

油藏各向异性对鱼骨井结构影响的数值模拟研究

范乐宾^{1,2}, 刘月田^{1,2}, 顾少华^{1,2}, 顾文欢^{1,2}, 廖恒杰^{1,2}, 敖 坤^{1,2}

(1. 石油工程教育部重点实验室(中国石油大学), 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 石油工程学院, 北京 102249)

摘 要:鱼骨井由于能增加泄油面积而提高油井产能,因此在油气田开发中得到了越来越广泛的应用。由于油藏各向异性对鱼骨井结构的影响规律非常复杂,常规求解鱼骨井产能的解析方法中很少考虑油藏各向异性的影响。为此,采用将各向异性地层中鱼骨井等价到各向同性地层中的方法,建立了鱼骨井在平面各向异性地层中的结构变化模型。并据此讨论了两种特殊情况下,各向异性强度对鱼骨井结构的影响规律:鱼骨井主井筒与最大渗透率方向平行时,主井筒长度最小,分支角之和最大;鱼骨井主井筒与最大渗透率方向垂直时,主井筒长度最大,分支角之和最小;各向异性强度越大,对于鱼骨井长度越有利,但对鱼骨井分支角之和的不利空间区域越大;分支角越小,各向异性对鱼骨井长度的影响越大。

关键词:鱼骨井 非均质油藏 各向异性 渗透率 数学模型

中图分类号:TE312 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)05-0068-06

Numerical Study of the Effect of Reservoir Anisotropy on Fishbone Well Structure

Fan Lebin^{1,2}, Liu Yuetian^{1,2}, Gu Shaohua^{1,2}, Gu Wenhuan^{1,2}, Liao Hengjie^{1,2}, Ao Kun^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory for Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China)

Abstract: Fishbone wells have been widely used in oil and gas development because they can increase the drainage area and improve well productivity. The analytical method to calculate the productivity of fishbone well seldom considers the effect of reservoir anisotropy due to its complexity. Using the method of fishbone well in anisotropic formation which is equivalent to that in isotropic formation, a fishbone well structural model has been established for the isotropic formations. Two special cases the wellbore direction parallel and perpendicular to the direction of maximum permeability were discussed. The effect of anisotropy on fishbone well was analyzed. The results show that when fishbone well is parallel to the direction of maximum permeability, the wellbore length is the smallest and the summation of branch angles is the largest; when it is perpendicular to the direction of maximum permeability, the wellbore length is the largest and the summation of branch angles is the smallest. The length of fishbone well is longer with greater anisotropy, while the unfavorable region to branch angle will be larger. The effect of anisotropy on wellbore length is higher with smaller branch angle.

Key words: fishbone well; heterogeneous reservoir; anisotropy; permeability; mathematical model

鱼骨井的开发效果不但受其自身结构特征影响,而且受地质特征的影响。鱼骨井的结构因素包括鱼骨井分支的对称性、弯曲性、主井段长度、分支长度和分支位置等。这些因素对开发效果的影响在文献[1-4]中已经讨论过,但这些讨论都是假设鱼骨井在各向同性油藏中,而现实中的油藏由于沉积作用、裂缝和地应力的影响而具有各向异性,因此研究鱼骨井在各向异性油藏中的开发特征具有重要意义。关于各向异性油藏前人已经进行了大量的研究,油藏的各向异性对渗流过程中流场和压力场影响巨大,对直井和水平井开发井网开发效果的影响

显著^[5-7]。同样,由于鱼骨井自身结构的复杂性,在开发过程中,地层各向异性的影响首先体现于对鱼骨井各个参数的改变。由于各向异性对鱼骨井结构

收稿日期:2010-04-29; **改回日期:**2011-06-23。

作者简介:范乐宾(1984—),男,河北邢台人,2008年毕业于大庆石油学院石油工程专业,在读硕士研究生。

联系方式:(010)89732260, fanlebin@126.com。

基金项目:国家科技重大专项之课题“复杂油气田地质与提高采收率技术”(编号:2009ZX05009)部分研究内容。

网络出版时间:2011-09-20T17:08:00。

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1763.TE.20110920.1708.003.html>。

的影响规律非常复杂,在现有求解鱼骨井产能的解析方法中,很少考虑地层各向异性的影响^[8-13]。因此,笔者采用将鱼骨井等价到各向同性介质中的方法,分析了各向异性对鱼骨井结构的影响规律,对采用鱼骨井开发各向异性油藏具有一定的指导作用。

1 理论基础

各向异性油藏是渗透率具有方向性的油藏^[6],其方向性表现为:在地层中同一点上,流体向某一个方向流动的渗透率比其他方向大,而在与该方向垂直方向上的渗透率最小。在平面直角坐标系 xOy 中,各向异性地层渗透率张量形式为:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \mathbf{K} 为各向异性地层渗透率张量; K_x, K_y 分别为各向异性地层 x 轴和 y 轴方向上的渗透率。

当 $K_x > K_y$ 时,说明在各向异性地层中最大渗透率和最小渗透率分别为 K_x 和 K_y ,并记 $\beta = \sqrt{K_x/K_y}$ 。

在研究各向异性地层中的渗流问题时,经常将各向异性介质转化为渗透率 $K = \sqrt{K_x K_y}$ 的各向同性介质。随着地层介质的变化,在其中的鱼骨井形状也会随着改变,因此在各向异性地层中求解鱼骨井产能时,不能简单地只对各向异性介质进行转化,同时要考虑到对鱼骨井自身结构的影响。

2 鱼骨井结构模型的建立

为了分析鱼骨井在各向异性油藏中的普遍规律,首先建立鱼骨井的数学模型。假设鱼骨井位于各向异性油藏中的任意位置,鱼骨井主井筒与最大主应力方向夹角为 α ,分支井与主井筒的夹角为 θ ,如图 1 所示。

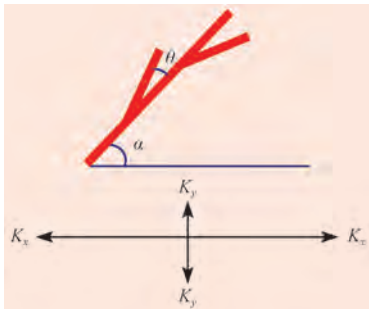


图 1 鱼骨井在各向异性油藏中的位置

Fig. 1 The position of fishbone well in the anisotropic reservoir

2.1 主井筒长度

当各向异性油藏等价转化到各向同性油藏中时,鱼骨井主井筒长度为:

$$L' = L \sqrt{\cos^2 \alpha / \beta + \beta \sin^2 \alpha} \quad (2)$$

式中: L' 为各向异性油藏鱼骨井转化到各向同性油藏中时的主井筒长度; $m; L$ 为各向异性油藏鱼骨井主井筒长度; $m; \alpha$ 为鱼骨井主井筒与最大主应力方向的夹角,rad。

主井筒长度同时受主井筒与最大主应力方向夹角 α 和各向异性强度 β 的影响,即当鱼骨井主井筒与最大主应力方向夹角不同时,或者在不同各向异性强度 β 下,主井筒的开发效果不同。

设 β 为一定值,对 L' 求导,令其导数等于零可求得鱼骨井主井筒长度处于两个极限值时,主井筒与最大主应力方向的夹角。

2.2 分支段长度

当各向异性油藏等价转化到各向同性油藏中时,主井筒两侧的分支将产生不同的变化,因此对两侧的分支段分别进行讨论。

主井筒左侧分支长度为:

$$l'_1 = l_1 \sqrt{\cos^2(\alpha + \theta_1) / \beta + \beta \sin^2(\alpha + \theta_1)} \quad (3)$$

式中: l'_1 为各向异性油藏鱼骨井转化到各向同性油藏中时主井筒左侧分支的长度; $m; l_1$ 为各向异性油藏鱼骨井主井筒左侧分支的长度; $m; \theta_1$ 为左侧分支与主井筒的夹角,rad。

主井筒右侧分支长度为:

$$l'_2 = l_2 \sqrt{\cos^2(\alpha - \theta_2) / \beta + \beta \sin^2(\alpha - \theta_2)} \quad (4)$$

式中: l'_2 为各向异性油藏鱼骨井转化到各向同性油藏中时主井筒右侧分支的长度; $m; l_2$ 为各向异性油藏鱼骨井主井筒右侧分支的长度; $m; \theta_2$ 为右侧分支与主井筒的夹角,rad。

当将鱼骨井等效到各向同性地层中时,分支段长度同时受主井筒与最大主应力夹角 α 、分支与主井筒夹角 θ 和各向异性强度 β 的影响。

2.3 分支角

当各向异性油藏等价转化到各向同性油藏中时,主井筒两侧的分支角将产生不同的变化,因此对两侧分别进行讨论。

当 $\alpha + \theta > \pi/2$ 且 $\alpha \leq \pi/2$ 时,或当 $\alpha + \theta > 3\pi/2$ 且 $\alpha \leq 3\pi/2$ 时,主井筒左侧分支角为:

$$\theta'_1 = \pi + \arctan[\beta \tan(\alpha + \theta)] - \arctan(\beta \tan \alpha) \quad (5)$$

否则主井筒左侧分支角为:

$$\theta'_1 = \arctan[\beta \tan(\alpha + \theta)] - \arctan(\beta \tan \alpha) \quad (6)$$

当 $\alpha - \theta < \pi/2$ 且 $\alpha > \pi/2$ 时, 或当 $\alpha - \theta < 3\pi/2$ 且 $\alpha > 3\pi/2$ 时, 主井筒右侧分支角为:

$$\theta'_2 = \pi + \arctan(\beta \tan \alpha) - \arctan[\beta \tan(\alpha - \theta)] \quad (7)$$

否则, 主井筒右侧分支角为:

$$\theta'_2 = \arctan(\beta \tan \alpha) - \arctan[\beta \tan(\alpha - \theta)] \quad (8)$$

设主井筒两侧分支角之和为 $\theta_{\text{总}}$, 则 $\theta_{\text{总}} = \theta'_1 + \theta'_2$, 设各向异性强度 β 为定值, 对其求导可求得两分支角之和处于两个极限值时, 主井筒与最大主应力方向的夹角。

3 两种特殊情况的讨论

根据鱼骨井主井筒和分支角的两个极值分别进行讨论。

3.1 情况一

主井筒与最大渗透率方向平行, 两侧的分支段长度相同, 与主井筒夹角相同, 鱼骨井位置如图 2 所示。

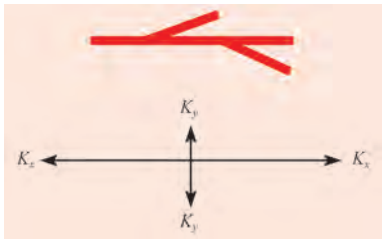


图 2 鱼骨井主井筒与最大渗透率方向平行

Fig. 2 Fishbone well parallel to the direction of maximum permeability

将该位置鱼骨井由各向异性地层等价转换到各向同性地层时, 鱼骨井主井筒长度为:

$$L' = L \sqrt{\frac{K_y}{K}} \quad (9)$$

在这种情况下, $L' < L$, 因此该位置是主井筒长度最小的位置, 即由于各向异性的影响, 等效到各向同性地层中时, 主井筒的实际长度减小到最小, 因此对于鱼骨井的开发效果是不利的。

由于两个分支的长度相同, 且与主井筒的夹角相同, 因此等价到各向同性地层时, $l'_1 = l'_2 = l'$ 。

$$l' = l \sqrt{\cos^2 \theta / \beta + \beta \sin^2 \theta} \quad (10)$$

当分支段等效到各向同性地层中时, 在 β 一定的情况下分支段长度 l' 随 θ 变化而改变。

两分支段与主井筒的夹角相同, 等价到各向同

性地层时, $\theta'_1 = \theta'_2 = \theta'$ 。

$$\theta' = \arctan(\beta \tan \theta) \quad (11)$$

两侧分支角度之和为:

$$\theta_{\text{总}} = 2 \arctan(\beta \tan \theta) \quad (12)$$

由于 $\beta > 1$, 因此可知 $\theta' > \theta$, 即在这种情况下, 当鱼骨井等效到各向同性地层时, 将使鱼骨井分支与主井筒夹角增大, 此时的两侧分支角度之和达到最大, 因此对鱼骨井的开发效果有利。

3.2 情况二

鱼骨井主井筒与最大渗透率方向垂直, 两侧分支段长度相同, 两侧分支与主井筒夹角相同, 其位置如图 3 所示。

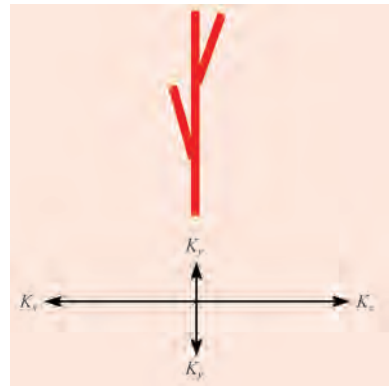


图 3 鱼骨井主井筒与最大渗透率方向垂直

Fig. 3 Fishbone well perpendicular to the direction of maximum permeability

将该位置鱼骨井由各向异性地层等价转换到各向同性地层时, 鱼骨井主井筒长度为:

$$L' = L \sqrt{\frac{K_x}{K}} \quad (13)$$

显然 $L' > L$, 因此该位置是主井筒长度最大的位置, 即由于各向异性的影响, 主井筒等效到各向同性地层中时长度增大到最大, 对鱼骨井开发效果起有利作用。

由于两个分支的长度相同, 且与主井筒的夹角相同, 因此等价到各向同性地层时, $l'_1 = l'_2 = l'$ 。

$$l' = l \sqrt{\sin^2 \theta / \beta + \beta \cos^2 \theta} \quad (14)$$

当分支段等效到各向同性地层中时, 在 β 一定的情况下分支段长度 l' 由 θ 来确定。

分支段与主井筒夹角相同, 等价到各向同性地层时, $\theta'_1 = \theta'_2 = \theta'$ 。

$$\theta' = \text{arccot}(\beta \cot \theta) \quad (15)$$

两侧分支角度之和为:

$$\theta_{\text{总}} = 2 \text{arccot}(\beta \cot \theta) \quad (16)$$

由于 $\beta > 1$, 因此可知 $\theta' < \theta$, 即在这种情况下, 当鱼骨井等效到各向同性地层时, 将使鱼骨井分支段与主井筒夹角减小, 此时两侧分支角之和最小, 因此对鱼骨井的开发效果起不利作用。

由以上分析可知, 当鱼骨井主井筒与最大渗透率方向平行或垂直时, 各有利弊, 因此对于采用鱼骨井开发各向异性油藏是多是坏需要根据实际情况判断。

4 几何临界位置的确定

4.1 长度临界位置的确定

根据式(2)及以上讨论可以看出, 各向异性对水平段长度既有有利影响又有不利影响, 而这种影响和方位角 α 有直接关系, 当方位角处于某个值时 $L' = L$, 即水平段长度等效到各向同性地层时将不变, 此方位角 α 为:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arccos \frac{K_x + K_y - 2\sqrt{K_x K_y}}{K_x - K_y} \quad (17)$$

4.2 分支角临界位置的确定

同样, 各向异性对分支角的影响既有有利作用(即将其等效时使其扩大), 又有不利作用(即等效时使其缩小)。这取决于鱼骨井的方位, 当 $\theta' = \theta$ 时, 此时 α 是鱼骨井分支角两种效果的分界线, 求得这个角度对于研究鱼骨井至关重要。

鱼骨井两侧分支角之和的临界位置为:

$$\theta_{\text{总}} = \theta'_1 + \theta'_2 = 2\theta \quad (18)$$

此时,

$$\tan(\alpha + \theta) \tan(\alpha - \theta) = \frac{1}{\beta} \quad (\beta \neq 1, \text{即 } K_x \neq K_y) \quad (19)$$

由式(19)可知, 分支角临界位置取决于各向异性强度的大小。

5 各向异性对鱼骨井结构的影响规律

5.1 各向异性强度对总长度的影响

鱼骨井总长度为:

$$L'_{\text{总}} = L' + l'_1 + l'_2 \quad (20)$$

设鱼骨井主井筒 $L = 300$ m, 左右两侧分支段长度 $l_1 = l_2 = 100$ m, 两分支段与主井筒夹角 $\theta = 30^\circ$,

求取不同各向异性强度下的鱼骨井总长度随鱼骨井方位角的变化, 结果见图 4。

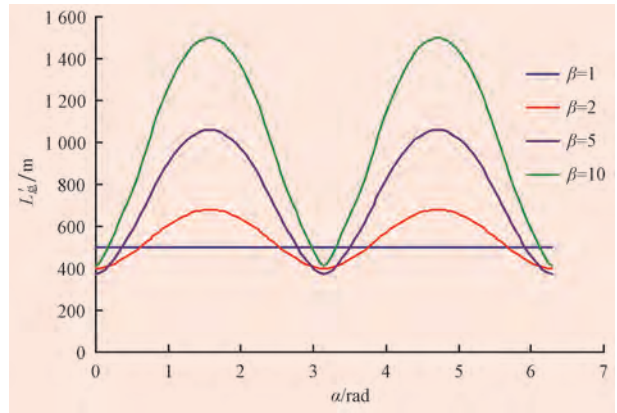


图 4 在不同各向异性强度下鱼骨井总长度随方位角的变化曲线

Fig. 4 The variation of fishbone well length with the change of azimuth in different degree of anisotropy

从图 4 可看出: 当鱼骨井主井筒与最大渗透率方向垂直时, 鱼骨井总长度在等效到各向同性地层时最大; 当鱼骨井主井筒平行于最大渗透率方向时, 鱼骨井总长度等效到各向同性地层时最小; 当各向异性强度越大, 鱼骨井长度的最大值将变得非常大, 且会是其原长度的好几倍, 但对最小值影响不大; 鱼骨井在各向异性地层中的大部分方位都会对其总长度起扩大作用而对鱼骨井总长度起缩小作用的区间却很小, 且对鱼骨井总长度的影响不是很大。

5.2 总长度随分支角的变化

假设主井筒 $L = 300$ m, 各分支段长度 $l_1 = l_2 = 100$ m, 地层各向异性强度 $\beta = 2$, 求取不同分支角下的鱼骨井总长度随鱼骨井方位角的变化, 结果见图 5。

从图 5 可看出: 当鱼骨井主井筒平行于最小渗透率方向时, 鱼骨井总长度达到最大; 当垂直于最小渗透率方向时, 鱼骨井总长度最小; 当分支角为 90° 时可以发现, 在一个周期内, 鱼骨井总长度会出现两个最大值, 其主要原因是由于当分支角很大时, 分支段对鱼骨井长度的影响也会起到一定作用。从图 5 还可看出, 当分支角越小时, 鱼骨井在各向异性地层中的位置变化对鱼骨井总长度的影响越大, 而当分支角越大时, 曲线变化幅度越平缓, 且当分支角越大时鱼骨井总长大于 500 m 的区间越大, 当分支角为 90° 时在各向异性油藏中鱼骨井总长度几乎在任何位置都是增大的。

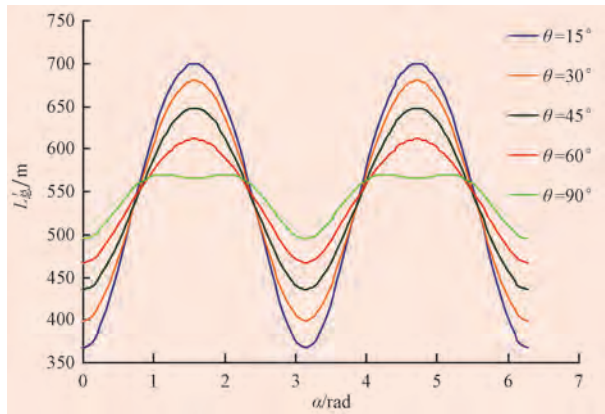


图 5 在不同分支角下鱼骨井总长度随方位角的变化曲线
Fig. 5 The variation of fishbone well length with the change of azimuth in different branch angles

5.3 各向异性强度对分支角的影响

假设鱼骨井主井筒长度 $L=300$ m, 各分支段长度 $l_1=l_2=100$ m, 分支角 $\theta=30^\circ$, 求取不同各向异性强度下分支角之和随鱼骨井方位角的变化, 结果见图 6。

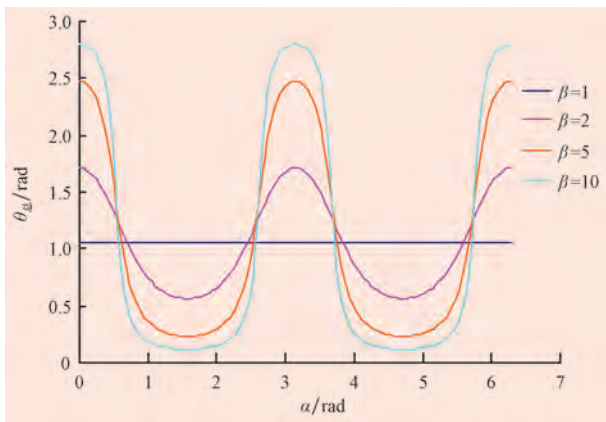


图 6 在不同各向异性强度下分支角之和随方位角的变化曲线
Fig. 6 The variation of summation of branch angles with the change of azimuth in different degree of anisotropy

从图 6 可看出, 当鱼骨井主井筒与最大渗透率方向平行时, 分支角之和达到最大, 但当各向异性强度很大时, 分支角之和增大的范围很小, 而在各向异性地层中鱼骨井在大部分区间都将对分支角之和起缩小作用, 与各向异性对鱼骨井总长度的影响相反。

5.4 不同分支角对分支角之和的影响规律

假设鱼骨井主井筒 $L=300$ m, 分支长度 $l_1=l_2=100$ m, 地层各向异性强度 $\beta=2$, 求取不同分支角条件下分支角之和随鱼骨井方位角的变化, 结果见图 7。

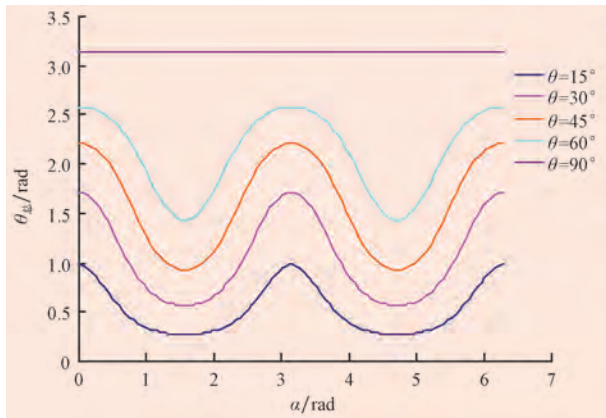


图 7 不同分支角下左右分支角度之和随鱼骨井方位角的变化曲线
Fig. 7 The variation of summation of branch angles with the change of azimuth

从图 7 可以看出: 几条曲线形状类似, 相互平行, 当分支角为 90° 时, 分支角之和不变; 当鱼骨井主井筒与最大渗透率方向平行时, 两分支角之和最大, 当鱼骨井主井筒与最小渗透率方向平行时, 两分支角之和最小。

6 实际油藏布井模拟

静安堡潜山静 52 块油藏位于辽宁省新民市兴隆堡镇, 构造上位于大民屯凹陷中央潜山带的中部, 为断层控制的潜山圈闭, 潜山顶面最小埋深 2 500 m。储层为太古界变质岩, 储集类型为微裂缝和基质孔隙, 基岩孔隙度 3.6%, 渗透率 $1 \mu\text{m}^2$ 。油层底界为 -29 00 m, 含油厚度 400 m, 属基岩断裂带裂缝性块状潜山油藏。该潜山构造裂缝发育有三组: 一组为北北西、北西向, 另一组为近东西向, 第三组为北东向, 储层具有各向异性特征。

采用鱼骨井开发该油藏, 鱼骨井参数为: 主井筒长度为 300 m, 分支段长度为 100 m, 分支角为 30° 。其中方案一设计鱼骨井与裂缝方向垂直, 方案二设计鱼骨井与裂缝方向平行, 方案三首先将地层等价转化为各向同性地层, 再布置一口同样参数的鱼骨井。

运用 Eclipse 油藏数值模拟软件建立静 52 块油藏数值模拟模型, 该模型最大渗透率方向与裂缝发育方向一致。按照方案一和方案二建立两个数值模拟模型, 通过等价转换将原模型等价转换到各向同性地层中, 在此模型中布置一口同样参数的鱼骨井。通过数值模拟计算得到了 3 个方案的累积产油变化, 绘制成累积产油变化曲线, 如图 8 所示。

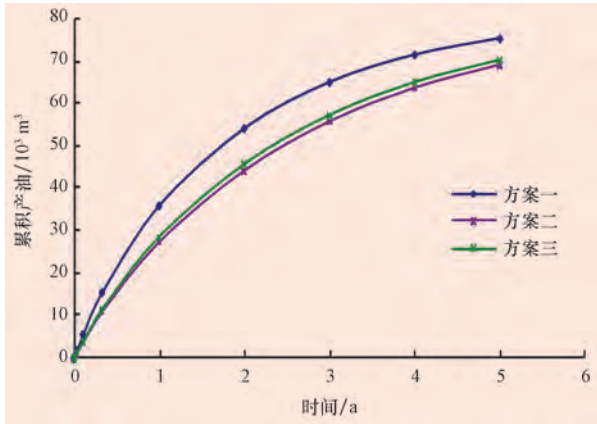


图8 静52块油藏三种方案开发累积产油对比曲线

Fig. 8 The comparison of three development plans in Jing52 reservoir

从图8可看出,5 a后方案一累积产油 75 239.74 m³,方案二累积产油为 69 117.23 m³,方案三累积产油 70 276.27 m³。由此可看出,方案一的开发效果好于方案二的开发效果,同时好于等价同性油藏中同参数鱼骨井的开发效果。

7 结 论

1) 在各向异性理论的基础上,建立了各向异性油藏中鱼骨井的数学模型,并在该模型基础上讨论了两种特殊情况下鱼骨井的变化。当鱼骨井主井筒与最大渗透率方向平行时,主井筒长度最小,分支角之和最大;当鱼骨井主井筒与最大渗透率方向垂直时,主井筒长度最大,分支角之和最小。

2) 在数学模型的基础上,推导出确定鱼骨井水平井段临界方位角和临界主井筒两侧分支角之和的计算公式。

3) 各向异性强度越大,对于鱼骨井长度越有利;分支角越小,各向异性对鱼骨井长度影响越大。各向异性强度越大,对鱼骨井分支角不利的空间区域越大;不同鱼骨井分支角在各向异性地层中的变化曲线相类似。

4) 运用油藏各向异性对鱼骨井的影响规律,结合油藏数值模拟可以优选采用鱼骨井开发各向性油藏的方案。

参 考 文 献

[1] 汪志明,张磊敏,魏建光,等. 分支参数对多分支井入流及产能的影响规律研究[J]. 石油钻探技术,2009,37(3):83-87.
Wang Zhiming, Zhang Leimin, Wei Jianguang, et al. The effect of branch parameters on inflow performance and productivity

on multilateral wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(3):83-87.

[2] Holmes J A, Barkve T, Lund O. Application of a multisegment well model to simulate flow in advanced wells[R]. SPE 50646, 1998.

[3] 韩国庆,毛凤英,吴晓东,等. 非对称鱼骨状分支井形态优化模型[J]. 石油学报,2009,30(1):92-95.
Han Guoqing, Mao Fengying, Wu Xiaodong, et al. Optimization model for configuration of laterals in asymmetrical herringbone well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1):92-95.

[4] 范玉平,韩国庆,杨长春. 鱼骨井产能预测及分支井形态优化[J]. 石油学报,2006,27(4):101-104.
Fan Yuping, Han Guoqing, Yang Changchun. Production forecast for herringbone well and optimum configuration of lateral holes[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4):101-104.

[5] 刘月田. 各向异性油藏注水开发井理论与方法[J]. 石油勘探与开发,2005,32(5):101-104.
Liu Yuetian. Well location in water-flooding anisotropic oil reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5):101-104.

[6] 刘月田. 各向异性油藏水平井开发井网设计方法[J]. 石油勘探与开发,2008,35(5):619-624.
Liu Yuetian. Methodology for horizontal well pattern design in anisotropic oil reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5):619-624.

[7] 刘月田,周飞,张赞新. 特低丰度油层沉积相分布对水平井网开发效果的影响[J]. 大庆石油地质与开发,2008,27(2):80-83.
Liu Yuetian, Zhou Fei, Zhang Yunxin. Effect of sedimentary facies distribution of special low abundance oil layer on horizontal well pattern development[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(2):80-83.

[8] 李春兰,程林松,孙福街. 鱼骨型水平井产能计算公式推导[J]. 西南石油学院学报,2005,27(6):36-37.
Li Chunlan, Cheng Linsong, Sun Fujie. Derivation of productivity formulae of a fishbone well[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27(6):36-37.

[9] 程林松,李春兰,郎兆新,等. 分支水平井产能的研究[J]. 石油学报,1995,16(2):49-55.
Cheng Linsong, Li Chunlan, Lang Zhaoxin, et al. The productivity study of branch a horizontal well with multiple branched wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(2):49-55.

[10] 刘想平,张兆顺,崔桂香,等. 鱼骨型多分支井向井流动态关系[J]. 石油学报,2000,21(6):57-60.
Liu Xiangping, Zhang Zhaozhun, Cui Guixiang, et al. Inflow performance relationship of a herringbone multilateral well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(6):57-60.

[11] 陈卫东, Hill A D. 多分支井产能预测方法[J]. 中国海上油气,2006,18(6):394-398.
Chen Weidong, Hill A D. Development of multilateral well deliverability model[J]. China Offshore Oil and Gas, 2006, 18(6):394-398.

[12] 郑毅,黄伟和,鲜保安. 国外分支井技术发展综述[J]. 石油钻探技术,1997,25(4):52-55.
Zheng Yi, Huang Weihe, Xian Baoan. Foreign branch wells technology development review[J]. Petroleum Drilling Techniques, 1997, 25(4):52-55.

[13] 张利军,程时清. 分支水平井试井压力分析[J]. 石油钻探技术,2009,37(1):23-28.
Zhang Lijun, Cheng Shiqing. Well test pressure analysis on multilateral horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(1):23-28.