

引用格式:冯宁,彭小龙,薛晓军,等.浅层致密油藏空间编织井网开发数值模拟研究[J].油气藏评价与开发,2021,11(6):897-904.

FENG Ning, PENG Xiaolong, XUE Xiaojun, et al. Numerical simulation of spatial-braided bow-shape well pattern development in shallow tight reservoir[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(6): 897-904.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.06.015

## 浅层致密油藏空间编织井网开发数值模拟研究

冯宁<sup>1,2</sup>,彭小龙<sup>1</sup>,薛晓军<sup>2</sup>,王超文<sup>1</sup>,邓鹏<sup>1</sup>,吴昊强<sup>1</sup>

(1.西南石油大学油气藏地质及开发国家重点实验室,四川成都610500;

2.中国石油西部钻探工程有限公司地质研究院,新疆克拉玛依834000)

**摘要:**浅层致密油藏中水力压裂容易产生水平缝。对于水平井而言,多级压裂容易只生成一条大的水平缝,增产效果不佳。而“弓形水平井+多级水平缝”的单井方式,也不能有效动用此类油藏。为了进一步提高浅层致密油藏的动用程度,基于浅层油层钻井的可行性,提出了浅层致密油藏空间编织井网的开发方式,并采用数值模拟方法,验证了空间编织井网的有效性。数值模拟结果表明:在相同的井数和钻井进尺条件下,空间编织井网的油产量、累产油量、油藏采出程度高于正对井排和交错井排;不过随着水平压裂缝规模扩大,与交错井排的差距减小。同时,根据模拟得出采用七点井网注水补充了地层能量,也改变了渗流状态,使得区域边缘和井间剩余油得以有效驱替,采收率明显提高。研究结果为浅层致密油藏的高效开发提供借鉴。

**关键词:**浅层油藏;致密油藏;水平缝;弓形井;空间编织井网

中图分类号:TE349

文献标识码:A

### Numerical simulation of spatial-braided bow-shape well pattern development in shallow tight reservoir

FENG Ning<sup>1,2</sup>, PENG Xiaolong<sup>1</sup>, XUE Xiaojun<sup>2</sup>, WANG Chaowen<sup>1</sup>, DENG Peng<sup>1</sup>, WU Haoqiang<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2.CNPC Xibu Drilling Engineering Company Limited, Karamay, Xinjiang 834000, China)

**Abstract:** In shallow tight reservoirs, the hydraulic fracturing tends to produce horizontal fractures. For the horizontal wells, multi-stage fracturing is easy to generate only one large horizontal fracture, which leads to poor stimulation effect. However, the single well mode of “bow-shape horizontal well + multi-stage horizontal fractures” can not effectively explore this kind of reservoir. In order to further improve the production degree of shallow tight reservoir, the development mode of spatial-braided well pattern in shallow tight reservoir is proposed based on the feasibility of shallow reservoir drilling, and the numerical simulation is used to verify the effectiveness of spatial-braided well pattern. The numerical simulation results show that under the same number of wells and drilling footage, the oil production, cumulative oil production and reservoir recovery degree of spatial-braided well pattern are higher than those of the opposite well pattern and staggered well pattern. However, with the expansion of the fracture scale in horizontal fracturing, the gap with staggered well pattern decreases. At the same time, according to the simulation, the reverse 7-point pattern water injection not only replenishes the formation energy, but also changes the seepage state, so that the remaining oil in the regional edge and between wells can be effectively displaced, and the recovery rate is significantly improved. The researches provide efficient development method for the efficient development of shallow tight reservoir.

**Keywords:** shallow reservoir; tight reservoir; horizontal well; bow-shape well; spatial-braided well pattern

收稿日期:2021-01-22。

第一作者简介:冯宁(1984—),男,硕士,工程师,主要从事油气藏评价与开发工作。地址:四川省成都市新都区西南石油大学国家重点实验室,邮政编码:610500。E-mail:251720788@qq.com

基金项目:国家油气重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05015)。

随着国内油气需求快速增长,2020年原油进口 $5.42 \times 10^8$  t,对外依存度高达约64%。低渗透油气藏在增储上产中的地位更加凸显重要<sup>[1-6]</sup>。低渗、致密油藏的开发通常采用水平井配合多级水力压裂,大幅度地增加单井产量,提高油田整体经济效益<sup>[7-10]</sup>。通常情况下,油藏的最小主应力方向是水平方向。因此,压裂缝垂直发育<sup>[11-18]</sup>,长水平井配合多级压裂,可以有效增加油井与储层的接触面积<sup>[19-23]</sup>。

然而,在一些浅层致密油藏中,例如延长油田七里村采油厂的长6油藏,地层最小主应力方向为垂直方向,水力压裂容易产生水平缝<sup>[24]</sup>。同时,油藏厚度较小,直井开发效果差,但对于水平井而言,多级压裂容易只生成一条大的水平缝,增产效果不佳<sup>[25]</sup>。因此,延长油田采用“弓形水平井+多级水平缝”的新型开采方式,有效增加了多级水平缝的空间位置,提高了油井的泄流面积和增产效率<sup>[26-27]</sup>。但是,由于渗透率较低,“弓形水平井+多级水平缝”的单井方式并不能有效动用长6油藏。

为了进一步提高长6油藏的动用程度,浅层油层钻井的可行性,提出了浅层致密油藏空间编织井网的开发方式,并采用数值模拟方法,验证了空间编织井网的有效性,为浅层致密油藏的高效开发提供借鉴。

## 1 浅层致密油藏的编织井网

### 1.1 地质基础

七里村油田位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡的东南部,开发主力油层为延长油田的长6油层,该地层埋藏深度浅,利于开发,但岩石物性差,储层非均质性强。储层呈薄层交互沉积,非均质性较强,目前处于采衰竭开采阶段。自2013年投入开发至今,采用自然衰竭开发方案进行开采,根据调研,单井日均产量0.3 t。目前,已部署了一口大位移弓形井,初期产量

高达14 t/d,目前产量2.1 t/d,增产效果并不理想。

目标油藏在区域内分布稳定,统计厚度133~148 m,地层平均厚度为140 m,与区域厚度一致。各小层厚度横向展布较稳定。根据测井解释结果统计,在长61底部和长62段含油饱和度、孔隙度、渗透率较好,为该区的主要含油层段,长63、长64也有零星分布。根据研究区域现有岩心分析报告资料统计,储层孔隙度分布接近正态分布,主要分布区间8.1%~10.1%,平均孔隙度9.4%;渗透率级差较大,范围 $(0.02 \sim 8.8) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均渗透率 $1.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙度与渗透率关系呈指数关系,但个别数据由于裂缝的影响,导致相关性变差<sup>[28]</sup>。

长6油藏埋深较浅,油藏的最小主应力发育在垂向,压裂缝呈现水平状态。同时油藏的水平主应力差异也不大,钻井过程中,并没有非常明确的易钻方向。前期采用大位移弓形井解决了多层同时开采的问题,但增产效果有限,同时对三维空间上储层控制不强,再此基础上可以采取水平段方向正交的空间编织井网。因此,适用于空间编织井网的条件为储层最大、最小水平主应力差异较小;压裂易形成水平缝;储层渗透率较低且非均质性强的区域。

### 1.2 编织井网的设计

常规的井网由直井、水平井构成,或者水平井和直井的混合井网,它们在空间的某一维度上相同,由此三维空间的井网布置转换为二维面上的点的布置。典型的有正对排列、交错排列、反五点井网、反九点井网、反七点井网等等,都可以按照简单的拓扑性原理完成井网的设计。但是对于弓形井而言,完成三维空间控制的井网设计,只能从三维空间的角度设计。通过大量的数值模拟试算,提出了3种类型的井网:①平行正对排弓形井井网;②平行错位排弓形井井网;③编织状正交三维立体状弓形井井网(图1)。其中编织状三维立体状弓形井井网是设计

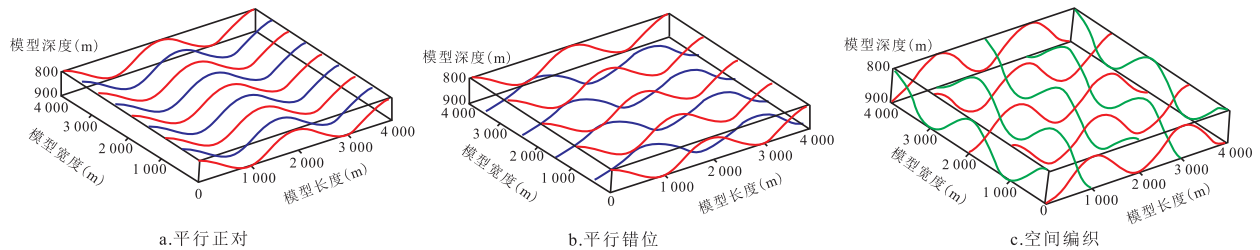


图1 3种弓形井的空间井网

Fig. 1 Three types of spatial well pattern for bow-shape horizontal well

的新型井网。

正对排弓形井井网如图1a所示,多口弓形井按相同的方向布置,基本沿着波形曲线布井。相邻的油井平行分布,峰点对应峰点,谷点对应谷点。这种类型的井网设计简单,但在三维空间的控制程度上存在薄弱区域。为了弥补正对排弓形井井网的弱点,图1b提出了错位排列弓形井井网,所有的弓形井仍然按照相同的方向布井,但相邻的油井虽然平行分布,但峰点对应谷点,谷点对应峰点,形成高低错位。编织状正交弓形井三维立体井网如图1c所示,弓形井的方向分为2组,每组油井按相同的方向布井,两组油井在平面的投影图上相互垂直,所以是一类正交井网。在每一组内,相邻的弓形井呈平行错位排列,整体的形状如同编织条的分布。

## 2 数值模拟方法

### 2.1 水平压裂缝模拟方法

目前处理压裂缝的方法有很多如局部网格加密、渗透率等效处理方法、表皮系数等效处理方法,垂直平分(PEBI)网格法,采用这些处理方法有一个明显的缺点就是运算速度慢,且不能精确模拟裂缝的形态。而采用离散式压裂缝嵌入到油藏网格系

统,网格厚度为零,压裂缝的方位、倾角、缝高、缝长等参数均可以实现准确模拟<sup>[29]</sup>。

离散压裂缝的网格系统其实为低维网格系统,网格没有厚度,但厚度以数值方式表示,网格的面积和空间的分布与实际的压裂缝基本相同。为了得到实际油井的水平压裂缝,采用压裂缝离散模型,根据应力和施工曲线对形成的压裂缝进行预测,然后再根据生产动态参数对产生的压裂缝缝长,缝密度等参数进行校正。在此采用tNavigator软件的压裂缝预测模块开展这项工作。

### 2.2 数值模型与参数设置

不考虑压裂缝的条件下,对比3种井网的衰竭式开采效果。根据对称原理,对称轴相当于不渗透界面,所以根据图1中对应井网提取单元,建立图2所示的数值模型,模型的尺寸为1 000 m×1 000 m×60 m。

同理根据图2中各种井网,按照对称轴与封闭边界的相似性,建立如图3所示的数值模型。图中的井轨迹显示为折线,这是由于数值模拟方法采用折线方式处理斜井的缘故。3个井网模型采用相同的油藏参数设置。

机理模型采用油水两相(后期注水模拟),具体参数设置如表1。

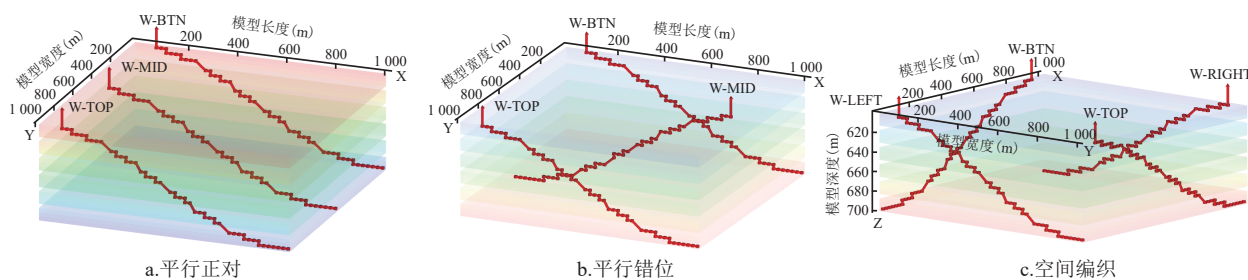


图2 3种弓形井的空间井网数值模型

Fig. 2 Simulation models of three types of spatial well pattern for bow-shape horizontal well

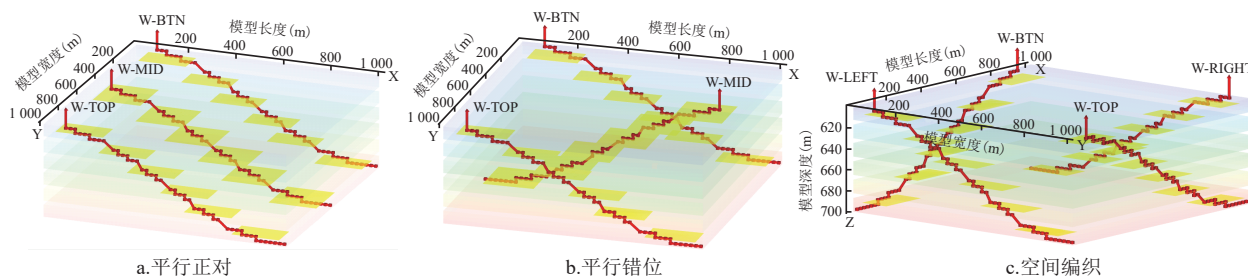


图3 3种弓形井多级水平缝压裂的空间井网数值模型

Fig. 3 Simulation models of three types of spatial well pattern for bow-shape horizontal well with horizontal fractures

### 3 结果讨论

#### 3.1 三类井网的开发效果

模拟计算 10 a,对比累产油量和产油量指标(图4)可知,未压裂条件下,弓形井的产油量递减较快,编织状正交弓形井可以有效控制储层。因此,单井产量较高,但仍难以维持稳产状态(图4a)。对于

累产油量(图4b),编织状正交弓形井三维立体井网明显好于其他2个井网。3种井网在未压裂条件下,开采效果由好到差依次为空间编织井网、平行错位井网以及平行正对井网。

对弓型井进行多层水平缝的压裂,油藏的地应力特征将导致所产生的裂缝主要为水平缝。水平缝的长宽大约为 200 m,图5显示了3种不同方案的数值模拟预测的结果。编织状正交弓形井可以有效控制储层,因此,单井产量较高,稳产时间较长。3种井网在压裂条件下都可以维持稳产状态(图5a)。对于累产油量(图5b),编织状正交弓形井三维立体井网明显好于其他2个井网。3种井网在压裂条件下,开采效果由好到差依次为空间编织井网、平行错位井网和平行正对井网。

3种井网生产5 a条件下的压力分布情况(图6)表明,空间编织井网由于生产井轨迹相互交错,引起了油藏的大面积压降,说明油井对储层存在有效控

表1 模拟参数设置

Table 1 Settings of simulation parameters

物性参数	参数值	物性参数	参数值
储层顶深(m)	500	孔隙度(%)	9
储层厚度(m)	12	渗透率( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	0.9
地层压力(MPa)	4.95	地层水黏度( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	1
地层原油密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0.83	地层水压缩系数( $\text{MPa}^{-1}$ )	0.000 05
地层原油黏度( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	4.29	原油压缩系数( $\text{MPa}^{-1}$ )	0.000 2
地层原油体积系数	1.036		

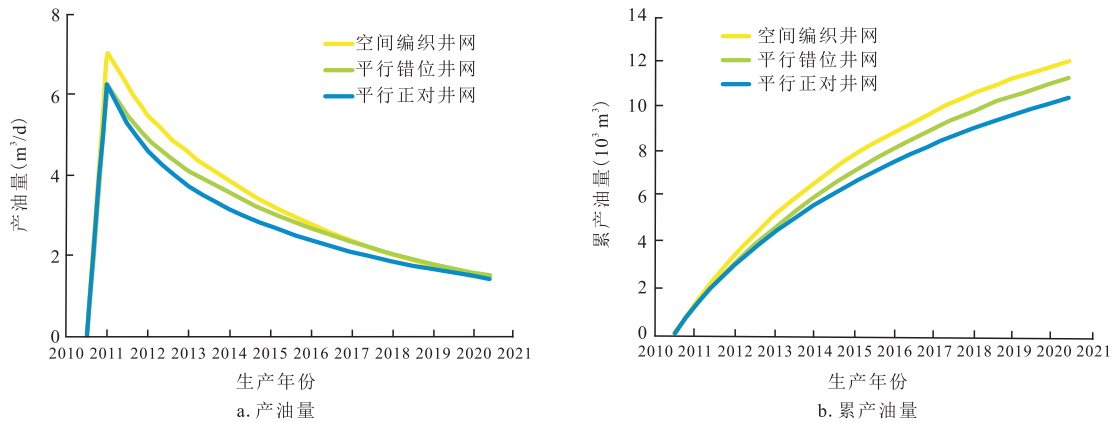


图4 3种井网未压裂条件下产油量、累产油量的对比

Fig. 4 Compare of oil production of three well patterns without fracturing

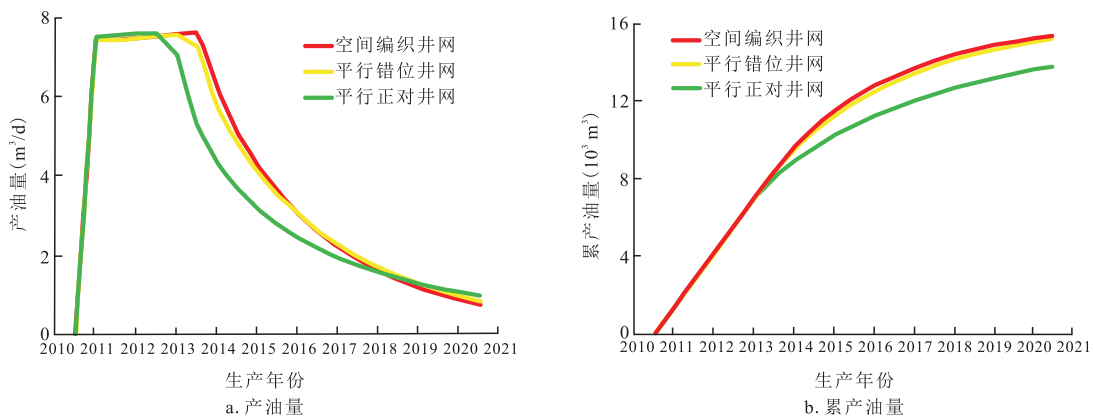


图5 3种井网压裂条件下产油量、累产油量的对比

Fig. 5 Compare of oil production of three well patterns with fracturing

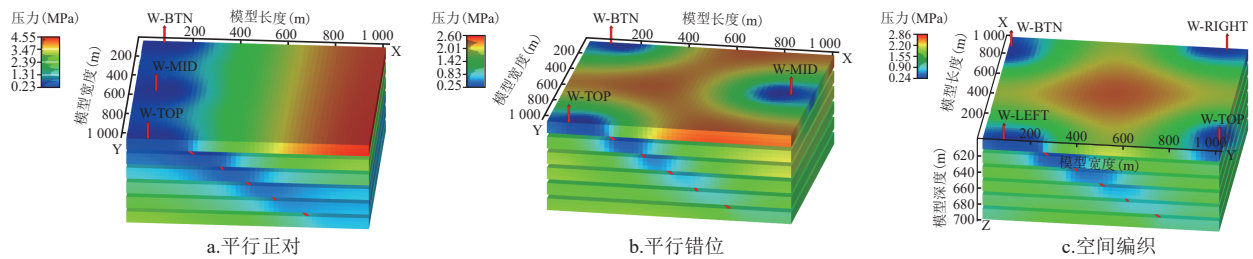


图6 3种弓形井多级水平缝压裂的空间压降关系

Fig. 6 Pressure distribution of three types of spatial well pattern for bow-shape horizontal well

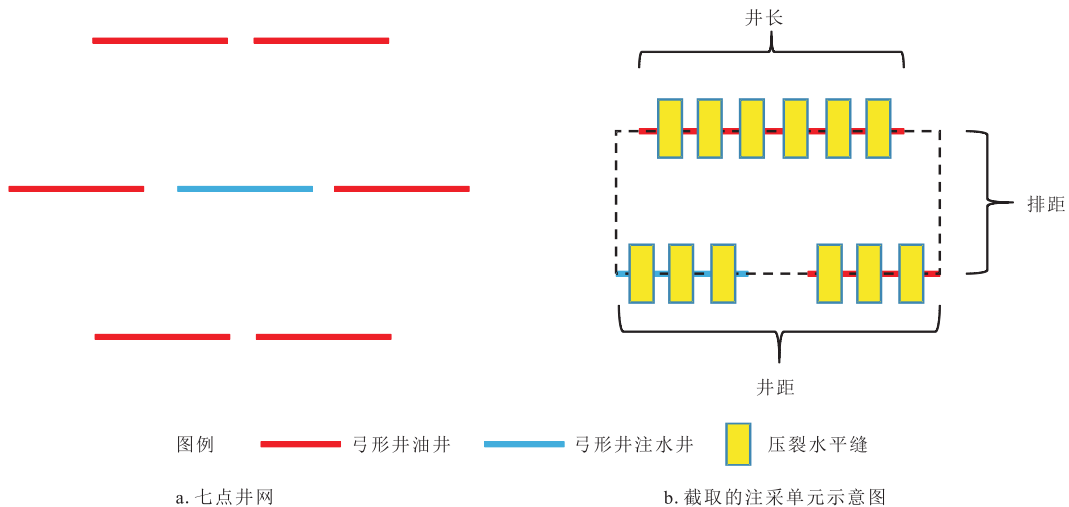


图7 弓形井的七点注水井网

Fig. 7 7-points water flooding well pattern of bow-shape horizontal well

制。进一步对比考虑多级水平缝和不考虑多级水平压裂的井网的数值模拟成果,可以认为随着水平压裂缝的尺寸增加,将减弱平行交错井网与编织状正交弓型井网的差别。

### 3.2 注水井网—七点注水井网

采取衰竭开发方式时因地层能量不足,需要注入流体进行补充和驱替。注水井网类型及注采单元见图7。生产井同期注水生产,注入井压裂缝渗流区域流体主要为拟径向流动,向生产井的驱替前缘较平整,原油通过生产井被采出。生产10 a后,区域边缘压力明显恢复上升,向右的驱替前缘近似圆弧状,使得生产后期见水后可能出现死油区。

根据模型,定注水量  $8 \text{ m}^3/\text{d}$ ,但在模拟开发中发现最高注入能力  $3.2 \text{ m}^3/\text{d}$ ,由图8可以看出弓形井的注水受效效果并不明显。模拟研究表明,井距和排距一定条件下,随着弓形段长由  $600 \text{ m}$  逐渐增至  $1400 \text{ m}$ ,井组单元控制面积增大,虽日产量增加,

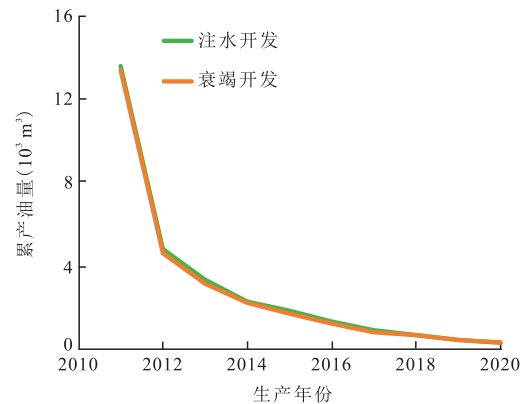


图8 注水开发与衰竭开发生产曲线对比

Fig. 8 Contrast pattern of water injection development and depletion development

但采油速度变缓,注水受效效果慢。

### 3.3 注水参数优化

在弓形段长和排距一定条件下,采出程度随井距的增加而降低,这是由于井距虽然增大,井组单元

控制面积增大,但井压裂缝参数不变,采出程度降低。减小排距,前期可以缩减注水见效时间,后期见水后可能导致快速水淹。因此,需要寻找段长、排距、井距的最优值。

根据图9,曲线导数转折点即为最优值(图10),模型中最佳弓形段长为1 000 m,井距为1 200 m,排距为200 m,半缝长为80 m,半缝宽为70 m。这为采取措施提高压裂工艺和注水能力从而提高采收率提供了依据。

注水时水平压裂缝的缝长和缝宽具有双面性。

增加压裂缝的长度和宽度,可以增强注入井注水能力和生产井产油能力。但压裂缝的缝长、缝宽会增加见水风险。根据图11,考虑到经济效益,缝长80 m,缝宽70 m为该模型参数的最优值。

该次研究针对一种新型井网进行了初步探索。根据模拟得出采用七点井网注水补充了地层能量,大幅提高了采收率,采出程度由衰竭开发的1%左右提高至9%左右;改变了渗流状态,使得区域边缘和井间剩余油得以有效驱替;注水开发时,井距、排距和弓形段长、压裂缝缝长、缝宽存在最优值。

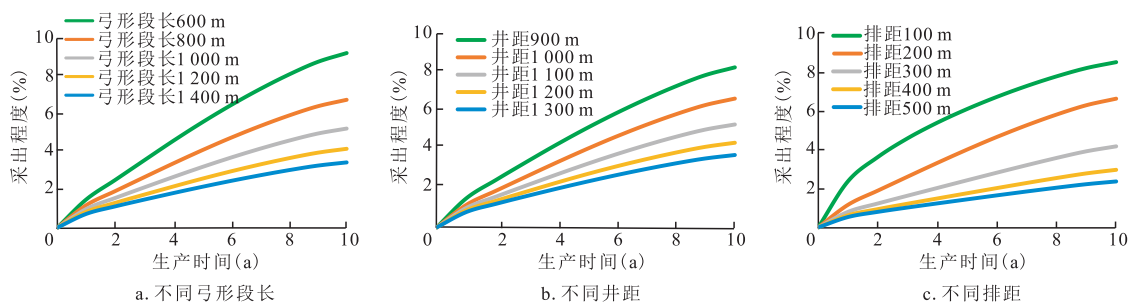


图9 弓形井的七点注水井网优化结果

Fig. 9 Optimization results of 7-points water flooding well pattern of bow-shape horizontal well

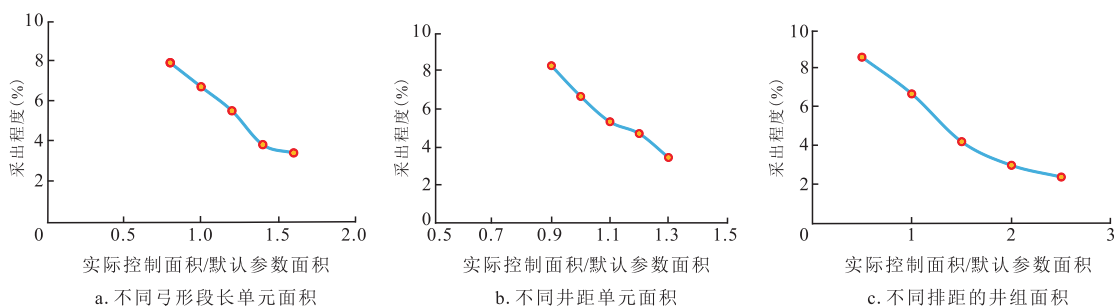


图10 弓形井的七点注水井网优化后采出程度

Fig. 10 Optimized recovery curve of 7-points water flooding well pattern of bow-shape horizontal well

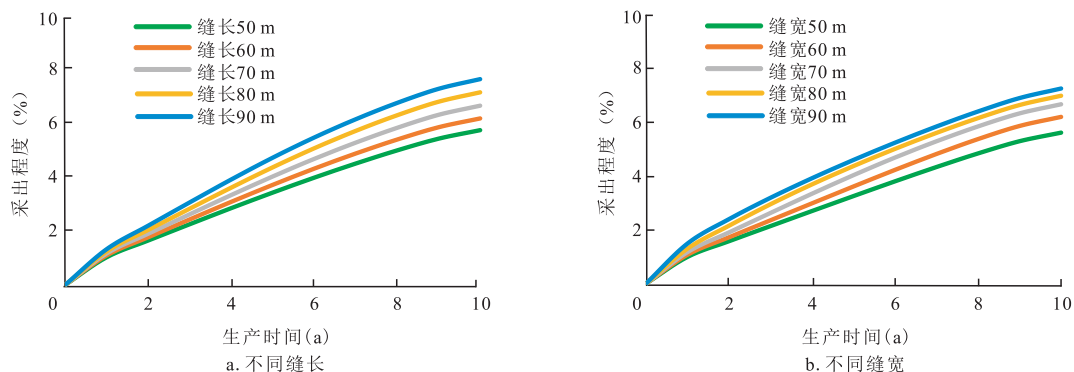


图11 七点注水裂缝形态优化结果

Fig. 11 Optimization results of 7-points water flooding well pattern of fracture shape

## 4 结论与建议

1) 常规井网下的多层水平缝+大位移弓型水平井的开采方式,虽能连通多个薄层,实现合采,但是衰竭开采方式下提高采收率有限。

2) 有别于常规井网,研究探索了多层水平缝+弓形井的适用井网类型,首创编织状三维立体井网。在相同的井数和钻井进尺条件下,该井网的油产量、累产油量、油藏采出程度高于正对井排和交错井排;不过随着水平压裂缝规模扩大,与交错井排的差距减小。

3) 探索多水平缝弓型水平井开发适用井网机理模型,建立七点注水井网。根据模拟得出采用七点井网注水补充了地层能量,也改变了渗流状态,使得区域边缘和井间剩余油得以有效驱替,采收率明显提高。

### 参考文献

- [1] 计秉玉,王友启,张莉.基于地质储量结构变化的采收率演变趋势[J].石油与天然气地质,2020,41(6):1257-1262.  
JI Bingyu, WANG Youqi, ZHANG Li. Research on overall recovery rate variations of dynamically changing OOIP[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1257-1262.
- [2] 王香增,党海龙,高涛.延长油田特低渗油藏适度温和注水方法与应用[J].石油勘探与开发,2018,45(6):1026-1034.  
WANG Xiangzeng, DANG Hailong, GAO Tao. Method of moderate water injection and its application in ultra-low permeability oil reservoirs of Yanchang Oilfield, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(6): 1026-1034.
- [3] 赵继勇,安小平,王晶,等.超低渗油藏井网适应性定量评价方法——以鄂尔多斯盆地三叠系长6、长8油藏为例[J].石油勘探与开发,2018,45(3):482-488.  
ZHAO Jiyong, AN Xiaoping, WANG Jing, et al. A quantitative evaluation for well pattern adaptability in ultra-low permeability oil reservoirs: A case study of Triassic Chang 6 and Chang 8 reservoirs in Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 482-488.
- [4] 罗晓容,王忠楠,雷裕红,等.特超低渗砂岩油藏储层非均质性特征与成藏模式——以鄂尔多斯盆地西部延长组下组合为例[J].石油学报,2016,37(S1):87-98.  
LUO Xiaorong, WANG Zhongnan, LEI Yuhong, et al. Heterogeneity characteristics and accumulation model of ultra-low permeability sandstone reservoirs: case study of the lower part of Yanchang Formation in the western Ordos Basin, China [J]. Acta Petroli Sinica, 2016, 37(S1): 87-98.
- [5] 党海龙,姜汉桥,王小锋,等.延长组长6低渗油藏高温高压条件下裂缝对渗吸效率的影响[J].石油与天然气化工,2020,49(2):87-92.  
DANG Hailong, JIANG Hanqiao, WANG Xiaofeng, et al. Influence of crack on imbibition efficiency of low permeability reservoir in Yanchang Chang 6 formation under high temperature and high pressure condition[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2020, 49(2): 87-92.
- [6] 赵继勇,樊建明,何永宏,等.超低渗—致密油藏水平井开发注采参数优化实践——以鄂尔多斯盆地长庆油田为例[J].石油勘探与开发,2015,42(1):68-75.  
ZHAO Jiyong, FAN Jianming, HE Yonghong, et al. Optimization of horizontal well injection-production parameters for ultra-low permeable-tight oil production: A case from Changqing Oilfield, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 68-75.
- [7] 时丕同,郝世彦,赵习森,等.延长油田水平井开发技术及应用[C]//西安石油大学,陕西省石油学会. IFEDC 油气田勘探与开发国际会议论文集.西安:中国学术期刊(光盘版)电子杂志有限公司,2018.  
SHI Pitong, HAO Shiyan, ZHAO Xisen, et al. Development technology and application of horizontal well in Yanchang Oilfield[C]// Xi'an Petroleum University, Shanxi Petroleum Society. Proceedings of International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development (IFEDC). Xi'an: China Academic Journals (CD-ROM) Electronic Magazine Co. Ltd, 2018.
- [8] 贾自力,石彬,周红燕,等.超低渗透水平裂缝油藏水平井井眼轨迹优化技术[J].特种油气藏,2017,24(3):150-154.  
JIA Zili, SHI Bin, ZHOU Hongyan, et al. Well path optimization technique for horizontal wells in reservoirs with ultra-low permeability and horizontal fractures[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(3): 150-154.
- [9] 朱维耀,刘青,岳明,等.考虑支撑剂裂缝导流能力计算及缝内支撑剂运移模拟[J].石油与天然气化工,2019,48(2):75-78.  
ZHU Weiyao, LIU Qing, YUE Ming, et al. Calculation of fracture conductivity considering proppant influence and simulation of proppant transport in fracture[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2019, 48(2): 75-78.
- [10] 熊颖,刘友权,梅志宏,等.四川页岩气开发用耐高矿化度滑溜水技术研究[J].石油与天然气化工,2019,48(3):62-65.  
XIONG Ying, LIU Youquan, MEI Zhihong, et al. Slick water technology of high salinity resistance for shale gas development in Sichuan[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2019, 48(3): 62-65.
- [11] 姚同玉,王明,朱维耀,等.低渗油层压裂水平井两相流研究[J].力学与实践,2011,33(1):66-69.  
YAO Tongyu, WANG Ming, ZHU Weiyao, et al. Analysis of two-phase percolation of fractured horizontal wells in low permeability Oil Reservoirs[J]. Mechanics and Practice, 2011, 33(1): 66-69.
- [12] ZHANG L F, ZHOU F J, ZHANG S C, et al. Evaluation of permeability damage caused by drilling and fracturing fluids in tight low permeability sandstone reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 175. doi:10.1016/j.petrol.2019.01.031
- [13] LUO X R, QI Y, LI J S, et al. Convection heat transfer and

- friction characteristics of liquid CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> foam fracturing fluid using C<sub>4</sub>F<sub>9</sub>OCH<sub>3</sub> as frother[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 183. doi:10.1016/j.petrol.2019.106461
- [14] 陈阳,韩大伟,卢祥国,等.缝网压裂裂缝形态对低渗油藏渗吸采油效果影响实验[J]. *大庆石油地质与开发*, 2017, 36(4): 123-127.  
CHEN Yang, HAN Dawei, LU Xiangguo, et al. Influence experiment of the fracture morphology of the network fracturing on the effects of the imbibition recovery for low permeability Oil Reservoir[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2017, 36(4):123-127.
- [15] 崔传智,李荣涛,李志涛,等.特低渗油藏分段压裂水平井经济技术界限研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(5): 41-46.  
CUI Chuazhi, LI Rongtao, LI Zhitao, et al. The study on economic and technical boundary values of multi-stage fractured horizontal well in ultra-low permeability reservoirs[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(5): 41-46.
- [16] ZHANG C L, WANG P, SONG G L, et al. Research on property of multicomponent thickening water fracturing fluid and application in low permeability oil reservoirs[J]. *Journal of Chemistry*, 2018, 2018(5): 1-10. doi:10.1155/2018/1231490
- [17] AI K, DUAN L C, GAO H, et al. Hydraulic fracturing treatment optimization for low permeability reservoirs based on unified fracture design[J]. *Energies*, 2018, 11 (7). doi: 10.3390/en11071720
- [18] GUO T K, GONG F C, LIN X, et al. Experimental investigation on damage mechanism of guar gum fracturing fluid to low-permeability reservoir based on nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2018, 140 (7). doi: 10.1115/1.4039324
- [19] 王言,郑强,马崇尧,等. tNavigator 油藏数模软件在低渗油藏压裂优化中的应用[J]. *新疆石油天然气*, 2016, 12(3): 29-31.  
WANG Yan, ZHENG Qiang, MA Chongyao, et al. Tnavigator reservoir numerical simulation Software application in the low permeability Reservoir Fracturing Optimization[J]. *Xinjiang Petroleum Gas*, 2016, 12(3): 29-31.
- [20] 王磊. HZ 油田特低渗油藏压裂后有效开发研究与应用[J]. *天然气与石油*, 2016, 34(4): 50-54.  
WANG Lei. Research and application of effective development for extra-low permeability reservoir in HZ Oil Field after fracture[J]. *Natural Gas and Oil*, 2016, 34(4): 50-54.
- [21] 刘兴国,董海海,张娟. 厚层块状特低渗砾岩油藏水平井压裂参数优化[J]. *当代化工研究*, 2016(7): 104-105.  
LIU Xingguo, DONG Haihai, ZHANG Juan. Parameter optimization of horizontal well fracturing in the thick layer ultra-low permeability conglomerate reservoir[J]. *Mordern Chemical Research*, 2016(7): 104-105.
- [22] 张丁涌,袁士宝,田相雷,等.低渗油藏径向水力射流压裂裂缝延伸规律[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(2): 129-134.  
ZHANG Dingyong, YUAN Shibao, TIAN Xianglei, et al. Research on fracturing extension by radial hydraulic jet in low permeability reservoirs[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2016, 40(2): 129-134.
- [23] 王鹏,赵益忠,崔明月,等.压裂防砂技术在胜利油田低渗敏感稠油油藏的应用[J]. *断块油气田*, 2016, 23(2): 269-272.  
WANG Peng, ZHAO Yizhong, CUI Mingyue, et al. Application of fracturing sand control technology in low permeability sensitive heavy oil reservoir of Shengli Oilfield[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2016, 23(2): 269-272.
- [24] 韩松. YZM 特低渗油藏压裂水平缝注水吞吐机理及应用研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2019.  
HAN Song. Study on the mechanism and application of water injection in horizontal fractures in YZM ultra-low permeability reservoirs[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2019.
- [25] 李莉. 低渗油藏压裂水平缝注水开发研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.  
LI Li. The water flooding of production well with horizontal hydraulic fractures in low permeability reservoirs[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [26] 高涛. 特低渗砂岩油藏水平缝应力敏感实验研究及产能计算[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.  
GAO Tao. Experimental study and productivity calculation of horizontal fracture stress sensitivity in ultra-low permeability sandstone reservoir[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [27] 聂翠平,李相方,高超利,等. 水力喷射压裂技术在浅层水平缝压裂中的应用研究[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 27(3): 41-45.  
NIE Cuiping, LI Xiangfang, GAO Chaoli, et al. Application study of hydraulic jet fracturing to the fracturing of horizontal fracture in shallow reservoir[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2012, 27(3): 41-45.
- [28] 杜贵超,胡双全,石立华,等. 七里村油田长6油层组储层特征及孔隙演化[J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(1): 51-57.  
DU Guichao, HU Shuangquan, SHI Lihua, et al. Reservoir characteristics and pore evolution of Chang 6 oil reservoir set in Qilicun Oilfield[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2015, 27(1): 51-57.
- [29] 严侠,黄朝琴,姚军,等. 基于模拟有限差分的嵌入式离散裂缝数学模型[J]. *中国科学(技术科学)*, 2014, 44(12): 1333-1342.  
YAN Xia, HUANG ZhaoQin, YAO Jun, et al. An embedded discrete crack mathematical model based on simulated finite difference method[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2014, 44(12): 1333-1342.

(编辑 李青)