

特低渗透油藏水驱规律及最佳驱替模式

王文环¹,彭缓缓¹,李光泉²,蔚涛¹,魏晨吉¹

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石化石油工程技术服务有限公司,北京 100020)

摘要:为了进一步改善特低渗透油藏开发效果,提高水驱采收率,通过大量特低渗透油藏水驱开采特征研究,揭示了特低渗透油藏的水驱规律:在注水开发过程中,特低渗透油藏会首先沿现今最大水平主应力方向注、采井间开启注水动态裂缝,随着注水压力的升高,或将开启与之成最小角度的注采井连线方向裂缝,导致注入水沿裂缝方向注采井无效循环,造成油藏水驱开发效果很差。等值渗流阻力法计算结果也证明了面积驱替径向渗流转为裂缝线性侧向驱替平行流后可大大降低渗流阻力。由此提出了“沿现今最大水平主应力方向注水动态裂缝线性注水、侧向基质驱替”的井网转换模式。井网模式的转换避免了注水动态裂缝导致的注入水无效循环,消除了动态裂缝对储层非均质性的影响,减小了渗流阻力,扩大了水驱波及程度。现场应用效果显著,单井产能增加了一倍,平面波及系数提高了43.2%,水驱采收率提高了19.3%。

关键词:渗流阻力;注水动态裂缝;侧向驱替;平面径向流;平面平行流;水驱规律;特低渗透油藏

中图分类号:TE341

文献标识码:A

Waterflooding and optimum displacement pattern for ultra-low permeability reservoirs

Wang Wenhuan¹, Peng Huanhuan¹, Li Guangquan², Yu Tao¹, Wei Chenji¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. Oilfield Service Corporation, SINOPEC, Beijing 100020, China)

Abstract: This study reveals the waterflooding pattern of ultra-low permeability reservoir after the analysis of waterflooding recovery characters of plenty ultra-low permeability oil reservoirs, with a view to further bettering the development of ultra-low permeability oil reservoirs and enhancing oil recovery. It can be concluded that fractures induced by water injection will open along the injection-production line in the direction of in-situ maximum horizontal principal stress. In addition, as the angle between the in-situ maximum principle stress and the injection-production line becomes smaller with the increase of water injection pressure, the induced fracture is more likely to open, resulting in an invalid circulation of injected water to injection-production wells and poor waterflooding effect. Moreover, the seepage resistance of linear lateral displacement of the fracture is less than that of the radial displacement calculated by equivalent percolation resistance method. In turn a well pattern conversion mode of “linear injection into dynamic fractures along the direction of in-situ maximum horizontal principal stress with matrix displacement of lateral side” is proposed. The optimized well pattern can improve water sweep efficiency by mitigating the effect of dynamic fractures on reservoir heterogeneity and reducing seepage resistance. In application, the productivity of single wells has doubled, the plane sweep coefficient has increased by 43.8%, and the waterflooding recovery ratio has increased by 19.3%.

Key words: seepage resistance, waterflooding dynamic fracture, lateral displacement, plane radial flow, plane parallel flow, waterflooding pattern, ultra-low permeability reservoir

特低渗透油藏在注水开发过程中,普遍存在含水上升快、产量递减大,水驱采收率低(仅为20%左右)

等问题。为掌握特低渗透油藏开采规律,进一步改善水驱开发效果,前人在天然裂缝、人工裂缝与现今地应

收稿日期:2018-09-13;修订日期:2018-09-29。

第一作者简介:王文环(1965—),女,高级工程师、博士,低渗透油气田开发。E-mail: wangwenhuan@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油科技重大专项(2016B-13)。

力,以及合理井网优化调整方面开展了大量研究工作^[1-12],主要是从天然裂缝成因、分布规律预测,人工裂缝与现今地应力的关系,以及井网与油井人工压裂裂缝适配性等方面开展了研究,以避免天然裂缝及人工压裂裂缝见水问题;提出了大井距、小排距的菱形反九点、五点矩形等井网方式,增大驱替压力梯度,改善水驱状况。但在注水开发过程中,油井仍出现方向性水淹,导致油藏含水快速上升,产量低,水驱开发效果极差^[13-19]。揭示特低渗透油藏水驱规律,研究其最佳驱替渗流模式对提高特低渗透油藏水驱采收率具有重要意义。

为此,笔者通过对大量已开发特低渗透油藏开采特征研究,在揭示了特低渗透油藏水驱开发规律的基础上,提出了特低渗透油藏应遵循“沿现今最大水平主应力方向注水动态裂缝线性注水、侧向基质驱替模式”的新理念,给出了不同类型井网转“裂缝线性注水、侧向基质驱替”模式。应用数值模拟研究表明,井网模式转换不仅避免了注水动态裂缝导致的注入水无效循环,也消除了注水动态裂缝对储层非均质性的影响,扩大了水驱波及程度,是特低渗透油藏水驱开发的最佳驱替模式。同时通过理论计算进一步证明“平面径向渗流转平面平行渗流”能够大大降低油藏驱替渗流阻力,并相应地提高注、采驱替压力梯度,有利于实现基质的有效驱替,增加油井产量,提高驱油效率。由井网模式的转换实现了渗流方式的转换,形成了不同类型油藏最佳的驱替渗流模式。

1 特低渗透油藏开采特征及水驱规律

1.1 特低渗透油藏开采特征

现场大量特低渗透油藏开采特征研究表明,无论井网注水主流线方向与现今最大水平主应力方向是否

一致,在注水开发过程中,首先沿现今最大水平主应力方向开启注水动态裂缝,导致主、侧向油井具有不同的开采特征:裂缝主向油井暴性水淹,侧向油井产量递减;转注或关闭水淹油井后,侧向油井产量、含水长期稳定(图1)。

如WY油藏采用注水主流线与现今最大水平主应力方向呈 22.5° , $300\text{ m}\times 300\text{ m}$ 不规则正方形反九点井网,在投产1~2 a内,沿现今最大水平主应力方向的油井陆续发生暴性水淹,而侧向油井初期产量递减,关闭或转注主向水淹油井后,产量和含水稳定均10 a以上。

PQ油藏采用注水主流线与现今最大水平主应力方向呈 0° , $300\text{ m}\times 300\text{ m}$ 正方形反九点井网,同样,也在投产1~2 a内,沿现今最大水平主应力方向的油井全部发生暴性水淹,关闭主向水淹油井后,侧向油井产量和含水到目前一直保持稳定。

CYG油藏采用注水主流线与现今最大水平主应力方向呈 22.5° , $300\text{ m}\times 300\text{ m}$ 正方形反九点井网,在投产4~5 a内,沿现今最大水平主应力和与之呈较小角度的注水井排方向的油井陆续发生暴性水淹;而4个角井保持低产、原始低含水状态。

1.2 特低渗透油藏水驱规律

基于以上多个特低渗透油藏开发特征认识不难发现,当注水压力达到现今水平最小应力时,首先沿现今最大水平主应力方向开启注水动态裂缝,随着注水压力的升高,会依次开启与之成较小角度的注采井连线方向裂缝^[17-19]。

特低渗透油藏水驱规律受控于注水动态裂缝的开启规律,如果油藏只开启了单方向裂缝,主向油井水淹,转注水淹油井后,侧向油井产量、含水保持长期稳定的开采特征具有普遍性。即特低渗透油藏水驱开发

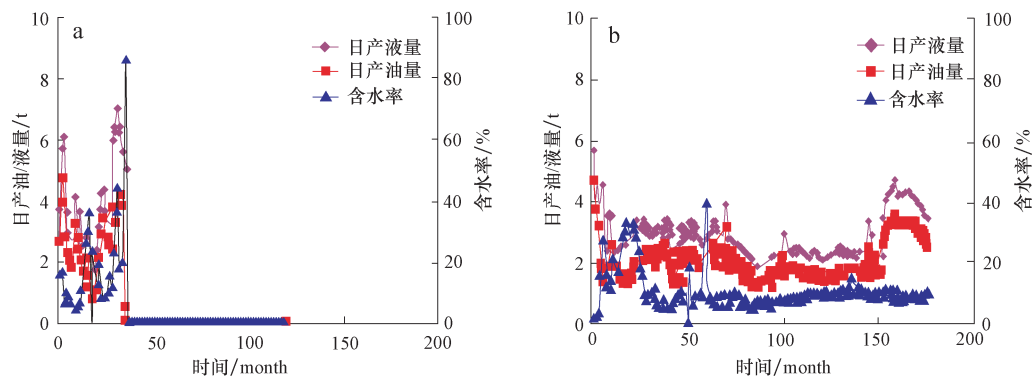


图1 不同类型油井生产特征曲线

Fig. 1 Production characteristics of different types of oil wells

a. 典型主向井生产特征曲线;b. 典型侧向井生产特征曲线

遵循“沿现今最大水平主应力方向注水动态裂缝线性注水、侧向基质驱替”的水驱规律。水驱过程可划分为主向造缝窜流和侧向基质驱替阶段。

主向造缝窜流阶段:注入水憋压并沿现今最大水平主应力方向造缝,导致该方向油井发生暴性水淹,产量迅速递减、含水快速上升,该阶段以主向裂缝窜流为主(图2a I段)。

侧向基质驱替阶段:关井或转注现今最大水平主应力方向水淹油井后,沿注水动态裂缝形成高压条带,注入水开始沿裂缝侧向基质驱替,侧向油井及油藏产量、含水稳定,该阶段以裂缝侧向基质驱替为主(图2a II段)。

如果油藏开启了双向裂缝,最大主应力方向和与之呈较小角度的注采井排方向油井依次暴性水淹,导致油藏含水上升、油量递减。关闭或转注主向水淹油井后,由于仍存在其他井排方向注入水的无效循环,导致油藏含水依然快速上升,产量持续下降,油藏难以稳产(图2b)。特低渗透油藏的开发必须控制非主向开启裂缝,只主向开启裂缝,遵循“主向裂缝线性注水、侧向基质驱替”的规律,才能实现油藏有效水驱开发。

WY油藏和PQ油藏的数值模拟研究亦表明^[19]低渗透油藏水驱遵循“裂缝线性侧向基质驱替”规律。虽然WY油藏和PQ油藏注水井排与现今最大水平主应力方向呈不同角度,但剩余油均沿现今最大水平主应力方向裂缝侧向呈条带状分布,且离裂缝侧向距离越远,含油饱和度越高。

另外,WY油藏加密调整试验进一步验证了模拟结果,部署在最大水平主应力方向注采井连线上的8口井含水率均为100%,距离裂缝垂向80 m左右的井含水率为30%~40%,距离大于100 m井含水率在10%以内,为油藏原始含水。

综合以上研究表明,特低渗透油藏在注水开发过程中,不可避免的导致现今最大水平主应力方向注水动态裂缝的开启和延伸。注入水首先沿该方向裂缝窜流,导致注入水无效循环,油藏基质得不到有效驱替,水驱效果很差。但当关闭或转注该方向水淹油井后,沿注水动态裂缝形成高压条带,高压条带与侧向低压生产井排之间形成一定的注、采压差,注入水便从高压条带向侧向低压生产井排驱替,侧向油井产量、含水可保持长期稳定,油藏便进入了沿该方向动态裂缝线性注水、侧向基质有效驱替的状态,实现特低渗透油藏注水动态裂缝侧向基质的有效驱替。因此,注水动态裂缝是影响特低渗透油藏水驱开发效果的主控因素,特低渗透油藏水驱开发必须控制非主向开启裂缝,同时遵循“沿现今最大水平主应力方向注水动态裂缝线性注水、侧向基质驱替”的水驱规律。

2 特低渗透油藏不同类型井网转换模式

遵循“主向注水动态裂缝线性注水、侧向基质驱替”的水驱规律,是实现油藏的有效驱替的关键。在对特低渗透油藏水驱规律认识的基础上,形成了6种不同类型井网的最佳转换模式。

2.1 注水主流线与现今最大水平主应力方向一致的井网转化模式

1) 0°正方形反九点井网加密调整转化模式

注水主流线与现今最大水平主应力呈0°,300 m×300 m反九点井网,当注水压力达到现今最小水平主应力时,沿现今最大主应力方向开启裂缝,并逐渐延伸。当注水动态裂缝贯穿主向油井,主向油井水淹,注入水在注、采井之间无效循环,无法形成有效驱替。为

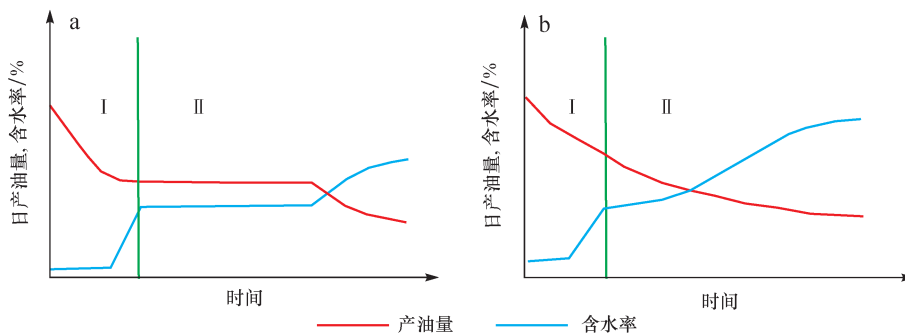


图2 不同裂缝开启特征油藏产量、含水变化模式

Fig. 2 Production and water cut of reservoirs with different crack characteristics

a. 开启单方向裂缝油藏;b. 开启双向裂缝油藏

I. 沿裂缝驱替阶段; II. 沿侧向基质驱替阶段

形成有效驱替,转注主向水淹油井,形成裂缝线性侧向驱替。由于转注后每个井组会有两口主向油井的产量损失,且侧向油水井排距为 300 m,难以建立有效驱替,因此为弥补油井产量损失并保持合理油水井数比 3,每个井组内建议加密四口油井。基于上文特低渗透油藏水驱及剩余油分布规律认识,提出沿主向裂缝两侧平行于水线加密;同时为建立有效侧向驱替,排距缩小为 150 m。最终 300 m × 300 m, 0°正方形反九点井网加密转化为 300 m × 150 m 两排注水井加三排油井的线性注水、侧向驱替排状井网(图 3a)。

2) 0°反七点井网加密调整转化模式

对于 420 m × 210 m 的反七点井网,当最大主应力方向油井水淹后转注,形成排距为 210 m 的线性交错井网,但侧向难以建立有效驱替系统,可加密调整为 210 m × 105 m 线性注水、侧向驱替井网(图 3b)。

3) 0°菱形反九点井网加密调整转化模式

同 0°正方形反九点井网,当主向油井水淹后即转注,以减少注入水无效循环。开发实践表明,排距为 150, 160 和 180 m 的菱形反九点井网转注水淹油井后,都能够形成有效驱替,但为保持合理油水井数比 3,提出一个井组内沿注水动态裂缝侧向加密 4 口新油井,形成

沿注水动态裂缝线性注水,侧向基质驱替的交错排状井网(图 3c1);对于排距为 220 m 菱形反九点井网,由于排距大,难以形成有效驱替,侧向缩小排距加密,同时主向水线上加密两口水井,变成井距为 180 m,排距为 150 m,两排水井夹三排油井线性井网(图 3c2)。

2.2 注水主流线与现今最大水平主应力方向呈一定角度的井网转化模式

1) 22.5°正方形反九点、单向缝开启井网调整转化模式

注水主流线与现今最大水平主应力呈 22.5°的 300 m × 300 m 反九点井网,当注水压力达到现今最小水平主应力时,最大水平主应力方向开启裂缝^[17],跨井组油井水淹。转注该方向水淹油井,同时侧向加密两口水井成为 223 m × 134 m 线性侧向驱替注采井网(图 4a)。

2) 22.5°正方形反九点、双向缝开启井网调整转化模式

注水主流线与现今最大水平主应力呈 22.5°, 300 m × 300 m 反九点井网,当注水压力达到最小水平主应力时,最大水平主应力方向开启裂缝^[17];当注水

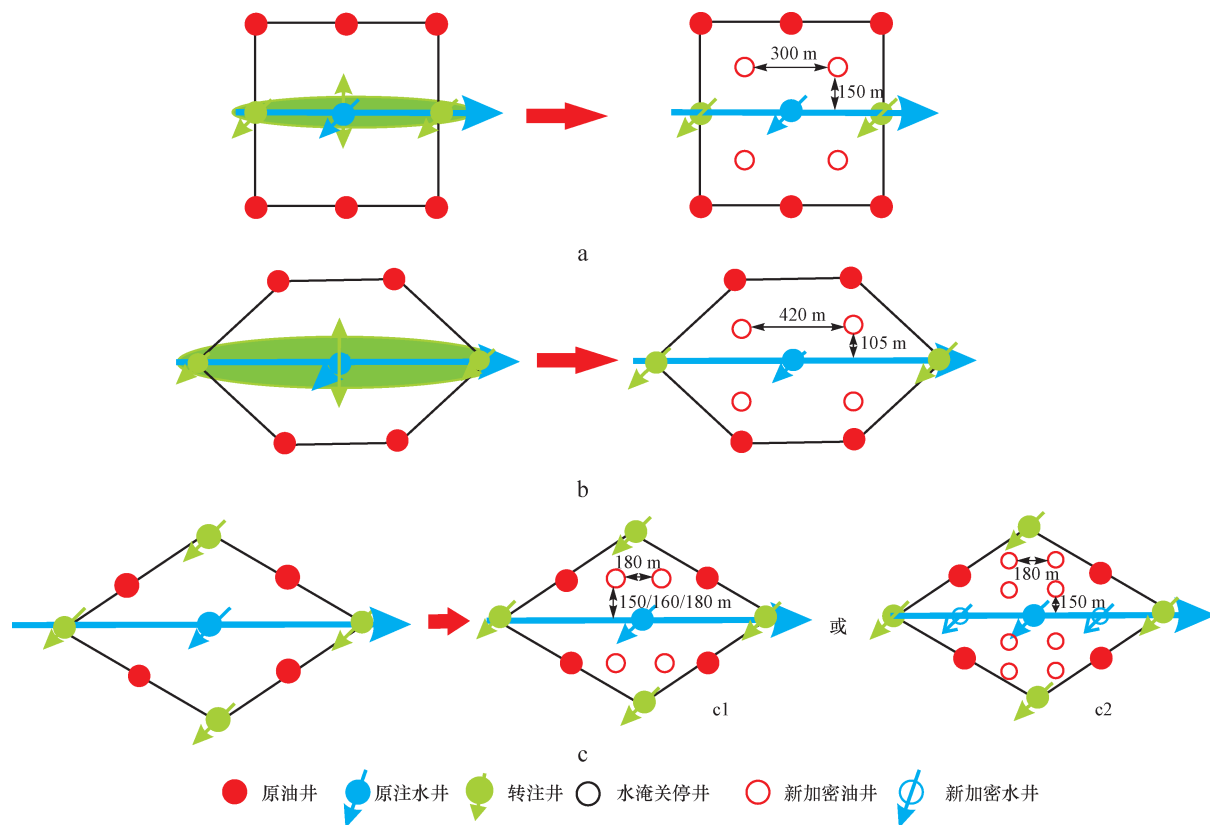


图3 0°井网加密调整转化模式

Fig.3 Infilling adjustment transformation mode of 0° well pattern

a. 0°正方形反九点井网;b. 0°反七点井网;c. 0°菱形反九点井网

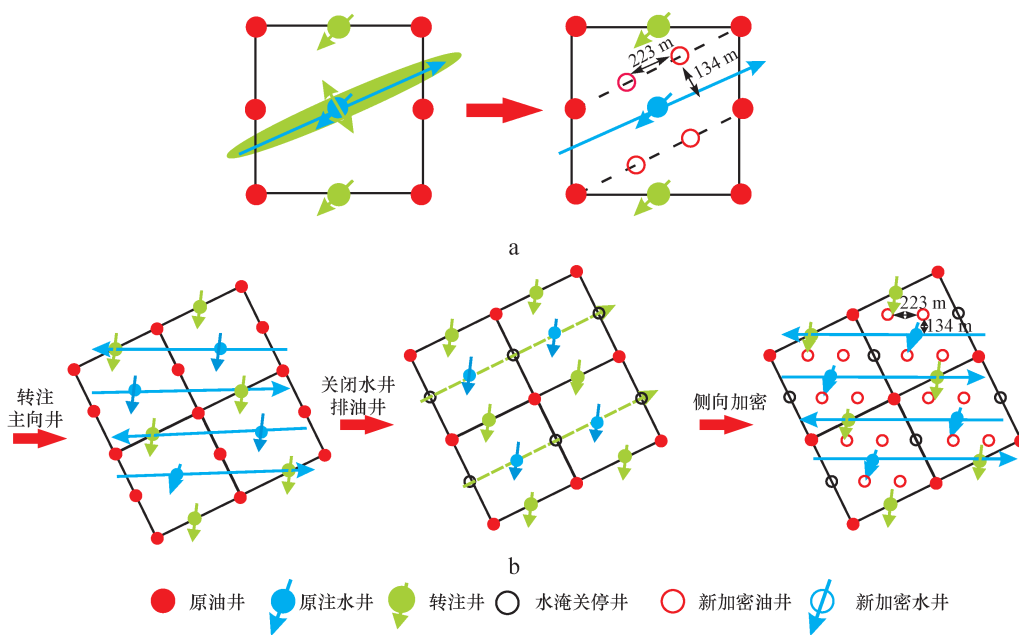


图4 22.5°井网加密调整转化模式

Fig. 4 Infilling adjustment transformation mode of 22.5° well pattern

a. 22.5°单方向水淹正方形反九点井网; b. 22.5°双方向水淹正方形反九点井网

压力继续增大时,与最大水平主应力方向呈最小角度的注采井排方向又开启裂缝。该类井网的调整转化模式为:首先转注最大水平主应力方向的水淹油井,同时关闭注水井排方向水淹油井,形成沿现今最大主应力方向线性注水井网;沿现今最大主应力水线侧向均匀加密,形成 223 m × 134 m 线性侧向驱替注采井网(图4b)。

3 特低渗透油藏不同渗流方式阻力对比

井网转换带来了渗流方式的转换,渗流方式由平面径向流变为平面平行流^[20-25]。渗流方式的转换可以大大减小渗流阻力,增加有效驱替压力,有利于实现低渗透油藏的侧向有效驱替,提高油井产量,增加驱油效率,是最佳的渗流方式。

3.1 不同驱替方式渗流阻力计算公式推导

应用等渗流阻力法^[26],计算平面径向流和平行流渗流阻力,如图5所示。

在面积注水系统的“单元”内(图5a),从注水井到生产井底的水驱油过程,可以划分为两个连续的渗流阻力区:一是从注水井供给前缘到生产坑道的均质渗流区,简称为外部阻力区。在该区内,流动系数保持不变,渗流阻力大小用 R_1 表示;二是从生产坑道到生产井底的径向渗流区,简称为内部阻力区。该区作用范

围的大小,取决于面积注水系统生产井距的大小。在该区渗流系数保持不变,渗流阻力的大小 R_2 表示。因此,面积径向驱替渗流阻力表示为:

$$R = R_1 + R_2 = \frac{\mu}{2\pi Kh} \left[\ln \frac{d}{r_{ei}} + \ln \frac{d}{2(m+1)r_{ep}} \right] \quad (1)$$

由公式(1)可知,当 r_{ei} 与 r_{ep} 相等时,渗流阻力可表示为:

$$R = \frac{\mu}{Kh} \left[\frac{m+1}{2\pi m} \ln \frac{d}{r_{ei}} - \frac{\ln 2(m+1)}{2\pi m} \right] \quad (2)$$

在排状注水系统内(图5b),从注水井排到生产井底的水驱油过程,亦可以划分为两个连续的渗流阻力区:一段是由注水井排供给坑道向油井排假想排液坑道的流动—呈平面平行流,是直线井排外阻力 R_1 ;另一段是各油井周围以 $\frac{d}{2\pi}$ 为假想供给边缘向各油井的流动—呈平面径向流,为直线井排内阻力 R_2 。因此,排状注水驱替渗流总阻力可由下式表示:

$$R = R_1 + R_2 = \frac{\mu}{ndKh} L + \frac{\mu}{2n\pi Kh} \ln \frac{d}{2\pi r_{wi}} \quad (3)$$

由特低渗透油藏水驱规律研究可知,特低渗透油藏在注水开发过程中,不可避免的导致现今最大水平主应力方向注水动态裂缝的开启和延伸,主向油井水淹。转注水淹油井,可沿现今最大水平主应力方向注水动态裂缝形成高压条带。另外,侧向油井间由于压裂也形成了沿现今最大水平主应力方向的压裂裂缝。

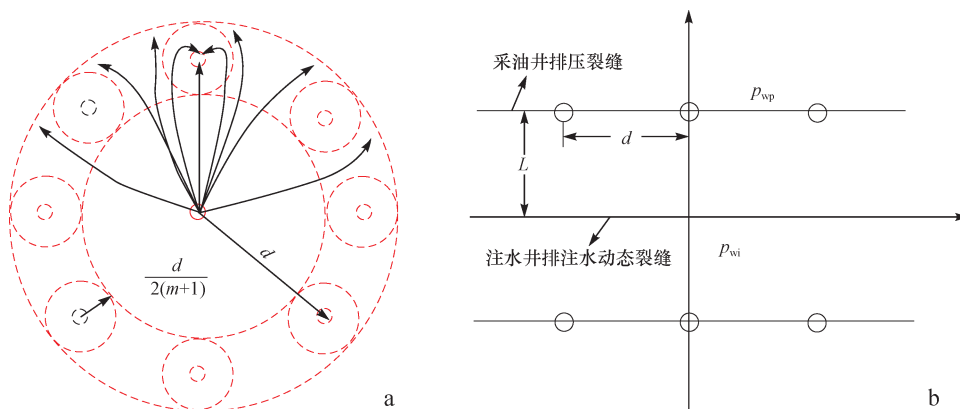


图 5 不同渗流方式渗流阻力区及流线示意图

Fig. 5 Schematic diagram showing the seepage resistance zones and their flow lines in different seepage ways

a. 平面径向流; b. 平面平行流

 P_{wi}, P_{wp} : 注、采井井底流压, MPa; d : 井距, m; m : 注采井数比; L : 井排距

特低渗透油藏转入裂缝线性侧向驱替时,就相当于注水裂缝与压裂裂缝两平行坑道间的平面平行流。其渗流阻力就只有外阻力,排状注水驱替渗流总阻力公式(3)可变为:

$$R = \frac{\mu}{ndKh}L \quad (4)$$

当井距与排距相等时,线性井网油水井数比为 1,则线性侧向驱替渗流阻力即为:

$$R = \frac{\mu}{Kh} \quad (5)$$

式中: μ 为流体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; K 为储层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; h 为油层厚度, m; d 为井距, m; L 为注、采井排距, m; r_{wi} 为生产井半径, m; r_{ei} 为注水井折算半径, m; r_{ep} 为生产井折算半径, m; n 为井数, 口; m 为注采井数比。

3.2 裂缝线性平行流与面积径向流渗流阻力对比

由径向渗流阻力公式(2)和平行渗流公式(5)可计算不同井网形式、不同井排距条件下平面径向流和平面平行流驱替渗流阻力,计算结果详见如下所示(表 1)。

由计算结果可见,任何面积注水井网的驱替渗流阻力都大于相应注、采井排距的裂缝线性井网的渗流

表 1 面积径向渗流阻力/裂缝线性侧向平行流渗流阻力倍数

Table 1 Table showing multiple of area radial seepage resistance/crack linear lateral parallel flow resistance

井排距/m	100	200	300
五点法井网	2.70	2.93	3.06
七点法井网	2.05	2.22	2.32
九点法井网	1.80	1.99	2.08

阻力。如 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 正方形反九点井网渗流阻力是 300 m 排距裂缝线性驱替井网的 2.08 倍,也就是说,转裂缝线性侧向驱替后渗流阻力可减小一半、产量可提高一倍。因此,对于沿现今最大水平主应力方向开启注水动态裂缝的特低渗透油藏,转面积注水井网为裂缝线性注水、侧向基质驱替的线性井网,可大大降低油藏驱替渗流阻力,增加侧向驱替压力梯度,有利于实现侧向基质有效驱替,增加驱油效率,提高单井产量,平面平行流是特低渗透油藏的最佳渗流方式。

4 现场应用效果

WY 油藏采用 22.5° 正方形反九点注采井网,最大主应力方向油井水淹后没有及时关闭或转注,导致油井含水一直上升,注入水无效循环,产量递减到 1.0 t/d ,水驱采收率也不足 16%。

转注裂缝水淹油井,井网转换为裂缝线性注水、侧向驱替后,实现了井网与注水动态裂缝匹配一致,不仅避免了动态裂缝导致的注入水无效循环,也消除了动态裂缝对储层非均质性的影响,扩大了水驱波及程度。数值模拟研究表明,由于原井网注入水沿注水动态裂缝从油井产出,形成无效循环,水驱波及范围小,平面波及系数只有 44.8%;当转注水淹油井,转裂缝线性注水侧向驱替后,水驱波及范围大大提高,平面波及系数为 88%,提高了 43.2%。

现场生产实践也证明井网转换为裂缝线性注水后,更有利于侧向油井建立有效驱替。油藏平均单井产量由井网调整前的不足 1.0 t/d 上升为 2.0 t/d 左右,为井网转换前的 2 倍以上(图 6a)。水驱采收率预

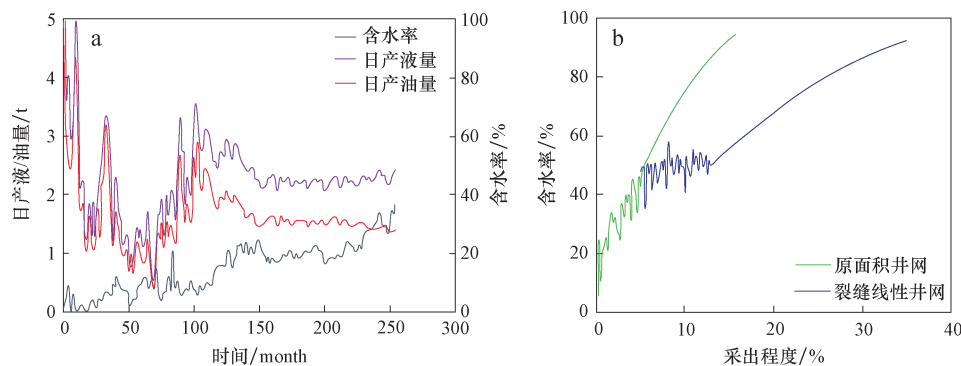


图6 WY油藏开采特征和采收率预测曲线

Fig. 6 Curves showing production characteristics and recovery efficiency prediction for oil reservoir WY

a. WY油藏开采特征曲线; b. WY油藏含水与采出程度关系曲线

计可由井网调整前的15.7%提高到35%(图6b)。因此,“沿现今最大主应力方向裂缝线性注水侧向驱替”是特低渗透油藏水驱开发的最佳驱替模式。

5 结论

1) 在注水开发过程中,特低渗透油藏会首先沿现今最大水平主应力方向注、采井间开启注水动态裂缝,随着注水压力的升高,或将开启与之成最小角度的注采井连线方向裂缝,导致注入水沿裂缝方向注采井无效循环,造成油藏水驱开发效果很差。

2) 通过井网模式转化,实现井网与注水动态裂缝匹配,利用现今最大水平主应力方向注水动态裂缝建立侧向基质驱替,从而实现了渗流方式的转化。这种转化不仅能够避免注水动态裂缝导致的注入水无效循环,消除裂缝对储层的非均质性影响,扩大波及,又能大大降低驱替渗流阻力,增加有效驱替压力梯度,提高驱油效率和单井产量。

3) 坚持“造主向缝、避侧向缝”的原则,建立沿现今最大水平主应力方向注水动态裂缝线性注水、侧向基质驱替模式,对发展特低渗透油藏裂缝线性侧向驱替理论具有非常重要的意义。

参考文献

- [1] 孙贻铃,王秀娟. 朝阳沟油田构造裂缝及其有效性研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(1): 33-34.
Sun Yiling, Wang Xiujuan. Structural fractures and their effectiveness of Chaoyanggou Oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 23(5): 33-34.
- [2] 赵良金,黄新文,王军,等. 文东油田沙河街组三段中亚段油藏裂缝发育规律及其对注水开发的影响[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(1): 102-107.
Zhao Liangjin, Huang Xinwen, Wang Jun, et al. Pattern of fracture

- occurrence and its influence on waterflooding in the Es³ reservoirs of Wendong oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(1): 102-107.
- [3] 曾联波. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布[M]. 北京: 科技出版社, 2008.
Zeng Lianbo. Formation and distribution of fractures in low permeability sandstone reservoir[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [4] 赵向原,曾联波,胡向阳,等. 低渗透砂岩油藏注水诱导裂缝特征及其识别方法——以鄂尔多斯盆地安塞油田W区长6油藏为例. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1187-1197.
Zhao Xiangyuan, Zeng Lianbo, Hu Xiangyang, et al. Characteristics of waterflood induced fracture in low-permeability sandstone reservoirs and its identification methods: A case study from Chang 6 reservoir in W area in Ansai oilfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(6): 1187-1197.
- [5] 赵向原,曾联波,靳宝光,等. 低渗透油藏注水诱导裂缝特征及形成机理——以鄂尔多斯盆地安塞油田长6油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(4): 696-705.
Zhao Xiangyuan, Zeng Lianbo, Jin Baoguang, et al. Characteristics and formation mechanisms of waterflood induced fractures in low-permeability reservoirs: A case study from Chang 6 reservoir in Ansai oilfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 696-705.
- [6] 张璋,何顺利,刘广峰. 低渗透油藏裂缝方向偏转时井网与水力裂缝适配性研究[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(3): 98-101.
Zhang Zhang, He Shunli, Liu Guangfeng. An investigation of suitability between well pattern and hydraulic fracture system with deflected orientation in low permeability reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(3): 98-101.
- [7] 樊兆琪,程林松,耿昌浩,等. 低渗透油藏储层非均质性评价与井网调整新方法[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(2): 93-98.
Fan Zhaoqi, Cheng Linsong, Geng Changhao, et al. A new approach for heterogeneity evaluation and well pattern adjustment in low permeability reservoirs [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 93-98.
- [8] 苏玉亮,吴春新,高丽,等. 特低渗透油藏水驱油注水界限的确定[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(2): 82-86.
Su Yuliang, Wu Chunxin, Gao Li, et al. Determination of waterflooding limits for driving an ultra-low permeability reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(2): 82-86.

- [9] 刘伟伟,苏月琦,王茂文,等. 特低渗透油藏压裂井注采井距与注水见效关系[J]. 断块油气田,2012,19(6):736-739.
Liu Weiwei, Su Yueqi, Wang Maowen, et al. Relationship of injector-producer spacing and waterflooding response for fracturing wells in ultra-low permeability reservoir[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2012, 19(6): 736-739.
- [10] 王文环. 提高薄互层低渗透砂岩油藏采收率的有效开发技术[J]. 石油与天然气地质,2006,27(5):660-667,674.
Wang Wenhuan. Technology of effectively enhancing recovery efficiency in thin-interbedding reservoirs of low-permeability sandstone[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(5): 660-667, 674.
- [11] 高宝国,滑辉,丁文阁,等. 低渗透油田特高含水期开发技术对策:以渤南油田义11井区为例[J]. 油气地质与采收率,2013,20(6):97-99,103.
Gao Baoguo, Hua Hui, Ding Wenge, et al. Technical treatment in extra-high water cut stage for low permeable reservoir: A case study of Yi11 area, Bonan oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(6): 97-99, 103.
- [12] 邹桂丽,王新杰,李祥珠,等. 低渗透油藏五点井网裂缝参数优化研究[J]. 石油化工应用,2013,32(11):16-19,28.
Zou Guili, Wang Xinjie, Li Xiangzhu, et al. Low permeability reservoirs at five o'clock pattern fracture parameters optimization research[J]. Petrochemical Industry Application, 2013, 32(11): 16-19, 28.
- [13] 王友净,宋新民,田昌炳,等. 动态裂缝是特低渗透油藏注水开发中出现的新的开发地质属性[J]. 石油勘探与开发,2015,42(2):222-228.
Wang Youjing, Song Xinmin, Tian Changbing, et al. Dynamic fractures are an emerging new development geological attribute in waterflooding development of ultra-low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 222-228.
- [14] 谢景彬,龙国清,田昌炳,等. 特低渗透砂岩油藏动态裂缝成因及对注水开发的影响——以安塞油田王窑区长6油组为例[J]. 油气地质与采收率,2015,22(3):106-110.
Xie Jingbin, Long Guoqing, Tian Changbing, et al. Genetic mechanism of dynamic fracture and its influence on water flooding development in extra-low permeability sandstone reservoir: A case of Chang6 member in Wangyao area, Ansai oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 106-110.
- [15] 郭发荣,王洪伟,安明胜,等. 安塞特低渗透油田动态裂缝变化特征及其影响[J]. 长江大学学报(自科版),2015,12(23):77-79.
Guo Rongfa, Wang Hong Wei, An Mingsheng, et al. Characteristics and influence of dynamic Fracture in Ansai extra low permeability oilfield[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(23): 77-79.
- [16] 范天一,宋新民,吴淑红,等. 低渗透油藏水驱动态裂缝数学模型及数值模拟[J]. 石油勘探与开发,2015,42(4):496-501
Fan Tianyi, Song Xinmin, Wu Shuhong, et al. A mathematical model and numerical simulation of waterflood induced dynamic fractures of low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4): 496-501.
- [17] 王文环,彭缓缓,李光泉,等. 长庆特低渗透油藏注水动态裂缝及井网加密调整模式研究[J]. 石油钻探技术,2015,43(1):106-110.
Wang Wenhuan, Peng Huanhuan, Li Guangquan, et al. Research on water flooding dynamic fractures to optimize infill drilling spacing in ultra-low permeability reservoirs, Changqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(1): 106-110.
- [18] 王文环,彭缓缓,李光泉,等. 大庆低渗透油藏注水动态裂缝开启机理及有效调整对策[J]. 石油与天然气地质,2015,36(5):842-847.
Wang Wenhuan, Peng Huanhuan, Li Guangquan, et al. Opening mechanism of dynamic fractures caused by water injection and effective adjustments in low permeability reservoirs, Daqing oilfield in Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 842-847.
- [19] 彭缓缓,王文环,吕文峰,等. 考虑动态裂缝的特低渗透油藏渗流模型[J]. 断块油气田,2016,23(05):630-633.
Peng Huanhuan, Wang Wenhuan, Lv Wenfeng, et al. Seepage model of ultra-low permeability reservoir considering dynamic fracture[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2016, 23(05): 630-633.
- [20] 杨正明,于荣泽,苏致新,等. 特低渗透油藏非线性渗流数值模拟[J]. 石油勘探与开发,2010,37(1):94-98.
Yang Zhengming, Yu Rongze, Su Zhixin, et al. Numerical simulation of the nonlinear flow in ultra-low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(1): 94-98.
- [21] 时佃海. 低渗透砂岩油藏平面径向渗流流态分布[J]. 石油勘探与开发,2006,33(4):491-494.
Shi Dianhai. Flow state distribution of areal radial flow in low permeability sandstone reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(4): 491-494.
- [22] 计秉玉,李莉,王春艳,等. 低渗透油藏非达西渗流面积井网产油量计算方法[J]. 石油学报,2008,29(2):256-261.
Ji Bingyu, Li Li, Wang Chunyan, et al. Oil production calculation for areal well pattern of low-permeability reservoir with non-Darcy seepage flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 256-261.
- [23] 陈元千. 线性流的启动压力梯度不能用于平面径向流方程. 石油学报,2011,32(6):1088-1092.
Chen Yuanqian. Improper use of the starting pressure gradient of linear flow in the plane radial flow equation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 1088-1092.
- [24] 刘海龙,吴淑红. 低渗透油藏面积井网产能计算方法[J]. 哈尔滨理工大学学报,2016,21(1):93-99.
Liu Hailong, Wu Shuhong. A new method to calculate well pattern productivity in low permeable reservoir[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2016, 21(1): 93-99.
- [25] 蒲军,秦学杰,苟斐斐,等. 低渗透油藏中不同压裂注采井网非稳态产量计算分析[J]. 石油与天然气地质,2018,39(4):833-838.
Pu Jun, Qin Xuejie, Gou Feifei, et al. Calculation and analysis of unsteady production of different fractured injection-production patterns in low permeability reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 833-838.
- [26] 葛家理. 现代油藏渗流力学原理(上册)[M]. 北京:石油工业出版社,2003.
Ge Jiali. The modern mechanics of fluid flow in oil reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.