

大庆长垣特高含水期表外储层独立开发方法

高大鹏^{1,2}, 叶继根², 李奇¹, 石成方², 胡云鹏², 侯绍继¹, 纪淑红², 黄磊²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 物性和含油性差的表外储层已经成为大庆长垣特高含水阶段水驱挖潜的主要对象, 然而常规的井网加密、分层注水等方法开发效果较差。为此, 结合表外储层发育特征和分层压裂工艺, 提出了表外储层独立开发方法。根据油水井射孔层位和表内、表外储层空间分布特征, 设计了“以水定油”和“以油定水”两种独立开发模式, 采用多层人造浇筑岩心开展了水驱物理模拟实验, 比较了两种模式的采出程度随注入量的变化特征, 推导了考虑启动压力梯度和浅层水平压裂裂缝的分层压裂直井产能公式, 计算分析了表外储层独立开发的技术政策界限。研究表明: 长垣表外储层独立开发“以油定水”模式优于“以水定油”模式, 技术极限井距和经济极限厚度分别为 228 m 和 2 m 左右。随着表外储层厚度占总射孔厚度比例的增大, 采收率先下降后保持平稳, 最后又快速上升。矿场应用表明: 表外储层独立开发平均单井日产量 3.7 t, 开发效果明显优于三次加密。

关键词: 水驱纵向波及效率; 水平裂缝; 分层压裂; 特高含水; 表外储层; 水驱挖潜; 大庆长垣构造

中图分类号: TE348 **文献标识码:** A

An independent development method of low permeability oil thin layers with extreme high water cut in Changyuan Structure, Daqing oilfield

Gao Dapeng^{1,2}, Ye Jigen², Li Qi¹, Shi Chengfang², Hu Yunpeng², Hou Shaoji¹, Ji Shuhong², Huang Lei²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Low permeability thin oil layers have become the main object for waterflooding production in extreme high water cut stage in Changyuan area, Daqing oil field. However, conventional methods, such as well pattern infilling and layer-specific water injection, could get no satisfying effect. Therefore, a method of independent development of low permeability thin oil layers is put forward by taking into account features of these low permeability thin oil layers and technologies of layered hydraulic fracturing. Two kinds of development models are suggested, and one of the models designs how water wells perforate reservoir zones depending on the number and pattern of oil wells that perforate low permeability thin oil layers only, the other one designs how oil wells perforate zones depending upon the number and patterns of water wells that perforate low permeability thin oil layers only. Then, the recovery of these two modes are compared by waterflooding physical simulation experiments with multi-layer artificial casting cores. The productivity model of layered fractured vertical well is deduced considering the threshold pressure gradient and horizontal fractures in shallow reservoirs, and the technology limits are calculated and analyzed for the independent development of low permeability thin oil layers. The results show that the first model will get more recovery than the second one, and the technical limit of spacing is about 228 m, the economic limit of thickness is 2 m. With the increasing of low permeability thin oil layers thickness to total perforated thickness ratio, recovery declines firstly and then remained stable, and rises rapidly finally. Field application shows that the average well production is 3.7 tons/day under the independent development of low permeability thin oil layers, its development effect is better than tertiary well pattern infilling.

Key words: waterflooding vertical sweep efficiency, horizontal fracture, separate-layer hydraulic fracture, extreme high water cut, low permeability thin layer, waterflooding production, Changyuan Structure in Daqing oilfield

收稿日期: 2015-10-12; 修订日期: 2016-07-17。

第一作者简介: 高大鹏(1989—) 男, 助理研究员, 油藏工程和数值模拟。E-mail: gaodapeng@imech.ac.cn。

通讯作者简介: 叶继根(1963—) 男, 高级工程师, 油气田开发工程。E-mail: yjg@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05010-002)。

表外储层是指大庆长垣多层油藏中含油产状以油浸和油斑为主,并混有少量厚度小于 0.2m 的油砂、含油和粉砂油浸的储层;表内储层则是与之相对的主力含油砂体^[1]。大庆长垣喇嘛甸、萨尔图和杏树岗油田(简称“喇萨杏油田”)进入特高含水阶段以后,以表外储层为主的薄差层已经成为水驱挖潜的主要对象^[2],并且由于注入水低效且无效循环的加剧^[3-4],表外储层剩余油潜力越发凸显。表外储层独立开发则是将有潜力的独立表外储层细分组合作为一套层系部署井网的开采方法,旨在转变常规“表内、表外合采”的开发思路,针对特高含水期现有井网条件下未动用的特低渗表外储层,采取了比“细分层系、分层注水”更加强化的措施来解决层间矛盾。

国内外关于改善多层油藏中薄差层水驱开发效果的方法主要包括分层注水^[5]、井网加密^[6]、调剖堵水^[7]和三次采油^[8-11]等。长期以来,大庆油田的分层注水技术应用十分广泛,然而由于封隔器体积和措施工艺的限制,注水井筒的分段数已经接近极限,监测的平均油层动用程度仍小于 50%,对于厚度薄、物性差的表外储层很难发挥作用^[12-13]。大庆油田三次井网加密的重点是表外储层,但开发效果较差。如杏树岗油田特高含水期 2010 年部署的三次加密井投产初期平均日产油量小于 1.5t、平均含水率大于 85%。此外,由于受到堵剂使用数量和作用机理的双重限制,针对特高含水期多层厚油藏的深部调剖技术还不够成熟^[7]。聚合物驱和复合驱等三次采油技术在大庆油田应用广泛也取得了很好的效果,但主要是提高了主力油层的水驱波及效率,对于特低孔、特低渗和连通性差的表外储层缺乏适用性。为此,本文提出将与优质表内储层交互分布的低品位表外储层进行独立开发的方法,开展了表外独立开发模式、技术界限研究和矿场应用试验,该方法具有广阔的应用前景。

1 表外储层基本特征及其独立开发的必要性

通过分析表外储层的地质发育特征和动用状况,判断表外储层是否满足独立开发的条件,同时现阶段是否有必要采取独立开发的方法。

1.1 表外储层发育特征

大庆长垣表外储层与表内储层属同一河流三角洲沉积体系,是表内储层的延续。表外储层以三角洲外前缘亚相为主,平面上不独立,与表内层镶边搭桥、相

间分布,主要存在 4 种表外储层与表内储层的接触方式:成层型、连接型、延伸型和透镜型。其中,成层型的独立表外砂体平面展布规模大,延伸大于 600 m,连接型和延伸型表外砂体规模次之,透镜型表外规模最小。初步估算表外储层地质储量达到 7.2×10^8 t,可采储量为 $(1.4 \sim 1.8) \times 10^8$ t。

1.2 表外储层动用及水洗特征

基础井、一次加密井、二次加密井和三次加密井 4 套井网均射孔了表外储层,并且射孔比例逐渐增加,其中三次加密井纵向平均射孔动用比例达到 55% 以上。根据大庆长垣喇萨杏油田取心井监测资料分析不同类型表外储层的动用状况,总体上连接型和延伸型表外储层动用较好,动用层数比例为 65.4%;成层型和透镜型表外储层动用程度相对较差,动用层数比例仅为 11.8%,又由于透镜型表外储层砂体规模太小,因此成层型表外储层是独立开发的重点。

图 1 是根据取心井监测资料统计的三类油层和表外储层的钻遇厚度和未水洗厚度,可见以水下分流河道、主体席状砂和非主体席状砂为主的 3 类油层未水洗厚度相对较小。未水洗厚度主要集中在一类和二类表外储层,分别达到 3.9 m 和 10.4 m,共占总钻遇厚度的 35.7%,占总未洗厚度的 88.3%。一类表外储层是指大庆油田 1985 年储量复算时,不够表内储层有效厚度标准,但达到含油砂岩标准的储层,以与表内交互分布的表外储层为主;二类表外储层是指 1985 年储量复算时,未划分含油砂岩厚度但已达到 1993 年研制的表外储层厚度解释标准的表外储层,以独立成层型表外储层为主。因此,表外储层具有较大的剩余油潜力,并且以二类表外的层间剩余油为主。

1.3 表外储层独立开发的必要性

从表外储层的动用及水洗状况分析发现主要存在

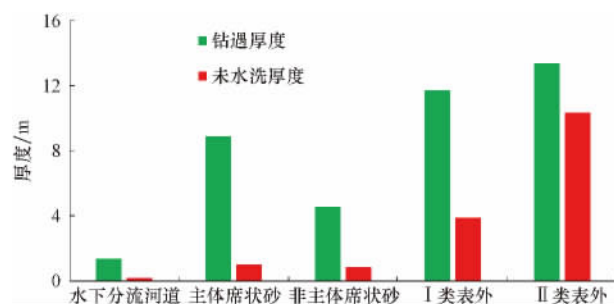


图 1 喇萨杏油田三类油层及表外剩余油评价潜力
Fig. 1 Remaining potential of class III and low permeability thin oil layers in Lasaxing oilfield

两个问题:一是特高含水阶段三次加密井网虽然射开表外储层,但绝大部分注入水沿主力表内储层低效或者无效循环,水驱过程中表外储层并未得到有效动用;二是表外储层本身物性和含油性差,生产能力非常有限,需要人工压裂获得经济产能。

进入特高含水阶段以后,长垣喇萨杏油田三次加密新井的初期日产油量已低于 2 t,并呈现出产量递减加快的趋势。以往针对表内储层行之有效的成熟技术无法解决表外储层的动用问题,单纯采用井网加密、分层注水等措施的效果变差,特别是细分注水的作用愈发有限。从 2010 年到 2015 年,随着细分注水工作量的不断加大,单井分段数普遍达到 6 段及以上,甚至 10 段,但平均油层动用程度小于 50%,平均吸水非均衡程度大于 40%^[13]。此外,特低渗成层型表外储层单独试油效果不差,具有一定的吸水和产油能力^[14]。根据三次加密井生产状况和大庆日趋成熟的分层压裂工艺^[15-16],表外储层组合达到一定厚度压裂后具有单独开采的能力,因此有必要开展表外储层独立开发。

表外储层埋深浅,平均破裂压力梯度为 0.023 ~ 0.025 MPa/m,大于上覆岩层产生的垂直应力梯度,根据钻井取心观察、同位素示踪法实验、微地震监测结果以及井温测井曲线,综合判定表外储层压裂缝将主要是水平裂缝^[17-18],并且大庆油田已经研究应用了一套产生水平裂缝的分层压裂工艺技术^[15],有助于长垣表外储层获得经济产能。

2 表外储层独立开发的主要模式

根据表内、表外储层交互分布的特点,以油水井钻遇的成层型独立表外储层为对象,提出了以井对为单元的“以油定水”和“以水定油”两种模式,并开展了水驱物理模拟实验研究,评价两种模式对采收率的影响。

2.1 “以油定水”模式

“以油定水”是指油井只选择独立成层型表外储层比较集中的潜力层段射孔,并且根据这些表外储层的发育延展特征,确定相邻水井的射孔层段,此时水井的射孔层段中一般含有少量表内储层(图 2a)。这种模式下,油井针对表外储层采取分层压裂后,仅采出外表层的储量,并且由于水井射开了部分表内储层,其吸水效果较好,同时受砂体连通性和注采对应关系的影响,油井钻遇并压裂的表外储层内产出比较均衡。

2.2 “以水定油”模式

“以水定油”是指水井只选择独立成层型表外储

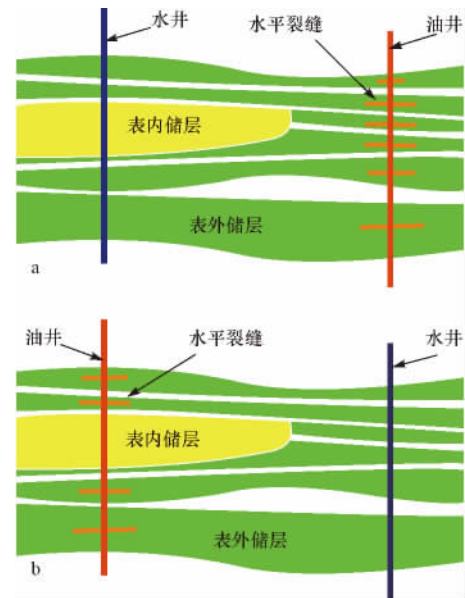


图 2 独立开发模式示意图

Fig. 2 Schematic map showing independent development models
a. “以水定油”模式; b. “以油定水”模式

层比较集中的潜力层段射孔,并且根据这些表外储层的发育延展特征,确定相邻油井的射孔层段,此时油井的射孔层段中一般含有少量表内储层(图 2b)。这种模式下,油井同时采出表内层和外表层的储量,但是由于表内层物性好、水洗程度高,有相当一部分注入水将从表外层进入表内层,因而一方面影响了表外层的驱替效果,另一方面供油能力差的特高含水表内层将导致部分注入水低效或无效循环。可见虽然“以水定油”模式下的油井射开了表内储层,但开发效果会比“以油定水”差一些。

两种模式的不同主要在于油、水井是否射开表内储层,现场应用时需要根据表外、表内储层空间分布特征部署井网,为了科学的选择合理的独立开发模式,设计了相关物理模拟评价两者的开发效果。

2.3 开发效果对比实验

为了评价“以油定水”和“以水定油”两种表外储层独立开发模式的效果,开展了岩心尺度的物理模拟实验。

2.3.1 物理模型及实验设计

采用长 30 cm、宽 4.5 cm、高 6 cm 的多层人造浇筑长方体岩心作为物理模型(图 3),人造岩心包括 4 个部分:模拟表外储层的低渗砂岩(渗透率为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}$)、模拟表内储层的高渗砂岩(渗透率为 $260 \times 10^{-3} \mu\text{m}$)、模拟人工压裂裂缝的超高渗砂岩条带(渗透率为 $5\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}$)和模拟隔夹层的泥岩条带

(渗透率 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}$)。饱和岩心所用的模拟地层水的矿化度为 6 778 mg/L,模拟油为大庆油田第四采油厂原油与煤油混合配置、45 °C 时粘度约为 7 mPa · s,驱替所用的模拟大庆地层污水的矿化度为 3 700 mg/L。基于前人对特低渗砂岩油藏水驱油物理模拟相似准则的研究与归纳,物理模型的设计应满足几何相似、运动相似和动力相似^[19-21],同时还应该满足非线性渗流特征相似^[22],油藏原型与设计的物理模型参数对比及相似系数如表 1 所示。

2.3.2 实验结果分析

图 4 是“以油定水”和“以水定油”两个模型水驱采出程度的实验对比结果,可见前者最终采出程度为 64.92%,优于后者的 54.02%,也就是说,“以油定水”模式下表外储层独立开发的采收率明显大于“以水定油”模式。这是因为当从含有高渗砂岩的一侧注入、从

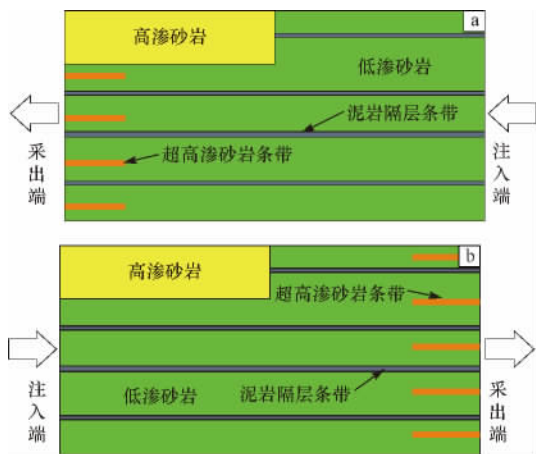


图 3 “以水定油”和“以油定水”模式岩心模型示意图
Fig. 3 Schematic map showing core model of two independent development models
a. “以水定油”模型; b. “以油定水”模型

表 1 油藏原型与物理模型参数对比及相似系数

Table 1 Comparison of parameters and correlation coefficient between reservoirs and physical models

相似性	对比参数	相似系数
几何相似	井距与射孔厚度比	1
	井距与水平裂缝半长比	1
	井对间表外表内砂岩长度比	1
动力相似	雷诺数	1
	压力与重力比	1.04 ~ 1.20
	裂缝立方定律	0.71 ~ 1.05
运动相似	注入量与采油量比	1
特征相似	启动压力梯度	1

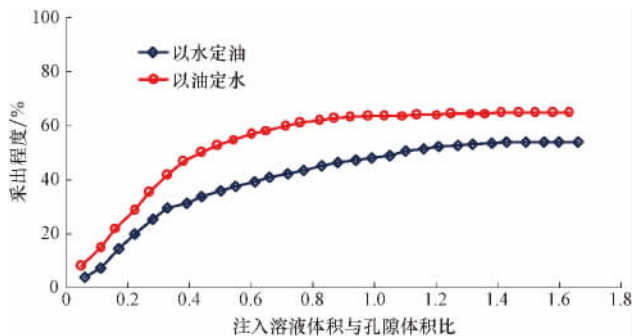


图 4 “以水定油”和“以油定水”模型采出程度对比
Fig. 4 Comparison of the recovery of two core models

带有多条超高渗条带的低渗砂岩一侧采出时,采出端纵向波及效率高、动用更加均衡,所以最终采出程度较大。相比之下,“以水定油”模式下采出端依然存在严重的层间矛盾。

3 表外储层独立开发产能模型和技术界限

3.1 分层压裂直井产能快速评价模型

通过分析长垣喇萨杏油田微地震监测资料发现,由于油层内地应力的平面非均质性,人工压裂后将形成椭圆形的水平裂缝。目前计算面积井网产能主要通过数值模拟方法^[23-24],解析方法则适用于单井产能计算^[25-26]。现有的商业数值模拟软件还未能全面考虑水平压裂缝和非线性渗流特征,因此需要建立新的产能评价模型。

3.1.1 假设条件及模型建立

由于表外储层单层厚度很薄,并且各表外储层之间隔夹层分布稳定,特低渗多孔介质中非线性渗流特征明显,因此忽略单个表外储层内的纵向流动以及各油层之间的干扰和窜流,忽略油水两相流体之间的界面效应,简化非活塞驱替过程为等饱和度下降过程,采用启动压力梯度简化非线性渗流特征^[27-28],提出了考虑油水两相、启动压力梯度和水平裂缝的表外储层产能快速计算模型。

采用等效渗透率模型将水平裂缝等效为高度为储层厚度的椭圆柱体,将单层内压开水平裂缝后引发的渗流场划分为两部分:外部远端地层到水平裂缝的径向流动区域和水平裂缝内等效后的椭圆流动区域。结合刘月田等给出的各向异性圆形地层渗流的解析解^[29-30],推导得单井椭圆水平裂缝诱发的渗流场内径向流动区域和椭圆流动区域的压力方程,

基于储层内的物质平衡关系和多井压降叠加原理推导得表外储层压开水平裂缝后的五点井网的产能计算公式:

$$p_R = p_f + C_{SI} \frac{\mu_o B_o Q_{Po}}{2\pi K K_{ro} h} \ln \frac{a+b}{a_f + b_f} \quad (1)$$

$$p_E = p_f + C_{SI} \frac{\mu_o B_o Q_{Po}}{2\pi K_f^* \bar{K}_{ro} w_f} \ln \left(\tan \frac{\pi b_f}{4d^*} \right) - C_{SI} \frac{\mu_o B_o Q_{Po}}{2\pi K_f^* \bar{K}_{ro} w_f} \ln \left(\frac{ch \frac{\pi x}{2d^*} - \cos \frac{\pi y}{2d^*}}{ch \frac{\pi x}{2d^*} + \cos \frac{\pi y}{2d^*}} \right) \quad (2)$$

那么,五点井网内水驱过程的渗流阻力可划分为两部分:

① 外部径向流动区域的渗流阻力可表示为:

$$A = C_{SI} \frac{\mu_o B_o Q_{Po}}{2\pi K K_{ro} h} \ln \frac{a+b}{a_f + b_f} \quad (3)$$

$$B = C_{SI} \alpha \left(1 + \frac{\bar{K}_{rw} \mu_o B_o}{K_{ro} \mu_w B_w} \right) \frac{\mu_w B_w}{2\pi K K_{rw} h} \times \ln \frac{(L - r_w)^4}{(\sqrt{2}L - r_w)^2 (2L - r_w) r_w} \quad (4)$$

② 水平裂缝等效后椭圆流动区域内的渗流阻力可表示为:

$$C = C_{SI} \frac{\mu_o B_o Q_{Po}}{2\pi K_f^* \bar{K}_{ro} w_f} \ln \left(\tan \frac{\pi b_f}{4d^*} \right) \quad (5)$$

$$D = C_{SI} \frac{\mu_o B_o Q_{Po}}{2\pi K_f^* \bar{K}_{ro} w_f} \ln \left(\frac{ch \frac{\pi x}{2d^*} - \cos \frac{\pi y}{2d^*}}{ch \frac{\pi x}{2d^*} + \cos \frac{\pi y}{2d^*}} \right) \quad (6)$$

五点井网内带有水平裂缝的直井产油量为:

$$Q_{Po}^{low} = \frac{p_1 - p_w - \beta \lambda \left(L - r_w - \frac{a_f + b_f}{2} \right)}{A - B + C + D} \quad (7)$$

由于表内储层无需考虑非线性渗流问题,因此其五点井网内的产油量可用下式计算:

$$Q_{po}^{high} = \frac{p_1 - p_w}{C_{SI} \frac{\mu_o B_o}{2\pi K K_{ro} h} \ln \left(\frac{L - r_w}{r_w} \right) + B} \quad (8)$$

将油井射开的多个表外、表内储层的产油量进行叠加,得到分层压裂直井的总产量:

$$Q_{Po}^{Total} = \sum_{i=1}^c Q_{Poi}^{low} + \sum_{j=1}^d Q_{Poj}^{high} \quad (9)$$

基于物质平衡关系计算不同时间的储层平均含油饱和度。那么,某一时间段内含油饱和度的变化等于这段时间内采出的油量占油藏孔隙体积的比值,然后

根据新计算的含油饱和度,结合相对渗透率曲线选取新的油、水相对渗透率,再计算下一时间段的产量及含水率等指标。

3.1.2 模型验证

根据大庆采油四厂杏六中区东部表外储层独立开发试验区内已投产的 X5-41-S737 井实测资料,对产能模型的计算结果进行验证。

从图 5 中可以看到,本文模型的计算结果与实测日产油量之间误差较小,递减趋势基本吻合,因此模型可靠性强,可用于指导表外储层独立开发技术界限制定和方案设计。

3.2 表外储层独立开发技术界限

根据长垣杏北油田萨葡油层、压裂裂缝和流体的基本参数,以及表内、表外储层的油水相对渗透率曲线,计算表外层独立开发时分层压裂直井的产能,分析五点井网内的技术极限井距、表外储层经济极限厚度以及采收率与不同表外层所占厚度比例的关系。

3.2.1 技术极限井距和经济极限厚度

从图 6a 中可以看到:压裂后极限技术井距达到 228 m。当表外储层厚度为 6 m、注采井距为 150 m、投产初期含水率小于 50% 时,产油量大于 2 t/d。从图 6b 中可以看到:初始产油量随表外储层厚度的增大而增大;当表外储层厚度增大到 10 m、投产初期含水率为 50% 时,初始产油量可以达到 3.5 t/d;而当表外储层厚度缩减至 2 m 时,初始产油量均低于 1.5 t/d,达不到喇萨杏油田新井经济界限。

3.2.2 采收率与不同表外储层所占厚度比例的关系

针对“以水定油”和“以油定水”模式,分析了表外储层厚度占总射孔厚度的比例与采收率的关系。从图 7

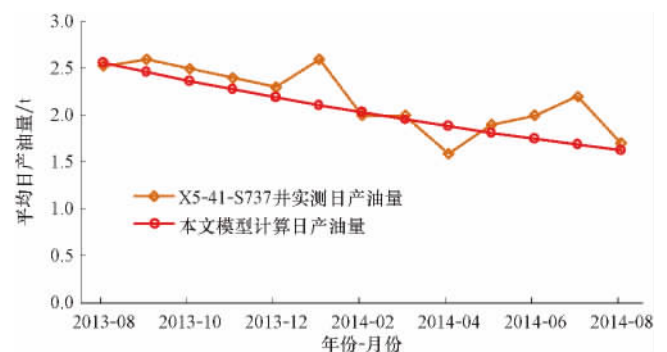


图 5 本文模型计算日产油量与实测数据对比
Fig. 5 Comparison between oil production calculated by the model and actual production data

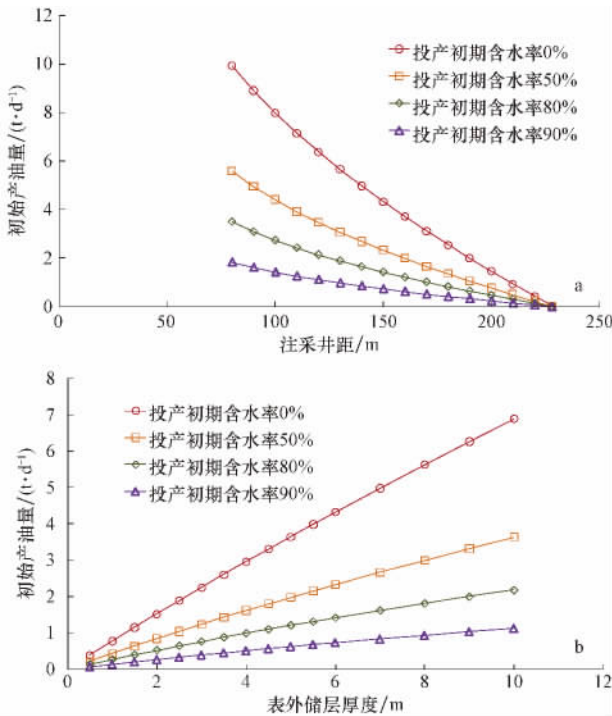


图 6 初始产油量与注采井距、表外储层厚度之间的关系
Fig. 6 Relation among initial oil production, well spacing, and thickness of low permeability thin oil layers

a. 初始产油量和注采井距关系; b. 初始产油量和表外储层厚度关系

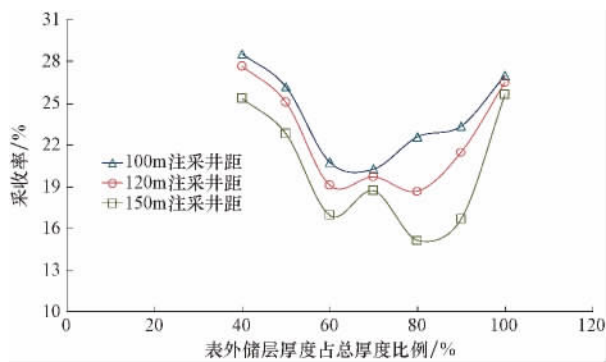


图 7 表外储层厚度占总射孔厚度的比例与采收率的关系
Fig. 7 Ratio of perforate thickness of low permeability thin oil layers vs. total perforate thickness and its relationship with recovery

中可以看到:随着表外储层厚度比例的增大,采收率先下降然后保持平稳,最后又快速上升。造成这种现象的原因是:表外储层受非线性渗流特征的影响,不仅产油量比表内储层低,含水率上升也相对缓慢。当表外储层厚度占比小于 60% 时,表内储层占主导地位,注入水主要沿表内储层迅速突进致使油井很快达到极限含水率 98%,而此时表外储层采出程度仍然较低,进而导致整体采收率较低。当表外储层厚度占比大于 90% 时,表外储层占主导地位,虽有部分注入水沿表内储层突进,但并未导致油井迅速达到极限含水率,因而生产时间延长、整体采收率也有所提高。

4 矿场实践分析

表外独立开发试验区位于大庆采油四厂杏六中区东部,面积为 0.78 km²,平均表外储层厚度为 24 m,表外储层地质储量为 155 × 10⁴ t,平均表内储层厚度为 25.5 m,原始表内储层地质储量为 382 × 10⁴ t,目前表内储层地质储量为 240 × 10⁴ t,于 2012 年底陆续投产开发井 23 口,其中采油井 14 口,注水井 9 口,以 150 m 井距的五点注采井网开采萨尔图和葡萄花油组的表外储层,具体设计参数如表 2 所示。

图 8a 和 8b 是独立开发试验区平均单井日产量、含水率与三次加密试验方案的对比曲线,投产初期仅有 4 口油井,生产效果较差。为进一步控制表外储层潜力富集区域,截至 2013 年 8 月又有 10 口油井陆续投产,此时平均单井日产量达到 1.5 t,从 2013 年 10 月开始部署注水井,约 3 月后开始见效,产量稳步抬升。与同期设计的三次加密试验方案(以三类油层中薄差油层为调整对象的杏六中区井网重组)进行对比,表外储层独立开发试验区平均单井日产量是三次加密井的 1.9 倍,平均含水率较三次加密井低 7.2%。

5 结论

1) 根据油水井射孔层位和表内、表外储层空间分布特征,设计了“以水定油”和“以油定水”两种模式,采用多层人造浇筑岩心进行水驱物理模拟实验。推导了考虑启动压力梯度和水平压裂裂缝的分层压裂直井产能快速评价模型,计算了表外储层独立开发技术界限。

2) 长垣喇萨杏油田具备表外独立开发规模化应

表 2 表外独立开发试验区方案设计参数

Table 2 Scheme parameters of independent development test area in low permeability thin oil layers

	设计参数	以水定油 以油定水	
		以水定油	以油定水
油井	井数/口	8	6
	平均射孔表外储层厚度/m	6.92	5.76
	平均射孔表内储层厚度/m	1.55	0.19
	表外储层厚度比例/%	81.7	96.8
	地层系数标准差/(10 ⁻³ μm ² ·m)	11.8	3.3
水井	井数/口	5	4
	平均射孔表外储层厚度/m	5.10	6.12
	平均射孔表内储层厚度/m	0.20	0.96
	表外储层厚度比例/%	96.1	84.3
	地层系数标准差/(10 ⁻³ μm ² ·m)	2.1	18.3

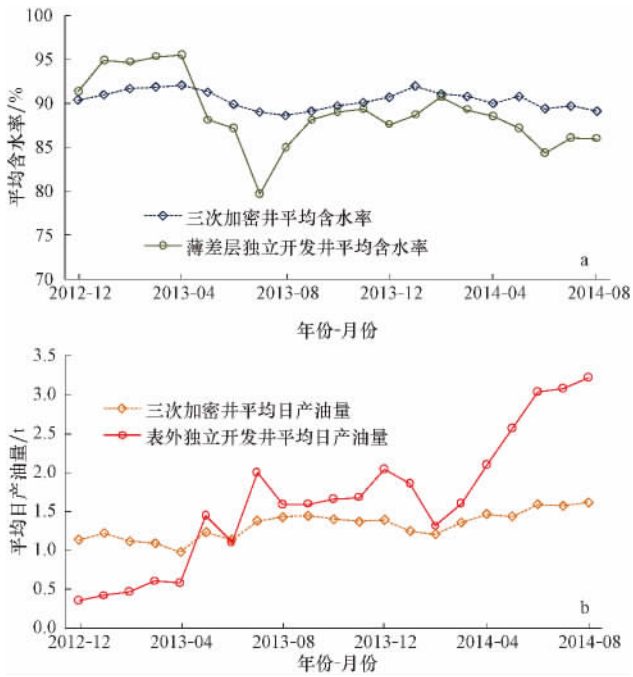


图 8 三次加密井与独立开发井平均含水率、平均日产量对比

Fig. 8 Comparison of average water content and oil production between tertiary infilling wells and independent development wells

- a. 三次加密井与独立开发井平均含水率对比;
- b. 三次加密井与独立开发井平均日产量对比

用的条件, 不仅可以将未进行三次加密的区块转入表外独立开发, 也可以将已进行三次加密的区块, 采取封堵表内射孔层段的措施, 独立开采表外储层。

3) 根据长垣不同表外储层类型及其剩余油潜力, 可采用不同开发方式推进表外试验与规模化应用。此外, 表外储层独立开发方法不仅适用于大庆油田, 对于其它特高含水多层砂岩油藏中的潜力薄差油层也具有普遍的借鉴意义。

符号注释

- p_R ——径向渗流区域内任意一点的压力, MPa;
- p_E ——椭圆渗流区域内任意一点的压力, MPa;
- p_f ——水平裂缝边界处的压力, MPa;
- p_i ——水井注入压力, MPa;
- p_w ——油井井底流压, MPa;
- C_{SI} ——SI 制单位换算系数, 无量纲;
- B_o, B_w ——原油、水体积系数, 无量纲;
- Q_{Po}, Q_{lw} ——水井日注入量和油井日产量, m^3 ;
- K ——储层渗透率, $10^{-3} \mu m^2$;
- $\bar{K}_{ro}, \bar{K}_{rw}$ ——平均油、水相对渗透率, 无量纲;
- h ——储层厚度, m ;
- a, b ——椭圆渗流区域任意等压线的半长轴、半短轴, m ;

- a, b ——水平裂缝的半长轴、半短轴, m ;
- x, y ——椭圆系数, 无量纲;
- K_f^* ——水平裂缝等效渗透率, $10^{-3} \mu m^2$;
- d^* ——根据等效区域椭圆和井筒边界计算的系数, 无量纲;
- w_f ——平均裂缝支撑宽度, m ;
- r_w ——井筒半径, m ;
- L ——注采井距, m ;
- Q_{Po}^{Total} ——分层压裂直井日产量, m^3 ;
- $Q_{Poi}^{high}, Q_{Poj}^{low}$ ——表内、表外储层日产量, m^3 ;
- c, d ——表内、表外储层总数;
- i, j ——表内、表外储层编号。
- μ_o, μ_w ——地下原油、地下水粘度, $mPa \cdot s$;
- λ ——启动压力梯度, MPa/m ;
- α ——注采比, 无量纲;
- β ——井网形状因子, 无量纲;

参 考 文 献

- [1] 韩大匡, 万人溥. 多层油藏开发模式 [M]. 石油工业出版社, 1999.
Han Dakuang, Wan Renpu. The development models of multizone sandstone reservoirs [M]. Petroleum Industry Press, 1999.
- [2] 刘丁曾, 王启民, 李伯虎. 大庆多层砂岩油田开发 [M]. 石油工业出版社, 1996.
Liu Dingceng, Wang Qimin, Li Bohu. Development of multi-sandstone reservoirs in Daqing oil field [M]. Petroleum Industry Press, 1996.
- [3] Wu Xingcai, Xiong Chunming, Han Dakuang et al. A new IOR method for mature waterflooding reservoirs "Sweep control technology" [J]. SPE 171485, 2014.
- [4] Ali E, Kalita R, Mujaini R et al. Waterflood conformance control in heavy oil multilayer reservoirs [C]. IPTC 15306, 2012.
- [5] 刘合, 裴晓含, 罗凯, 等. 中国油气田开发分层注水工艺技术现状与发展趋势 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 733-735.
Liu He, Pei Xiaoguang, Luo Kai, et al. Current status and trend of separated layer water flooding in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 733-737.
- [6] 胡伟, 闫超, 陈正涛, 等. 大庆油田杏六区中部油藏三次加密合理布井方式 [J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(6): 73-75.
Hu Wei, Yan Chao, Chen Zhengtao, et al. Study of reasonable well planning for third infilling in Xing6 Central, Daqing Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(6): 73-75.
- [7] 熊春明, 唐孝芬, 等. 国内外堵水调剖技术最新进展及发展趋势 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 83-88.
Xiong Chunming, Tang Xiaofen. Technologies of water shut-off and profile control: An overview [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 83-88.
- [8] 朱友益, 侯庆锋, 简国庆, 等. 化学复合驱技术研究与应用现状及发展趋势 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 90-96.
Zhu Youyi, Hou Qingfeng, Jian Guoqing, et al. Current development

- and application of chemical combination flooding technique [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2013 40(1): 90–96.
- [9] Mustoni J L, Cabrera F A, Manrique E J, et al. Application of a thermally activated particle system for improved sweep efficiency in a multilayer geologically complex waterflood [C]. SPE 153331 2012.
- [10] Michael Husband, Danielle Ohms, Harry Frampton, et al. Results of a three-well waterflood sweep improvement trial in the Prudhoe bay field using a thermally activated partical system [C]. SPE 129967, 2010.
- [11] Mazen Abdalbaki, Chun Huh, Kamy Sepehrmoori, et al. A critical review on use of polymer microgels for conformance control purposes [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2014, 122: 741–753.
- [12] 高大鹏, 叶继根, 胡永乐, 等. 精细分层注水约束的油藏数值模拟 [J]. *计算物理* 2015, 32(3): 38–44.
Gao Dapeng, Ye Jigen, Hu Yongle, et al. Numerical reservoir simulation constrained to fine separated layer water injection [J]. *Chinese Journal of Computational Physics* 2015, 32(3): 38–44.
- [13] 高大鹏, 叶继根, 胡永乐, 等. 多层油藏精细分层注水的吸水效果评价方法 [J]. *石油勘探与开发* 2015, 42(6): 711–715.
Gao Dapeng, Ye Jigen, Hu Yongle, et al. An evaluation model for stratified water injection in multilayer reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2015, 42(6): 711–715.
- [14] 付广群, 魏泽钢, 郭宏伟, 等. 杏南油田表外储层特征及开采方式 [J]. *大庆石油学院学报* 2003, 27(4): 15–17.
Fu Guangqun, Wei Zegang, Guo Hongwei, et al. Characteristics and recovery method of untabulated reservoirs in Xingnan oilfield [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute* 2003, 27(4): 15–17.
- [15] 谢建华, 刘崇江, 赵骊川, 等. 桥塞压裂工艺技术 [J]. *大庆石油地质与开发* 2004, 23(4): 38–39.
Xie Jianhua, Liu Chongjiang, Zhao Lichuan, et al. Bridge plug fracturing technique [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2004, 23(4): 38–39.
- [16] 马健, 张春龙. CO₂ 压裂技术在杏南试验区的应用研究 [J]. *大庆石油地质与开发* 2008, 27(3): 462–465.
Ma Jian, Zhang Chunlong. Block compressed storage and computation in large-scale reservoir simulation [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2008, 27(3): 462–465.
- [17] 周望, 何师荣, 赵春生. 大庆油田压裂裂缝形态及特征 [J]. *石油勘探与开发* 1982, 3: 66–72.
Zhou Wang, He Shirong, Zhao Chunsheng. Operations and their characteristics in Daqing oil field [J]. *Petroleum Exploration and Development* 1982, 3: 66–72.
- [18] 赵永胜, 王秀娟, 兰玉波, 等. 关于压裂裂缝形态模型的讨论 [J]. *石油勘探与开发* 2001, 28(6): 97–98.
Zhao Yongsheng, Wang Xiujian, Lan Yubo, et al. Discussion on model of induced fracture geometry [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2001, 28(6): 97–98.
- [19] 侯吉瑞, 李海波, 姜瑜, 等. 多井缝洞单元水驱见水模式宏观三维物理模拟 [J]. *石油勘探与开发* 2014, 41(6): 717–722.
Hou Jirui, Li Haibo, Jiang Yu, et al. Macroscopic three-dimensional physical simulation of water flooding in multi-well fracture-cavity unit [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2014, 41(6): 717–722.
- [20] 白玉湖, 周济福. 油藏复杂驱动体系物理模拟相似准则研究进展 [J]. *力学进展* 2009, 39(1): 58–68.
Bai Yuhu, Zhou Jifu. The advance in the scaling criteria of physical simulation for the complex flows system in reservoir [J]. *Advances in Mechanics* 2009, 39(1): 58–68.
- [21] 秦飞, 姚光庆, 李伟. 宝北区块不同角度裂缝人造岩心驱油对比试验 [J]. *石油天然气学报* 2010, 32(6): 450–453.
Qin Fei, Yao Guangqing, Li Weicai. Contrast experiment on displacement of artificial cores with different angles in Baobei region [J]. *Journal of Oil and Gas Technology* 2010, 32(6): 450–453.
- [22] 滕起, 杨正明, 刘学伟, 等. 特低渗透油藏水驱油物理模拟相似准则的推导和应用 [J]. *科技导报* 2013, 31(9): 40–45.
Teng Qi, Yang Zhengming, Liu Xuewei, et al. Similar criteria derivation for the physical simulation of water flooding in the plate model of ultra-low permeability reservoir and its applications [J]. *Science & Technology Review* 2013, 31(9): 40–45.
- [23] Sung W, Ertekin T. Performance Comparison of Vertical and Horizontal Hydraulic Fractures and Horizontal Boreholes in Low Permeability Reservoirs: A Numerical Study [C]. SPE 16407, 1987.
- [24] Valko, Peter. Transient Behavior of Finite Conductivity Horizontal Fractures [C]. SPE 38436, 1998.
- [25] Larsen, Leif. Horizontal Fractures in Single and Multilayer Reservoirs [C]. SPE 147004, 2011.
- [26] Kyle E Frieauf, Ajay Suri, Mukul M Sharma. A Simple and Accurate Model for Well Productivity for Hydraulically Fractured Wells [C]. SPE Production & Operations 2010, 25(4): 453–460.
- [27] Zeng Baoquan, Cheng Linsong, Li Chunlan. Low velocity non-linear flow in ultra-low permeability reservoir [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2011, 80(1): 1–6.
- [28] 刘义坤, 王凤娇, 胡超洋, 等. 薄差储层油水渗流规律研究 [J]. *特种油气藏* 2013, 20(5): 89–92.
Liu Yikun, Wang Fengjiao, Hu Chaoyang, et al. Study on oil/water percolation in thin and poor pay zone [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs* 2013, 20(5): 98–101.
- [29] 刘月田, 葛家理. 各向异性圆形地层渗流的解析解 [J]. *石油大学学报* 2000, 24(2): 40–43.
Liu Yuetian, Ge Jiali. Analytic Solution for Fluid Flow through A Circular Anisotropic Formation [J]. *Journal of the University of Petroleum* 2000, 24(2): 40–43.
- [30] Hajibeigi H, Karvounis D, Jenny P. A hierarchical fracture model for the interative multiscale finite volume method [J]. *Journal of Computational Physics* 2011, 230(24): 8729–8743.

(编辑 张玉银)