15] 曾保全, 程林松, 李春兰, 等. 特低渗透油藏压裂水平井开发效果评价[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 791-796.
Zeng Baoquan, Cheng Linsong, Li Chunlan, et al. Development evaluation of fractured horizontal wells in ultra-low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 791-796.
- [16] 杜保健, 程林松, 黄世军. 致密油藏分段多簇压裂水平井电模拟实验研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(12): 3 267-3 270.
Du Baojian, Cheng Linsong, Huang Shijun. Study on electrolytic simulation experiment of segmented multi-cluster fractured horizontal well in tight oil reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(12): 3 267-3 270.
- [17] 郎兆新, 张丽华, 程林松. 压裂水平井产能研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1994, 18(2): 43-46.
Lang Zhouxin, Zhang Lihua, Cheng Linsong. Investigation on productivity of fractured horizontal wells[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1994, 18(2): 43-46.
- [18] 宁正福, 韩树刚, 程林松, 等. 低渗透油气藏压裂水平井产能计算方法[J]. 石油学报, 2002, 23(2): 68-71.
Ning Zhengfu, Han Shugang, Cheng Linsong, et al. Productivity calculation method of fractured horizontal wells in low permeability oil or gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(2): 68-71.
- [19] 曾凡辉, 郭建春, 徐严波, 等. 压裂水平井产能影响因素[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 474-477.
Zeng Fanghui, Guo Jianchun, Xu Yanbo, et al. Factors affecting production capacity of fractured horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 474-477.
- [20] 丁一萍, 王晓冬, 邢静. 一种压裂水平井产能计算方法[J]. 特种油气藏, 2008, 15(2): 64-68.
Ding Yiping, Wang Xiaodong, Xing Jing. A method of productivity calculation for fractured horizontal well[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2008, 15(2): 64-68.
- [21] 杨俊峰, 芮捍东, 田建波, 等. 致密油藏多段压裂水平井初始产能影响因素分析[J]. 石油地质与工程, 2014, 28(6): 65-68.
Yang Junfeng, Rui Hangdong, Tian Jianbo, et al. Influencing factors analysis of multi-stage fractured horizontal wells' initial productivity in dense reservoirs[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2014, 28(6): 65-68.
- [22] 魏漪, 宋新民, 冉启全, 等. 致密油藏压裂水平井非稳态产能预测模型[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(1): 67-72.
Wei Yi, Song Xinmin, Ran Qiquan, et al. An unstable productivity prediction model for fractured horizontal well in tight oil reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(1): 67-72.
- [23] 魏漪, 冉启全, 童敏, 等. 致密油储层压裂水平井产能预测与敏感性因素分析[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2014, 29(6): 691-699.
Wei Yi, Ran Qiquan, Tong Min, et al. Productivity prediction and sensitivity analysis of fractured horizontal well in tight oil reservoirs[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics: Series A, 2014, 29(6): 691-699.
- [24] 徐模, 郭肖. 压裂水平井布缝方式及裂缝参数优化新方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(6): 93-98.
Xu Mo, Guo Xiao. New optimizing method of the fracture arrangement and parameters for fractured horizontal wells[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(6): 93-98.
- [25] 李志强, 赵金洲, 胡永全, 等. 致密油层多区体积压裂产能预测[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(1): 134-138.
Li Zhiqiang, Zhao Jinzhou, Hu Yongquan, et al. Productivity forecast of tight oil reservoirs after multi-zone stimulated reservoir volume fracturing[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency

- cy, 2016, 23(1): 134-138.
- [26] 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.
- [27] 徐黎明, 王利明, 牛小兵, 等. 致密油藏体积压裂水平井动用规律——以长庆油田为例[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(6): 87-93.
Xu Liming, Wang Liming, Niu Xiaobing, et al. Drainage boundary laws of horizontal well with stimulated reservoir volume fracturing in tight oil reservoirs: A case study of Changqing oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(6): 87-93.
- [28] 苏玉亮, 王文东, 周诗雨, 等. 体积压裂水平井三线性流模型与布缝策略[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 435-440.
Su Yuliang, Wang Wendong, Zhou Shiyu, et al. Trilinear flow model and fracture arrangement of volume-fractured horizontal well[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 435-440.
- [29] 彭晖, 刘玉章, 冉启全, 等. 致密油储层水平井产能影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5): 771-777.
Peng Hui, Liu Yuzhang, Ran Qiquan, et al. Study on the horizontal well production in tight oil reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5): 771-777.
- [30] 张健. 砂岩致密油水平井压裂开采参数优化设计[J]. 石油规划设计, 2015, 26(2): 11-13.
Zhang Jian. Optimization design of horizontal well fracturing for tight sandstone oil[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2015, 26(2): 11-13.
- [31] 闵春佳, 卢双舫, 唐明明, 等. 致密油储层水平井压裂参数优化模拟[J]. 断块油气田, 2015, 22(6): 794-797.
Min Chunjia, Lu Shuangfang, Tang Mingming, et al. Hydro-fracturing parameter optimization and simulation of horizontal well in tight oil reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(6): 794-797.
- [32] 唐汝众, 温庆志, 苏建, 等. 水平井分段压裂产能影响因素研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(2): 80-83.
Tang Ruzhong, Wen Qingzhi, Su Jian, et al. Factors affecting productivity of stage fractured horizontal well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(2): 80-83.
- [33] 曲占庆, 赵英杰, 温庆志, 等. 水平井整体压裂裂缝参数优化设计[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(4): 106-110.
Qu Zhanqing, Zhao Yingjie, Wen Qingzhi, et al. Fracture parameters optimization in integral fracturing of horizontal well[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(4): 106-110.
- [34] 梅显旺, 罗梅, 马威奇, 等. 致密油水平井多级压裂后产能影响因素分析[J]. 油气井测试, 2016, 25(4): 29-32.
Mei Xianwang, Luo Mei, Ma Weiqi, et al. Analysis of influencing factors on productivity after multistage fracturing to tight oil of horizontal well[J]. Well Testing, 2016, 25(4): 29-32.
- [35] 刘波涛, 李清泉, 张福祥, 等. 致密油藏多级压裂水平裂缝井不稳态产能分析[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 138-142.
Liu Botao, Li Qingquan, Zhang Fuxiang, et al. Rate transient analysis of multistage fractured wells with horizontal fractures in tight oil reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 138-142.
- [36] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.
Liu Ruijiang, Zhang Yewang, Wen Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55.

编辑 常迎梅

(上接第102页)

- [12] 元福卿, 王其伟, 李宗阳, 等. 油相对泡沫稳定性的影响规律[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(1): 118-121.
Yuan Fuqing, Wang Qiwei, Li Zongyang, et al. Relationship between oil and foam stability[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 118-121.
- [13] 马涛, 汤达祯, 张贵才, 等. 表面活性剂在油水界面的吸附行为[J]. 应用化工, 2007, 36(10): 1 017-1 020.
Ma Tao, Tang Dazhen, Zhang Guicai, et al. Adsorption behavior of surfactant in oil-water interface[J]. Applied Chemical Industry, 2007, 36(10): 1 017-1 020.
- [14] 谭晶. 表面活性剂与聚合物在油水和泡沫体系的加合增效机制研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
Tan Jing. Synergistic effects of surfactant mixtures and polymer/surfactant in oil/water and foam systems[D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [15] 庞占喜, 刘慧卿, 刘喜林. 多孔介质中气泡的生成机理及流动性研究[J]. 应用力学学报, 2009, 26(2): 207-211.
Pang Zhanxi, Liu Huiqing, Liu Xilin. Generation mechanisms and flow characteristics of steady foams in porous media[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2009, 26(2): 207-211.
- [16] 王志伟, 张毅, 魏淋生. 孔隙介质中泡沫形成机理研究进展[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(3): 8-11.
Wang Zhiwei, Zhang Yi, Wei Linseng. Review of foam generation mechanism in porous media[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22(3): 8-11.
- [17] 冯轩, 王中武, 毛天聪, 等. 薄层底水油藏控水用冻胶泡沫的室内研究[J]. 油田化学, 2015, 32(2): 204-208.
Feng Xuan, Wang Zhongwu, Mao Tiancong, et al. Laboratory research of water plugging with gel foam in thin-layered bottom-water reservoir[J]. Oilfield Chemistry, 2015, 32(2): 204-208.
- [18] 李传亮, 杨学锋. 底水油藏的压锥效果分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(5): 45-46, 49.
Li Chuanliang, Yang Xuefeng. Analysis on coning control of bottom water reservoir[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(5): 45-46, 49.

编辑 经雅丽