

引用格式:童凯军,李长勇,姜俊帅,等.厚油层注采模式对纵向波及特征影响研究[J].油气地质与采收率,2024,31(2):148-154.

TONG Kaijun, LI Changyong, JIANG Junshuai, et al. Research on influence of injection-production modes on longitudinal sweep characteristics of thick reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(2): 148-154.

## 厚油层注采模式对纵向波及特征影响研究

童凯军<sup>1</sup>,李长勇<sup>1</sup>,姜俊帅<sup>1</sup>,姜汉桥<sup>2</sup>,李俊键<sup>2</sup>

(1.中国海洋石油国际有限公司,北京 100008; 2.中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249)

**摘要:**注采模式优选对缓解厚油层层内矛盾,提高纵向波及效率具有重要意义。目前尚未形成油水井同时部分打开的井间解析渗流模型,无法支撑厚油层波及特征的研究。为此,采用保角变换方法,将油水井同时部分打开剖面地层依次变换为圆形边界偏心裂缝井地层、单位圆形边界两分支裂缝井地层、注水井全部打开采油井部分打开剖面地层,之后重复上述变换,将注水井全部打开采油井部分打开剖面地层变换为油水井全部打开剖面地层,从而将原始二维渗流过程变换为一维渗流过程,实现了不同注采模式下厚油层层内压力及流线分布的解析计算。与精细数值模拟方法的对比表明,该方法对不同井距/厚度比的情形均可获得较高计算精度。利用该方法,开展了注采模式对纵向波及特征的研究。结果表明:对于底注高采模式,注水井顶部为主力注入层段,注水井顶部1/3的井段控制超过1/2的地层,使超过2/3的采油井段受效;注水对地层的波及主要作用于注水突破前的阶段。在相同的打开厚度下,底注高采的注水突破最晚、波及效率最高,底注中采、中注高采次之,高注高采、底注底采注水突破最早、波及效率最低。采油井的打开厚度越大,注水突破时间越短,但注水突破时的波及系数增大,应综合考虑注水突破时间和波及系数两方面的因素,优选最佳打开厚度。

**关键词:**厚油层;部分打开井;注采模式;保角变换;纵向波及

文章编号:1009-9603(2024)02-0148-07

DOI:10.13673/j.pgre.202307013

中图分类号:TE357

文献标识码:A

## Research on influence of injection-production modes on longitudinal sweep characteristics of thick reservoirs

TONG Kaijun<sup>1</sup>, LI Changyong<sup>1</sup>, JIANG Junshuai<sup>1</sup>, JIANG Hanqiao<sup>2</sup>, LI Junjian<sup>2</sup>

(1.CNOOC International Limited, Beijing City, 100008, China; 2.College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China)

**Abstract:** The optimization of injection-production modes is of great significance in alleviating intra-layer contradiction and improving longitudinal sweep efficiency for thick reservoirs. The analytical flow model of both producer and injector partially penetrating the reservoir is absent currently, which fails to support the study of the sweep characteristics of thick reservoirs. Therefore, based on the conformal mapping method, this article transformed the section formation with partially penetrating producer and injector into a formation with a circular boundary and off-center fractured well, a formation with a unit circular boundary and two-branch fractured well, and a section formation with fully penetrating injector and partially penetrating producer, sequentially. The above transformations were repeated to transform the section formation with fully penetrating injector and partially penetrating producer into that with fully penetrating injector and producer. In consequence, the original two-dimensional flow process was transformed into a one-dimensional one, achieving analytical calculations of pressure and streamline distribution in thick reservoirs under differ-

收稿日期:2023-07-17。

作者简介:童凯军(1984—),男,安徽安庆人,高级工程师,硕士,从事海外油气田开发领域相关研究工作。E-mail:tongkj@cnooc.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目“水平井控水完井多重耦合精细数值模拟与优化设计方法”(52374055),中海油“十四五”重大科技项目“米桑油田厚层碳酸盐岩油藏储层表征及加密调整技术研究”(YXKY-GJ-02-202)。

ent injection-production modes. The comparison with refined numerical simulation methods shows that the proposed method has high computational accuracy for different well spacing-thickness ratios. The influence of injection-production modes on longitudinal sweep characteristics of thick reservoirs was researched using the method presented in this article. The results show that for the bottom-injection-high-production mode, the top section of the injector acts as the main injection layer, and the top 1/3 of the injector controls more than 1/2 of the formation, resulting in more than 2/3 of the producer being affected. The main impact of water injection on the formation lies in the stage before the water breakthrough. The water breakthrough of bottom-injection-high-production mode is the latest and has the highest sweep efficiency, followed by bottom-injection-medium-production mode and medium-injection-high-production mode under the same penetrating thickness. The water breakthroughs of high-injection-high-production mode and bottom-injection-bottom-production mode are the earliest and have the lowest sweep efficiency. The larger penetrating thickness of the producer indicates a earlier water breakthrough. However, the sweep efficiency in water breakthrough increases. Therefore, the optimal penetrating thickness should be selected by comprehensively considering the factors of water breakthrough time and sweep efficiency.

**Key words:** thick reservoirs; partially penetrating well; production-injection mode; conformal mapping; longitudinal sweep

受韵律性、隔夹层、边底水等因素影响,厚油层内矛盾突出,纵向波及特征对开发效果具有显著影响<sup>[1-6]</sup>。通过控制油水井在油层中的打开程度,形成优化的注采模式,可有效提高厚油层开发效果<sup>[7]</sup>。中外学者利用物理实验、数值模拟等手段,对厚油层在不同韵律性、隔夹层等因素下的纵向波及特征开展了诸多研究<sup>[8-12]</sup>,但对注采模式的研究较少。束青林总结了不同层内隔夹层分布与油水井射孔层位组合模式下的水驱波及特征<sup>[13]</sup>;夏渊研究了油水井射开层位对纵向波及的影响,并提出了水井全部射开、油井逐层上返的开发策略<sup>[9]</sup>;赵思远等研究了4种不同韵律模式下注水井射开层位对纵向波及的影响<sup>[14]</sup>;田鸿照研究了油水井射孔调整方式与时机对注水效果的影响<sup>[7]</sup>。

目前,不同注采模式下厚油层波及动态的计算多采用数值模拟方法,相应的解析方法尚未建立。而解析方法计算效率高,简便易用,并可避免数值模拟的弥散效应。中外学者针对部分打开井的渗流过程开展了诸多研究,主要包括部分打开井的试井解释模型<sup>[15-16]</sup>、产能计算模型<sup>[17-19]</sup>及空间压力分布模型<sup>[20]</sup>。试井解释模型及产能计算模型仅可计算部分打开油井的井底压力动态及产能,无法得到地层压力分布与流体波及特征。空间压力分布模型基于镜像反映及势的叠加原理,仅能考虑单口油井的渗流过程,无法计算注采井间的渗流过程。为此,需建立油水井同时部分打开的井间渗流模型,以研究不同注采模式下纵向波及动态。

基于保角变换方法,将油水井同时部分打开的二维渗流过程变换为油水井全部打开的一维渗流过程,实现不同注采模式下厚油层层内压力分布及流线分布的解析计算。基于该模型,开展了不同注采模式下的厚油层纵向波及特征的分析,可为厚油

层的井位部署、射孔优化及后续调整提供指导。

## 1 部分打开井渗流模型

建立厚油层二维剖面模型,注水井和采油井分别位于模型两侧,均部分打开地层生产。假设岩石及流体均不可压缩,油水井以恒定产量或压力进行生产,地层中的流体渗流为稳态流动。设初始剖面地层所处的平面为 $\xi_1$ ,注采井距为 $L$ ,地层厚度为 $h$ ,注水井段端点 $A, B$ 的坐标分别为 $iz_{1a}, iz_{1b}$ ,生产井段端点 $C, D$ 的坐标分别为 $L + iz_{1c}, L + iz_{1d}$ 。将油水井同时部分打开剖面地层保角变换为圆形边界偏心裂缝井地层(图1),其表达式为:

$$\xi_2 = l_2 \cosh(\beta \xi_1) \quad (1)$$

将圆形边界偏心裂缝井地层保角变换为单位圆形边界两分支裂缝井地层(图1):

$$\xi_3 = \frac{r_{e2}(\xi_2 - \xi_{2m})}{r_{e2}^2 - \xi_{2m} \xi_2} \quad (2)$$

注水井段在 $\xi_3$ 平面的端点分别为:

$$\xi_{3a} = x_{3a} = \frac{r_{e2}(x_{2a} - x_{2m})}{r_{e2}^2 - x_{2a}x_{2m}} = \frac{\lambda_2 [\cos(\beta z_{1a}) - \cos(\beta z_{1m})]}{\lambda_2^2 - \cos(\beta z_{1a}) \cdot \cos(\beta z_{1m})} \quad (3)$$

$$\xi_{3b} = x_{3b} = \frac{\lambda_2 [\cos(\beta z_{1b}) - \cos(\beta z_{1m})]}{\lambda_2^2 - \cos(\beta z_{1b}) \cdot \cos(\beta z_{1m})} \quad (4)$$

根据 $x_{3a} + x_{3b} = 0$ ,可得 $z_{1m}$ 的计算式为:

$$\cos(\beta z_{1m}) = \frac{\lambda_2^2 + \cos(\beta z_{1a}) \cos(\beta z_{1b})}{\cos(\beta z_{1a}) + \cos(\beta z_{1b})} -$$

$$\frac{\sqrt{[\lambda_2^2 - \cos^2(\beta z_{1a})][\lambda_2^2 - \cos^2(\beta z_{1b})]}}{\cos(\beta z_{1a}) + \cos(\beta z_{1b})} \quad (5)$$

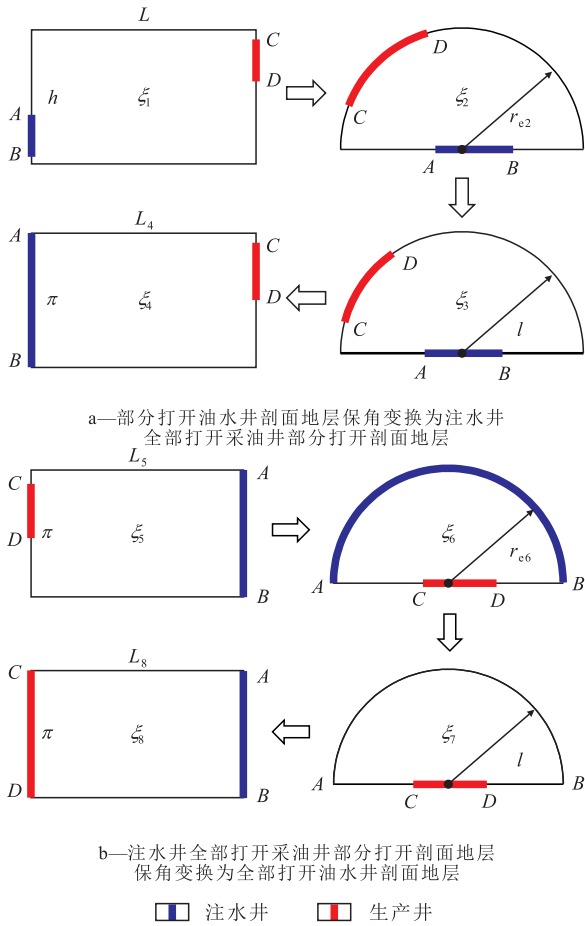


Fig.1 Section formation model by conformal mapping method

类比变换(1)式,将单位圆形边界两分支裂缝井地层保角变换为注水井全部打开的剖面地层(图1),其表达式为:

$$\xi_3 = l_3 \cosh \xi_4 \quad (6)$$

上述3次变换可合并为1次变换,其变换式为:

$$\cos \xi_4 = \frac{\lambda_2 [\cosh(\beta \xi_1) - \cos(\beta z_{1m})]}{l_3 [\lambda_2^2 - \cosh(\beta \xi_1) \cdot \cos(\beta z_{1m})]} \quad (7)$$

通过变换(7)式,将部分打开油水井剖面地层保角变换为注水井全部打开采油井部分打开剖面地层,注采井距为 $L_4$ ,地层厚度为 $\pi$ ,如图1a所示。

对 $\xi_4$ 平面做如下变换,将注采井位置互换(图2),则有:

$$\xi_5 = L_4 - \overline{\xi_4} \quad (8)$$

变换后,注采井距不变,即 $L_5 = L_4$ ,采油井端点 $z_{5c} = z_{4c}$ , $z_{5d} = z_{4d}$ ,其中 $z_{4c}$ , $z_{4d}$ 通过将 $L + iz_{1c}$ , $L + iz_{1d}$ 代入变换(7)式获得。

类比变换(7)式,对 $\xi_5$ 平面做如下变换,则有:

$$\cos \xi_8 = \frac{\lambda_6 (\cosh \xi_5 - \cos z_{5m})}{l_7 (\lambda_6^2 - \cosh \xi_5 \cdot \cos z_{5m})} \quad (9)$$

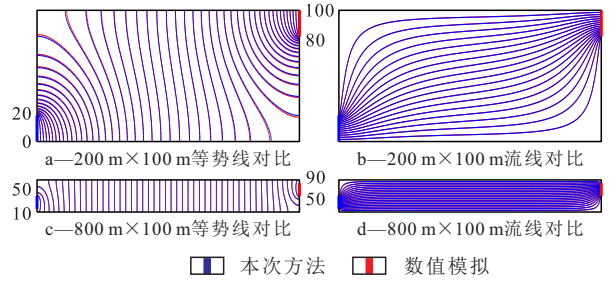


图2 验证模型示意及等势线、流线对比  
Fig.2 Illustration of validation model and comparisons of equipotential lines and streamlines

通过变换(9)式,将注水井全部打开采油井部分打开剖面地层保角变换为全部打开油水井剖面地层,注采井距为 $L_8$ ,地层厚度为 $\pi$ ,如图1b所示。

结合变换(7)一(9)式,可将油水井同时部分打开的二维渗流过程变换为油水井全部打开的一维渗流过程。根据变换前后产能不变规则,可得部分打开油水井的产量为:

$$Q = \frac{K\pi W(p_1 - p_2)}{\mu L_8} \quad (10)$$

$\xi_8$ 平面的等势线为 $x_8 = c$ , $0 \leq c \leq L_8$ ;流线为 $z_8 = d$ , $0 \leq d \leq \pi$ 。对于 $\xi_1$ 平面任意一点 $x_1 + iz_1$ ,利用变换(7)一(9)式,计算该点在 $\xi_8$ 平面的位置为 $x_8 + iz_8$ ,进而获得 $\xi_1$ 平面的等势线和流线。利用流线分布,可开展地层波及特征的分析。

## 2 模型验证

分别建立2组不同井距(200和800 m)的剖面地层模型,地层厚度均为100 m。注采模式均为底注高采,模型1的注采井打开厚度为20 m,模型2的注采井打开厚度为40 m,如图3所示。利用该方法计算得到了2组模型的等势线分布以及流线分布,并建立了精细网格数值模拟模型作为对比。数值模拟模型的压力分布通过常规差分方法计算<sup>[21]</sup>,流线分布通过Pollock方法计算<sup>[22-23]</sup>。由图2可知,对于不同的井距/厚度比,该方法与精细数值模拟方法的等势线、流线吻合程度较高,验证了其准确性。

## 3 注采模式对纵向波及特征影响

### 3.1 底注高采

建立了注采井距为200 m、地层厚度为100 m的剖面地层模型,注采模式为底注高采,注水井打开底部1/3地层,采油井打开顶部1/3地层,计算结果如图3和图4所示。由图3可知,近井区域等势线近



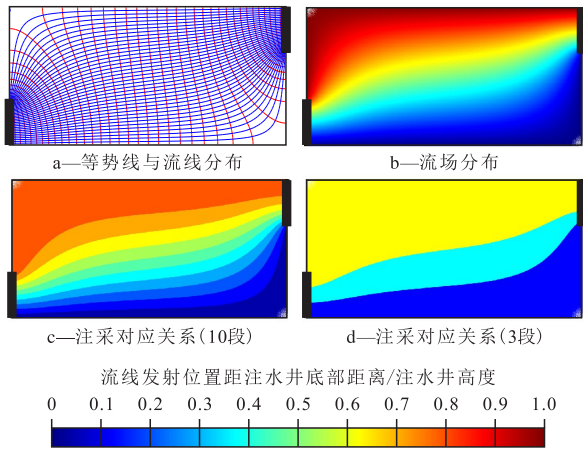


图3 底注高采模式下的等势线与流线分布及注采对应关系

Fig.3 Distributions of equipotential lines and streamlines and injector-producer relationship under bottom-injection-high-production mode

似呈半椭圆形分布,后向地层中部渐变为等间距斜线簇,相应低流线在近井区域汇聚,在地层中部近似呈等间距斜线簇。对流线进行加密,并根据每条流线末端的高度进行配色,其中蓝色代表流入采油井底部的流线,红色代表流入采油井顶部的流线,由此得到地层的流场分布。根据流场分布,将注水井分为10段和3段,并得到注采对应关系。从注水井底部到顶部,各注水井段的控制体积增大,对应的采油井受效段变长。注水井底部、中部、顶部的控制体积分别占油层总体积的24%,25%,51%,对应的受效段分别占采油井总长度的8%,22%,70%。可见,注水井顶部1/3的井段控制超过1/2的地层,使超过2/3的采油井段受效,注水井顶部为注水井的主力注入层段。

图4为不同注水阶段对应的注水波及分布。其中,注水突破时间为从注水井到生产井流动时间最

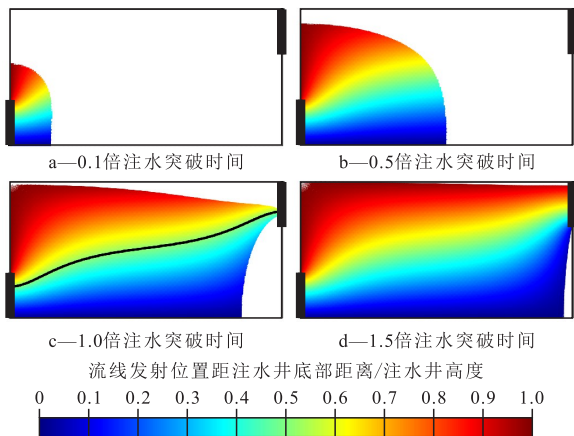


图4 底注高采模式下的注水波及动态

Fig.4 Water sweeping dynamics under bottom-injection-high-production mode

短的流线所对应的流动时间。由图4可知:注水初期,注入水近似呈椭圆形向采油井推进,且垂直井段方向的推进速度快于平行井段方向;注水中前期,垂直井段方向的注入水受边界影响,推进速度变慢,此时2个方向的注水推进速度大致相同,注水前缘近似呈扇形;注水突破时,注水前缘呈箭头状,最早突破的流线位于油层中部(图中黑线),由距注水井底部约2/3倍井段处流出,流入距采油井底部约2/3倍井段处;注水突破后,当注水时间为1.5倍突破时间时,地层绝大部分已被波及。4个不同阶段的地层波及系数分别为0.14,0.44,0.82,0.97,因此注水对地层的波及主要作用于注水突破前的阶段,1.5倍注水突破时间后,注水将呈无效循环状态。

### 3.2 不同注采模式

分别研究底注高采、中注高采、高注高采、底注中采、底注底采5种不同注采模式下的注水波及特征。注采井保持打开1/3地层。底注高采、中注高采、底注中采的注采井位置存在交错,最早突破流线位于地层中部,注水波及效率高。高注高采、底注底采的注采井位置正对,最早突破流线位于地层顶部、底部,注水波及效率低。5种注采模式的注水突破时间分别为225,205,195,205,195 d,注水突破时的波及系数分别为0.82,0.78,0.70,0.79,0.70,即底注高采的注水突破最晚、波及效率最高(图4c),底注中采、中注高采次之,高注高采、底注底采注水突破最早、波及效率最低(图5)。

底注高采、中注高采、底注中采的突破时间从底部到顶部均呈先降低后增加的特点,其中底注高采顶部与底部突破时间相当,中注高采顶部突破时间晚于底部的,底注中采顶部突破时间早于底部的。底注底采的突破时间从底部到顶部先缓慢增

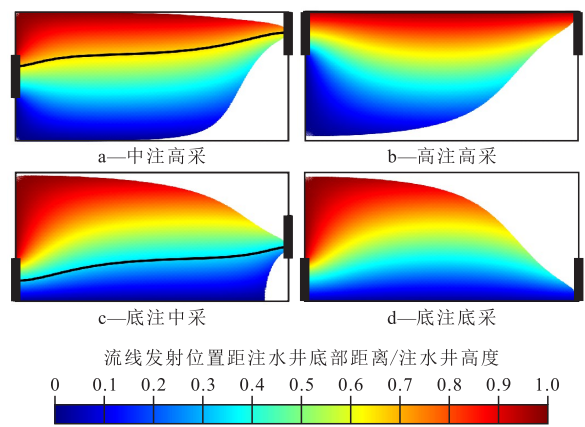


图5 不同注采模式下注水突破时的注水波及分布

Fig.5 Water sweeping distribution at water breakthrough under different injection-production modes

加,到接近顶部时迅速上升,高注高采呈相反规律(图6)。综上,底注高采采油井各位置的突破时间最为均衡,波及效果最好。

注采井平均高度越高,最早突破位置越接近采油井的顶部(图7)。

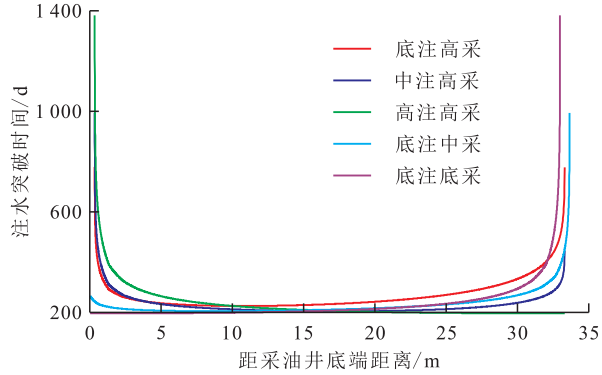


图6 采油井不同位置的注水突破时间  
Fig.6 Water breakthrough time at different producer locations

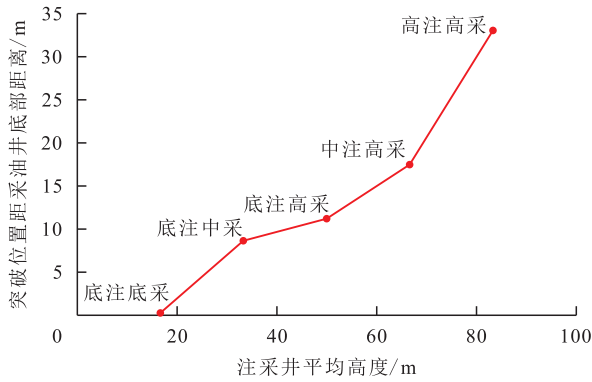


图7 采油井突破位置与注采井平均高度的关系  
Fig.7 Relationships between water breakthrough location at producer and average height of injectors and producers

### 3.3 不同采油井打开厚度

研究底注高采模式下采油井的打开厚度对波及特征的影响。注水井保持打开底部1/3地层,采油井顶部保持位于地层顶部。由图8可见,随着打开厚度的增加,最早突破流线向地层底部偏移,对应的注水井位置和采油井位置均下降。当采油井打开全部地层时,最早突破流线位于地层底部。由图9可见,底注高采模式下,采油井打开厚度越大,注水突破时间越短,但注水突破时的波及系数增大。因此,开展采油井打开厚度优化时,应综合考虑注水突破时间和波及系数2方面的因素,以优选最佳打开厚度。

## 4 结论

通过保角变换方法,将油水井同时部分打开的二维渗流过程变换为油水井全部打开的一维渗流过程,实现了不同注采模式下厚油层层内压力分布及流线分布的解析计算;利用精细数值模拟方法对本文解析方法进行了验证,结果表明,对于不同的井距/厚度比,该方法均具有较高的计算精度;对于底注高采模式,注水井顶部1/3的井段控制超过1/2的地层,使超过2/3的采油井段受效,注水井顶部为注水井的主力注入层段。注水对地层的波及主要作用于注水突破前的阶段,1.5倍注水突破时间后,注水将呈无效循环状态。

在相同的打开厚度下,底注高采的注水突破最晚、波及效率最高,底注中采、中注高采次之,高注

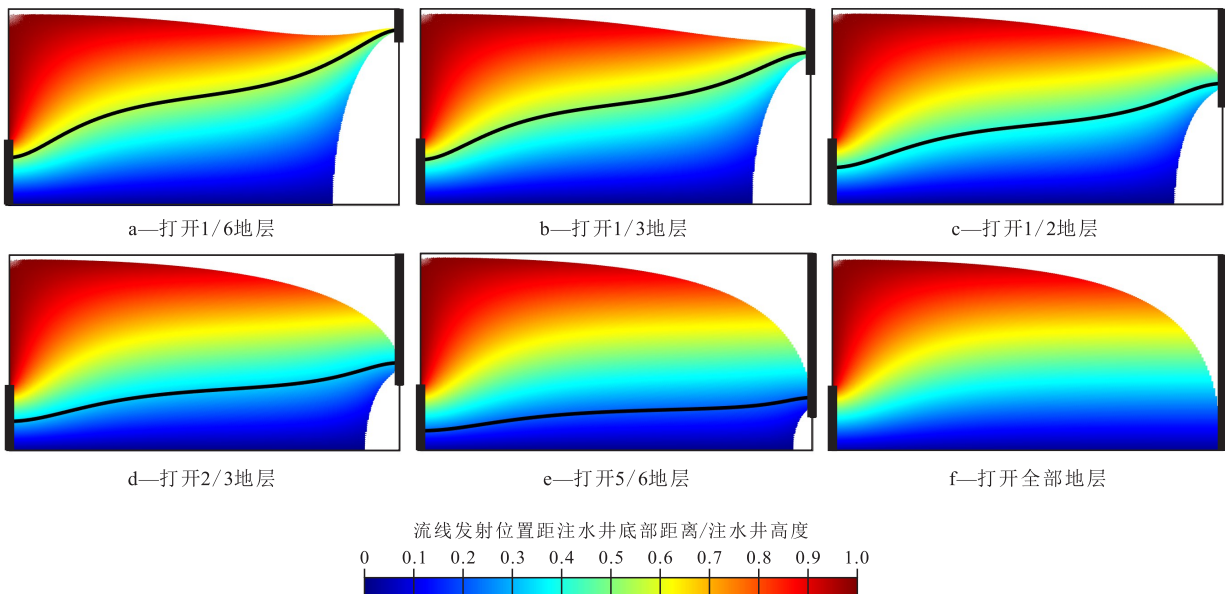


图8 底注高采模式不同采油井打开厚度下注水突破时的注水波及分布  
Fig.8 Water sweeping distribution at water breakthrough under different penetrating thicknesses of producers

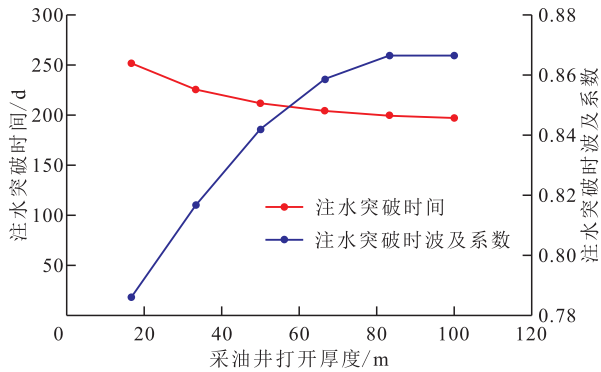


图9 底注高采模式不同采油井打开厚度下水突破时间及突破时波及系数

Fig.9 Water breakthrough time and sweep efficiency at water breakthrough under different penetrating thicknesses of producer

高采、低注底采注水突破最早、波及效率最低。对于底注高采模式,采油井打开厚度越大,注水突破时间越短,但注水突破时的波及系数增大,应综合考虑注水突破时间和波及系数2方面的因素优选最佳打开厚度。

符号解释

- $c$  —— 等势线常数;
- $d$  —— 流线常数;
- $h$  ——  $\zeta_1$ 平面的地层厚度,m;
- $i$  —— 虚数单位;
- $K$  —— 地层渗透率, $m^2$ ;
- $l$  —— 变换到圆形边界后的无因次半径;
- $l_2$  ——  $\zeta_1$ 到 $\zeta_2$ 的变换系数;
- $l_3$  ——  $\zeta_3$ 平面的裂缝半长,m;
- $l_7$  ——  $\zeta_7$ 平面的裂缝半长,m;
- $L$  ——  $\zeta_1$ 平面中的注采井距,m;
- $L_4$  ——  $\zeta_4$ 平面中的注采井距, $L_4 = \ln(2/l_3)$ ,m;
- $L_5$  ——  $\zeta_5$ 平面中的注采井距, $L_5 = L_4$ ,m;
- $L_8$  ——  $\zeta_8$ 平面中的注采井距, $L_8 = \ln(2/l_7)$ ,m;
- $p_1$  —— 注水井井底压力,MPa;
- $p_2$  —— 生产井井底压力,MPa;
- $Q$  —— 油水井产量, $m^3/d$ ;
- $r_{e2}, r_{e6}$  ——  $\zeta_2, \zeta_6$ 平面的圆形边界半径,m;
- $W$  —— 地层宽度,m;
- $x_1$  —— 平面 $\zeta_1$ 中任意一点 $x$ 坐标值,m;
- $x_{2a}$  —— 平面 $\zeta_2$ 中注水井顶部点 $x$ 坐标值,m;
- $x_{2m}$  —— 平面 $\zeta_2$ 中注水井中部某点 $x$ 坐标值,m;
- $x_{3a}$  —— 平面 $\zeta_3$ 中注水井顶部点 $x$ 坐标值,m;
- $x_{3b}$  —— 平面 $\zeta_3$ 中注水井底部点 $x$ 坐标值,m;
- $x_8$  —— 平面 $\zeta_8$ 中任意一点 $x$ 坐标值,m;
- $z_1, z_8$  —— 平面 $\zeta_1, \zeta_8$ 中任意一点 $z$ 坐标值,m;
- $z_{1a}$  —— 平面 $\zeta_1$ 中注水井顶部点 $z$ 坐标值,m;
- $z_{1b}$  —— 平面 $\zeta_1$ 中注水井底部点 $z$ 坐标值,m;

- $z_{1c}$  —— 平面 $\zeta_1$ 中生产井顶部点 $z$ 坐标值,m;
- $z_{1d}$  —— 平面 $\zeta_1$ 中生产井底部点 $z$ 坐标值,m;
- $z_{1m}$  —— 平面 $\zeta_1$ 中注水井中部某点 $z$ 坐标值,m;
- $z_{4c}$  —— 平面 $\zeta_4$ 中生产井顶部点 $z$ 坐标值,m;
- $z_{4d}$  —— 平面 $\zeta_4$ 中生产井底部点 $z$ 坐标值,m;
- $z_{5c}$  —— 平面 $\zeta_5$ 中生产井顶部点 $z$ 坐标值,m;
- $z_{5d}$  —— 平面 $\zeta_5$ 中生产井底部点 $z$ 坐标值,m;
- $z_{5m}$  —— 平面 $\zeta_5$ 中生产井中部某点 $z$ 坐标值,m;
- $\beta$  ——  $\zeta_1$ 到 $\zeta_2$ 的变换系数, $\beta = \pi/h$ ;
- $\zeta_1$  —— 初始剖面地层所处的平面;
- $\zeta_2$  —— 圆形边界偏心裂缝井地层所处的平面;
- $\zeta_{2m}$  —— 平面 $\zeta_2$ 中注水井中部某点的坐标值,m;
- $\zeta_3$  —— 单位圆形边界两分支裂缝井地层所处的平面;
- $\zeta_{3a}, \zeta_{3b}$  —— 平面 $\zeta_3$ 中注水井顶部点和底部点坐标值,m;
- $\zeta_4$  —— 左侧注水井全部打开、右侧采油井部分打开剖面地层所处的平面;
- $\zeta_5$  —— 右侧注水井全部打开、左侧采油井部分打开剖面地层所处的平面;
- $\zeta_6$  —— 变换到偏心裂缝井的平面;
- $\zeta_7$  —— 变换到同心裂缝井的平面;
- $\zeta_8$  —— 注水井、采油井全部打开剖面地层所处的平面;
- $\mu$  —— 流体黏度, $mPa \cdot s$ ;
- $\lambda_2$  ——  $\zeta_2$ 到 $\zeta_3$ 的变换系数, $\lambda_2 = \exp(\beta L)/2$ ;
- $\lambda_6$  ——  $\zeta_6$ 到 $\zeta_7$ 的变换系数, $\lambda_6 = \exp L_5/2$ ;
- $\pi$  —— 保角变换后的等效地层厚度,m。

参考文献

[1] 杨战伟,才博,胥云,等.库车山前超深厚储层缝网改造有效性评估[J].中国石油勘探,2020,25(6):105-111.  
 YANG Zhanwei, CAI Bo, XU Yun, et al. Effectiveness evaluation on network fracturing in ultra-deep and thick reservoirs in Kuqa piedmont [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25 (6): 105-111.

[2] 崔传智,韩兴源,邴绍献,等.水驱油藏高含水期耗水条带表征指标及分级方法[J].油气地质与采收率,2022,29(3):85-91.  
 CUI Chuazhi, HAN Xingyuan, BING Shaoxian, et al. Characterization indexes and grading method of water-consumption zones in waterflooding oil reservoirs during high water cut period [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29 (3): 85-91.

[3] 刘茜.厚层稠油油藏直平组合火驱机理研究与试验[J].特种油气藏,2022,29(1):128-133.  
 LIU Qian. Study and test on the mechanism of In-situ combustion with combination of vertical and horizontal wells in thick heavy oil reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(1): 128-133.

[4] 卢祥国,高建崇,何欣,等.层内非均质储层内部窜流规律实验研究——以大庆喇嘛甸油田为例[J].油气地质与采收率,2022,29(5):118-125.



- LU Xiangguo, GAO Jianchong, HE Xin, et al. Experimental study of internal channeling law of intra-layer heterogeneous reservoir: A case study of Lamadian Oilfield in Daqing [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(5): 118-125.
- [ 5 ] 张冶,程毅.大庆喇嘛甸油田聚驱后压堵驱剩余潜力挖潜可行性[J].*大庆石油地质与开发*,2022,41(6):109-116.
- ZHANG Ye, CHENG Yi. Feasibility of fracturing-plugging flooding to tap remaining potential after polymer flooding in Lamadian Oilfield in Daqing [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(6): 109-116.
- [ 6 ] 裴秀玲,李嘉琪,马旭飞,等.大庆厚油层内各结构单元分流率变化特征实验研究[J].*油气藏评价与开发*,2023,13(2):233-239.
- PEI Xiuling, LI Jiaqi, MA Xufei, et al. Experimental study on change characteristics of fractional flow rate of each structural unit in thick oil reservoir of Daqing Oilfield [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(2): 233-239.
- [ 7 ] 田鸿照.厚油层注水开发油水井射孔调整方式[J].*新疆石油天然气*,2022,18(4):52-55.
- TIAN Hongzhao. Perforation adjustment modes of oil & water wells for water flooding in thick reservoirs [J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2022, 18(4): 52-55.
- [ 8 ] 宋浩鹏.厚油层剩余油分布规律及提高采收率实验研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2018.
- SONG Haopeng. Experimental study of remaining oil distribution of thick oil reservoir and EOR strategies [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.
- [ 9 ] 夏渊. ZD厚油层水驱波及规律及改善对策研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
- XIA Yuan. Research on the law and improvement measures of water fluctuation in thick reservoirs [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [10] 张静,廖新武,闫志明.井间夹层对厚油层剩余油分布的控制机理[J].*中外能源*,2020,25(8):34-40.
- ZHANG Jing, LIAO Xinwu, YAN Zhiming. Control mechanism of interlayer between wells on remaining oil distribution in thick reservoirs [J]. *Sino-Global Energy*, 2020, 25(8): 34-40.
- [11] 孙鹏霄,闫志明.LD 10-1 油田不同韵律性厚油层剩余油富集规律[J].*中外能源*,2020,25(9):41-48.
- SUN Pengxiao, YAN Zhiming. Enrichment law of remaining oil in different rhythmic thick oil reservoirs in LD10-1 Oilfield [J]. *Sino-Global Energy*, 2020, 25(9): 41-48.
- [12] 张静,郑彬,李红英,等.厚油层注采井间注入水纵向波及程度定量研究[J].*石油钻探技术*,2022,50(2):118-125.
- ZHANG Jing, ZHENG Bin, LI Hongying, et al. Quantitative study of vertical sweep degree between injection and production wells in thick oil layers [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(2): 118-125.
- [13] 束青林.正韵律厚油层剩余油分布模式及水平井挖潜——以孤岛油田中一区Ng<sup>5</sup>层为例[J].*油气地质与采收率*,2004,11(6):34-38.
- SHU Qinglin. Distribution mode of remaining oil and trapping the potential by horizontal wells in thick positive-rhythm oil layers-taking Ng<sup>5</sup> layer in Zhong1 area of Gudao oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2004, 11(6): 34-38.
- [14] 赵思远,唐后军,肖胜东,等.低渗透油藏注水层位合理射开参数研究——以鄂尔多斯盆地张柴窑子区长6油藏为例[J].*非常规油气*,2021,8(5):106-114.
- ZHAO Siyuan, TANG Houjun, XIAO Shengdong, et al. Research on reasonable injection parameters of low permeability reservoir: A case study of Chang6 reservoir in Zhangchaiyaozi Area, Ordos Basin [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2021, 8(5): 106-114.
- [15] 翟秉怡.打开程度不完善井的压力恢复曲线研究[J].*石油钻采工艺*,1980,2(1):69-75.
- ZHAI Bingyi. Research on pressure build-up curve of wells with incomplete penetrating degree [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1980, 2(1): 69-75.
- [16] MISHRA P K, VESSELINOV V V, NEUMAN S P. Radial flow to a partially penetrating well with storage in an anisotropic confined aquifer [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 448/449: 255-259.
- [17] BRONS F, MARTING V E. The effect of restricted fluid entry on well productivity [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1961, 13(2): 172-174.
- [18] 陈济生.不完整井压力渗流问题的一种近似解[J].*水利学报*,1980,4:55-61.
- CHEN Jisheng. An approximate solution for the problem of incomplete well pressure seepage [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1980, 4: 55-61.
- [19] 沙金焯.不完整井渗流的近似计算[J].*岩土工程学报*,1985,7(5):36-48.
- SHA Jinxuan. The approximate calculation of partially penetrating well [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1985, 7(5): 36-48.
- [20] 姚约东,刘艳华.打开不完善井的合理产能评价[J].*石油钻探技术*,2010,38(2):14-18.
- YAO Yuedong, LIU Yanhua. Productivity evaluations of partial penetrating wells [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2010, 38(2): 14-18.
- [21] 张海荣,方小宇,王思洋.聚合物驱相渗曲线动态表征方法及数值模拟研究[J].*中国海上油气*,2022,34(2):93-100.
- ZHANG Hairong, FANG Xiaoyu, WANG Siyang. Dynamic characterization method and numerical simulation study of relative permeability curve of polymer flooding [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(2): 93-100.
- [22] POLLOCK D W. Semianalytical computation of path lines for finite-difference model [J]. *Ground Water*, 1988, 26(6): 743-750.
- [23] 冯高城,李金蔓,刘玉明,等.基于数据驱动的油藏流场重构方法[J].*新疆石油地质*,2023,44(5):598-607.
- FENG Gaocheng, LI Jinman, LIU Yuming, et al. A data-driven method to reconstruct reservoir flow field [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(5): 598-607.