

# 特低渗透各向异性油藏平面波及系数计算方法

何聪鸽<sup>1</sup>, 范子菲<sup>1</sup>, 方思冬<sup>2</sup>, 许安著<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

**摘要:** 特低渗透油藏常表现出非达西渗流和渗透率各向异性的特征, 为了解决特低渗透各向异性油藏水驱平面波及系数的理论计算问题, 通过构建考虑启动压力梯度的非达西流管模型, 利用坐标变化将渗透率各向异性油藏转化为等效各向同性油藏, 推导了特低渗透各向异性油藏五点井网油井见水时间和平面波及系数的计算公式。该方法可用于定量表征特低渗透各向异性油藏水驱平面动用程度, 为特低渗透各向异性油藏开发设计和评价提供理论依据。以鄂尔多斯盆地某特低渗透各向异性油藏为例, 利用该方法分析了启动压力梯度、渗透率各向异性系数和注采参数对特低渗透各向异性油藏平面波及系数的影响, 结果表明, 当油藏渗透率各向异性较强时, 注入水沿主渗透率方向快速突进, 导致平面波及程度低, 可通过优化井排距、增大注采压差或者井网加密的方式, 减小死油区, 以提高注入水的波及程度。

**关键词:** 特低渗透油藏 渗透率各向异性 五点井网 启动压力梯度 平面波及系数

中图分类号: TE348

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2015)03-0077-07

## Calculation of areal sweep efficiency for extra-low permeability anisotropy reservoir

He Congge<sup>1</sup>, Fan Zifei<sup>1</sup>, Fang Sidong<sup>2</sup>, Xu Anzhu<sup>1</sup>

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

2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China)

**Abstract:** Non-Darcy flow and permeability anisotropy are the essential characteristics of the extra-low permeability reservoir. In order to solve the theoretical calculation problem of areal sweep efficiency for the extra-low permeability anisotropy reservoir, non-Darcy stream tube model was built taking the threshold pressure gradient into account, and the areal sweep efficiency formula and water breakthrough time formula of five-spot well pattern were derived by using of coordinate transformation method to change anisotropy reservoir into an equivalent isotropy reservoir. This method can be used to quantitatively characterize the produced degree of the extra-low permeability anisotropy reservoir by water flooding, and provide theory basis for development and evaluation of the extra-low permeability anisotropy reservoir. Taking an extra-low permeability anisotropy reservoir of Ordos Basin as an example, we analyzed the effect of threshold pressure gradient, permeability anisotropy, well spacing and pressure difference on areal sweep efficiency with this method. The case study shows that when the permeability anisotropy degree is strong, the injected water will preferentially flow along the high permeability direction resulting in the unbalanced development. The adjustment of well spacing and row spacing, the rise of pressure difference and well pattern infilling are effective measures to decrease the dead-oil zone and to increase water flooding swept area.

**Key words:** extra-low permeability reservoir; permeability anisotropy; five-spot well pattern; threshold pressure gradient; areal sweep efficiency

鄂尔多斯盆地发育大量三叠系延长组油层, 并且主要为低渗透、特低渗透甚至超低渗透大型岩性油藏<sup>[1-7]</sup>。目前, 鄂尔多斯盆地中越来越多的特低渗透油藏投入开发, 且大部分特低渗透油藏采用面积

收稿日期: 2015-03-02。

作者简介: 何聪鸽(1988—), 男, 湖南邵阳人, 在读博士研究生, 从事渗流力学及油藏工程方面的研究。联系电话: 15210760693, E-mail: hecongge1988@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05044)。

井网注水开发技术,如何准确计算水驱平面波及系数是评价特低渗透油藏水驱开发效果的难点问题。

一方面,大量实验结果表明特低渗透油藏中流体存在启动压力梯度,其渗流规律不再符合线性达西定律,表现出低速非达西渗流特征<sup>[8-13]</sup>。另一方面,特低渗透储层常发育天然微裂缝,油藏具有较强的方向性,表现为渗透率各向异性<sup>[14-15]</sup>,在注水过程中天然裂缝张开,注入流体沿着高渗透率方向优先推进,不同方向上的波及程度差别较大。因此,在计算特低渗透油藏水驱平面波及系数时须考虑非达西渗流特征和渗透率各向异性。

前人对水驱平面波及系数进行了广泛研究。张丽华等运用数值模拟的方法计算油藏水驱波及系数<sup>[16-18]</sup>,范江等运用概率论和量纲分析方法建立了非均质油层波及系数计算模型<sup>[19]</sup>,但是这些方法均未在数学理论上解决面积波及系数的计算问题。计秉玉等运用流管法推导了低渗透油藏非达西渗流面积井网产油量计算公式,并且提出了启动角和启动系数的概念<sup>[20]</sup>;在此基础上,郭粉转等推导了考虑启动压力梯度的四点井网、五点井网、反九点井网和菱形反九点井网平面波及系数计算公式<sup>[21-24]</sup>;齐亚东等运用流管积分法,推导了特低渗透油藏三角形井网平面波及系数计算公式<sup>[25-26]</sup>;周瀛等在流管模型和 Bechley-Leverett 方程的基础上,推导了考虑启动压力梯度的排状交错水平井面积波及系数计算公式<sup>[27]</sup>,这些计算公式解决了不同面积井网在考虑非达西渗流特征下的平面波及系数计算问题,但是并未考虑渗透率各向异性的影响,因此不能直接用于评价特低渗透各向异性油藏水驱平面波及程度。为此,针对特低渗透油藏的非达西渗流及渗透率各向异性特征,首先通过坐标变换将渗透率各向异性转化为各向同性,再运用流管积分法,推导五点井网油井见水时间和平面波及系数计算公式,并利用鄂尔多斯盆地某特低渗透油藏的实际数据进行计算,分析了启动压力梯度、渗透率各向异性系数和注采参数对油藏平面波及系数的影响。

## 1 各向异性油藏的处理方法

### 1.1 考虑启动压力梯度的渗流方程

目前特低渗透油藏渗流模型主要包括拟启动压力梯度模型、分段模型和连续模型,基于拟启动压力梯度模型相关理论较为成熟,笔者采用该模型作为特低渗透油藏的渗流模型,其表达式<sup>[13]</sup>为

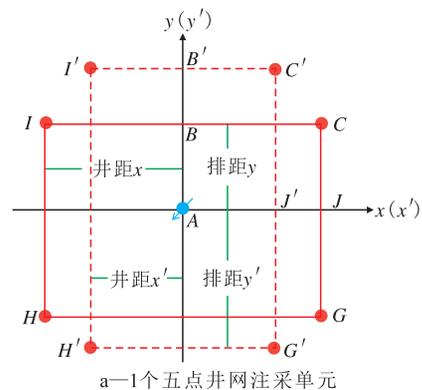
$$q = -\frac{KA\nabla p}{\mu} \left( 1 - \frac{\lambda}{|\nabla p|} \right) \quad (1)$$

### 1.2 各向异性油藏的坐标转化

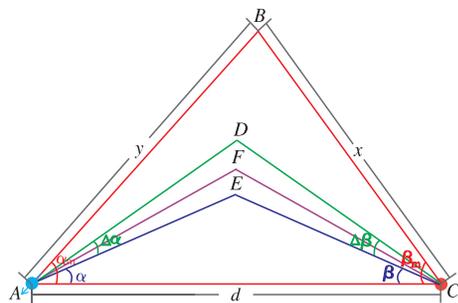
根据渗透率各向异性油藏的基本特点,通过坐标变换<sup>[15]</sup>,将原来渗流空间里以  $K_x$  和  $K_y$  为渗透率主值的各向异性油藏转化为以  $K$  为渗透率的等效各向同性油藏,变换式为

$$\begin{cases} x = x' \sqrt{\frac{K}{K_x}} \\ y = y' \sqrt{\frac{K}{K_y}} \\ K = \sqrt{K_x K_y} \end{cases} \quad (2)$$

假设五点井网井排方向与渗透率主值方向平行或垂直,则各向异性渗流空间里的五点井网  $C'I'H'G'$  (井排距分别为  $2x'$  和  $y'$ ) 可转化成井排距分别为  $2x$  和  $y$  的等效五点井网  $CIHG$  (图 1a)。



a—1个五点井网注采单元



b—1个五点井网1/8注采单元

图1 五点井网渗流单元划分示意

Fig.1 Division of flow unit in the five-spot well pattern

## 2 平面波及系数的推导

在等效各向同性油藏中,1个五点井网  $CIHG$  的  $1/4$  部分可以划分为2个对称的渗流单元(图 1a),在渗流单元  $\triangle ABC$  中(图 1b),  $A$  为注水井,  $C$  为生产井,且  $\overline{BC} = x$ ,  $\overline{AB} = y$ ,  $\overline{AC} = d$ ,  $\angle BAC$  为  $\alpha_m$ ,  $\angle BCA$  为  $\beta_m$ 。假设注水井与生产井之间由流管组成,取四边形流管微元  $DAEC$ ,  $\angle DAE$  为  $\Delta\alpha$ ,  $\angle DCE$  为  $\Delta\beta$ ,  $\angle EAC$

为 $\alpha$ ,  $\angle ECA$ 为 $\beta$ , 渗流单元 $\triangle ABC$ 内的角度满足的几何关系<sup>[20]</sup>为

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha} = \frac{\beta_m}{\alpha_m} \quad (3)$$

在流管上任意点 $\xi$ 处, 流管的截面积为

$$A(\xi) = \begin{cases} 2h\xi \tan \frac{\Delta\alpha}{2} & 0 \leq \xi \leq \frac{d \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \\ 2h \left[ \frac{d(\sin \alpha + \sin \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} - \xi \right] \tan \frac{\Delta\beta}{2} & \frac{d \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \leq \xi \leq \frac{d(\sin \alpha + \sin \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \end{cases} \quad (4)$$

根据式(1)和油水连续性方程, 可得截面处的流量<sup>[21]</sup>和水驱前缘位置<sup>[22]</sup>的表达式分别为

$$\Delta q = \frac{Kh}{\mu} (p_i - p_w - \lambda L) \int_0^L \frac{1}{A(\xi)} d\xi \quad (5)$$

$$\int_0^\xi A(\xi) d\xi = \int_0^t \frac{\Delta q f_w'(S_{wf})}{\phi} dt \quad (6)$$

$$t_2 = \frac{\frac{1}{2} \phi \left\{ \left[ \frac{d \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2 + \frac{\beta_m}{\alpha_m} \left[ \frac{d \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2 \right\} \left[ \ln \frac{d \sin \beta}{r_w \sin(\alpha + \beta)} + \frac{\alpha_m}{\beta_m} \ln \frac{d \sin \alpha}{r_w \sin(\alpha + \beta)} \right]}{\frac{K}{\mu} [p_i - p_w - \lambda d \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}] f_w'(S_{wf})} \quad (9)$$

当 $\alpha \rightarrow 0$ 时, 对式(9)求极限, 可得主流线上油水前缘到达生产井底的时间, 即油井的见水时间

$$t_2' = \frac{\frac{1}{2} \phi \left\{ \left( \frac{d \frac{\beta_m}{\alpha_m}}{1 + \frac{\beta_m}{\alpha_m}} \right)^2 + \frac{\beta_m}{\alpha_m} \left( \frac{d}{1 + \frac{\beta_m}{\alpha_m}} \right)^2 \right\} \left[ \ln \frac{d \frac{\beta_m}{\alpha_m}}{r_w \left( 1 + \frac{\beta_m}{\alpha_m} \right)} + \frac{\alpha_m}{\beta_m} \ln \frac{d}{r_w \left( 1 + \frac{\beta_m}{\alpha_m} \right)} \right]}{\frac{K}{\mu} (p_i - p_w - \lambda d) f_w'(S_{wf})} \quad (10)$$

当 $t \leq t_1'$ 时, 联立式(5)和式(6), 可得不同角度流管内的油水前缘位置分布函数和波及面积表达式分别为

$$L_{n1}^2 = \frac{\frac{K}{\mu \phi} [p_i - p_w - \lambda d \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}] f_w'(S_{wf}) t}{\frac{1}{2} \ln \frac{d \sin \beta}{r_w \sin(\alpha + \beta)} + \frac{\alpha_m}{2\beta_m} \ln \frac{d \sin \alpha}{r_w \sin(\alpha + \beta)}} \quad (11)$$

$$S = \frac{1}{2} \int_0^{\alpha_0} L_{n1}^2 d\alpha \quad (12)$$

式(12)中 $\alpha_0$ 值由 $p_i - p_w - \frac{\lambda d(\sin \alpha_0 + \sin \beta_0)}{\sin(\alpha_0 + \beta_0)} = 0$

确定<sup>[20]</sup>。

当 $t_1' \leq t \leq t_2'$ 时, 可由式(7)确定油水前缘刚到达拐点 $F$ 所对应的流管与注水井和生产井的角度 $\alpha_1$

将式(5)代入式(6), 可得不同角度流管的油水前缘到达拐点 $F$ 处(图1b)的时间, 即

$$t_1 = \frac{\frac{1}{2} \phi \left[ \frac{d \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2 \left[ \ln \frac{d \sin \beta}{r_w \sin(\alpha + \beta)} + \frac{\alpha_m}{\beta_m} \ln \frac{d \sin \alpha}{r_w \sin(\alpha + \beta)} \right]}{\frac{K}{\mu} [p_i - p_w - \lambda d \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}] f_w'(S_{wf})} \quad (7)$$

当 $\alpha \rightarrow 0$ 时, 对式(7)求极限, 可得主流线上油水前缘到达拐点 $F$ 处的时间, 即

$$t_1' = \frac{\frac{1}{2} \phi \left( \frac{d \frac{\beta_m}{\alpha_m}}{1 + \frac{\beta_m}{\alpha_m}} \right)^2 \left[ \ln \frac{d \frac{\beta_m}{\alpha_m}}{r_w \left( 1 + \frac{\beta_m}{\alpha_m} \right)} + \frac{\alpha_m}{\beta_m} \ln \frac{d}{r_w \left( 1 + \frac{\beta_m}{\alpha_m} \right)} \right]}{\frac{K}{\mu} (p_i - p_w - \lambda d) f_w'(S_{wf})} \quad (8)$$

同理, 可得不同角度流管的油水前缘到达生产井底( $C$ 点)的时间表达式为

$$t_2 = \frac{\frac{1}{2} \phi \left\{ \left[ \frac{d \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2 + \frac{\beta_m}{\alpha_m} \left[ \frac{d \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2 \right\} \left[ \ln \frac{d \sin \beta}{r_w \sin(\alpha + \beta)} + \frac{\alpha_m}{\beta_m} \ln \frac{d \sin \alpha}{r_w \sin(\alpha + \beta)} \right]}{\frac{K}{\mu} [p_i - p_w - \lambda d \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)}] f_w'(S_{wf})} \quad (9)$$

前缘到达生产井底的时间, 即油井的见水时间

$$t_2' = \frac{\frac{1}{2} \phi \left\{ \left( \frac{d \frac{\beta_m}{\alpha_m}}{1 + \frac{\beta_m}{\alpha_m}} \right)^2 + \frac{\beta_m}{\alpha_m} \left( \frac{d}{1 + \frac{\beta_m}{\alpha_m}} \right)^2 \right\} \left[ \ln \frac{d \frac{\beta_m}{\alpha_m}}{r_w \left( 1 + \frac{\beta_m}{\alpha_m} \right)} + \frac{\alpha_m}{\beta_m} \ln \frac{d}{r_w \left( 1 + \frac{\beta_m}{\alpha_m} \right)} \right]}{\frac{K}{\mu} (p_i - p_w - \lambda d) f_w'(S_{wf})} \quad (10)$$

和 $\beta_1$ , 当 $\alpha \geq \alpha_1$ 时, 油水前缘位置可由式(11)确定; 当 $\alpha < \alpha_1$ 时, 则油水前缘位置函数变为

$$L_{12} = \frac{d(\sin \alpha + \sin \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} - \sqrt{\left[ \frac{d \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2 - \frac{\alpha_m}{\beta_m} \left\{ L_{n1}^2 - \left[ \frac{d \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2 \right\}} \quad (13)$$

当 $\alpha_1 \geq \alpha_0$ 时, 每一根流管均已经通过 $F$ 点, 波及面积为

$$S = \frac{1}{2} d^2 \frac{\sin \alpha_0 \sin \beta_0}{\sin(\alpha_0 + \beta_0)} - \frac{1}{2} \int_0^{\beta_0} \left[ \frac{d(\sin \alpha_0 + \sin \beta_0)}{\sin(\alpha_0 + \beta_0)} - L_{12} \right]^2 d\beta \quad (14)$$

当 $\alpha_1 < \alpha_0$ 时, 即有一部分流管未通过 $F$ 点, 将流

管单元分为2个区域,波及面积为

$$S = \frac{1}{2}d^2 \frac{\sin \alpha_1 \sin \beta_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} - \frac{1}{2} \int_0^{\beta_1} \left[ \frac{d(\sin \alpha + \sin \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} - L_{12} \right]^2 d\beta + \frac{1}{2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_0} L_{11}^2 d\alpha \quad (15)$$

当  $t \geq t_2'$  时,由式(9)确定油水前缘刚到达生产井底所对应的流管与注水井和生产井的角度  $\alpha_2$  和  $\beta_2$ 。当  $\alpha_1 \geq \alpha_0$  时,每一根流管都已经通过  $F$  点,将流管单元分为2个区域,波及面积为

$$S = \frac{1}{2}d^2 \frac{\sin \alpha_0 \sin \beta_0}{\sin(\alpha_0 + \beta_0)} - \frac{1}{2} \int_{\beta_2}^{\beta_0} \left[ \frac{d(\sin \alpha + \sin \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} - L_{12} \right]^2 d\beta \quad (16)$$

当  $\alpha_1 < \alpha_0$ ,即有一部分流管未通过  $F$  点,将流管单元分为3个区域,波及面积为

$$S = \frac{1}{2}d^2 \frac{\sin \alpha_1 \sin \beta_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} - \frac{1}{2} \int_{\beta_2}^{\beta_1} \left[ \frac{d(\sin \alpha + \sin \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} - L_{12} \right]^2 d\beta + \frac{1}{2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_0} L_{11}^2 d\alpha \quad (17)$$

渗流单元  $\triangle ABC$  的面积为

$$S_0 = 0.5xy \quad (18)$$

则五点井网的平面波及系数计算式为

$$\eta = \frac{S}{S_0} \quad (19)$$

### 3 实例计算

鄂尔多斯盆地某油藏属特低渗透各向异性油藏,注水开发层位的有效渗透率为  $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,渗透率各向异性系数 ( $K_x/K_y$ ) 为3,地层孔隙度为0.12,地层流体粘度为  $2.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,启动压力梯度为  $0.05 \text{ MPa/m}$ ,采用五点井网注水开发,井排距为  $300 \text{ m} \times$

$150 \text{ m}$ ,由油田的实际相渗曲线计算得到水驱前缘含水饱和度所对应的含水变化率为10。利用新建方法,分析了启动压力梯度、渗透率各向异性系数和注采参数对油藏水驱平面波及系数的影响。

#### 3.1 启动压力梯度

在井排距为  $300 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ 、注采压差为  $20 \text{ MPa}$ 、渗透率各向异性系数为3的条件下,启动压力梯度对五点井网平面波及系数的影响结果(图2)表明:①平面波及系数随时间先近似呈线性增加,然后缓慢增加,最终趋于稳定值,且启动压力梯度越大,所趋向的稳定值越小,即水驱平面波及程度越低。②见水后平面波及系数增幅有限。当启动压力梯度为  $0.05 \text{ MPa/m}$  时,见水时刻井网的平面波及系数为0.65,最终井网的平面波及系数为0.92,见水后平面波及系数仅增加了0.27,这也反映出特低渗透油藏油井见水后产量递减快,在开发过程中应延长无水采油期。

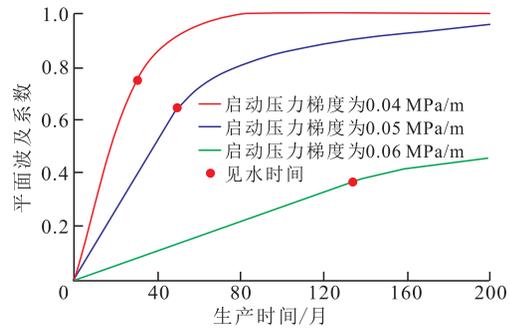


图2 启动压力梯度对平面波及系数的影响

Fig.2 Effect of threshold pressure gradient on areal sweep efficiency

生产30个月时,启动压力梯度越大,注入水向生产井推进的速度越慢,油井见水时间越晚,且能够被注入水波及的区域越窄(图3)。这主要是因为启动压力梯度的增加,使得在水驱过程中需要克服其产生的附加阻力越大,从而造成驱替速度越慢,水驱波及程度越低,形成的死油区越大,且当启动

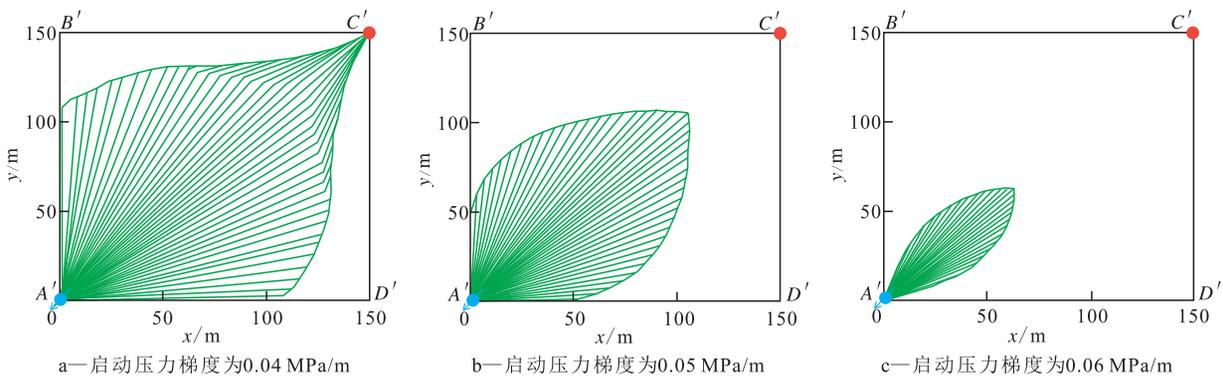


图3 不同启动压力梯度条件下生产30个月时五点井网1/4部分的波及面积

Fig.3 Swept area in 1/4 five-spot well pattern with different threshold pressure gradients at 30 months of production

压力梯度过大时,注采压差不足以克服其产生的附加阻力,则注水井与生产井之间无法建立有效的驱替系统,导致“注不进,采不出”的现象。

### 3.2 渗透率各向异性系数

计算结果表明:当渗透率各向异性系数分别为1,3和5时,油井见水时刻的平面波及系数分别为0.64,0.53和0.36,说明渗透率各向异性系数越大,见水时刻的平面波及系数越小。这主要是因为当

渗透率各向异性系数较小时,注入水沿各个方向均匀推进,平面波及程度高(图4a);而当渗透率各向异性系数较大时,注入水则沿高渗透率方向突进,从而造成大部分区域未能被注入水波及,水驱平面波及程度低(图4c)。

### 3.3 注采参数

在注采压差为20 MPa、启动压力梯度为0.05 MPa/m和渗透率各向异性系数为3的条件下,研究

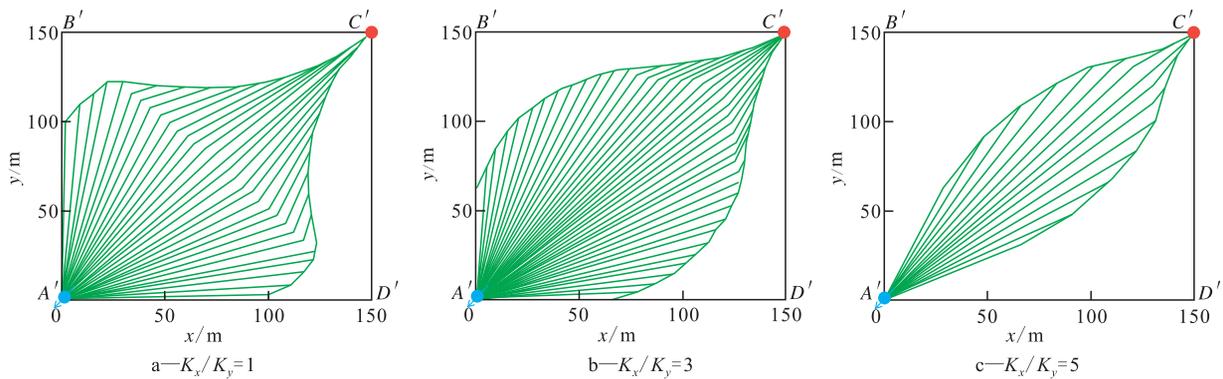


图4 不同渗透率各向异性系数下油井见水时五点井网1/4部分的波及面积

Fig.4 Swept area in 1/4 five-spot well pattern with different degrees of permeability anisotropy at water breakthrough time of oil wells

了井排距对五点井网平面波及系数的影响,同时在井排距为300 m×150 m、启动压力梯度为0.05 MPa/m和渗透率各向异性系数为3的条件下,研究了注采压差对五点井网平面波及系数的影响。分析计算结果(图5)可知:当注采压差由22 MPa降至16 MPa时,见水时间由26个月增至93个月,而见水时刻的平面波及系数从0.73减至0.49;当井排距由300 m×150 m增至380 m×190 m时,见水时间由34个月增至540个月,而见水时刻的平面波及系数从0.70减至0.24。说明特低渗透油藏的井排距和注采

压差对平面波及系数和见水时间影响均较大,这主要是因为增大井排距或者减小生产压差均能减小驱替压力梯度,从而导致油井见水时间变晚,死油区面积变大,平面波及系数变小。因此,在油田生产过程中要确定合理的井排距和生产压差,尽可能的减少死油区,提高注入水的平面波及程度。

## 4 结论

特低渗透油藏由于受天然微裂缝及沉积作用的影响,常表现出渗透率各向异性,因此在计算特低渗透油藏水驱平面波及系数时,不仅要考虑非线性渗流特征,同时还要考虑渗透率各向异性的影响。

通过建立考虑启动压力梯度的单流管模型,利用坐标变换,将渗透率各向异性油藏转化为等效渗透率各向同性油藏,推导了特低渗透各向异性油藏五点井网平面波及系数计算公式。计算结果表明,该公式能够用于计算不同渗透率各向异性系数下的特低渗透各向异性油藏的平面波及系数,进一步完善了特低渗透各向异性油藏井网部署的油藏工程方法。

特低渗透各向异性油藏的平面波及系数与启动压力梯度、渗透率各向异性系数及注采参数密切

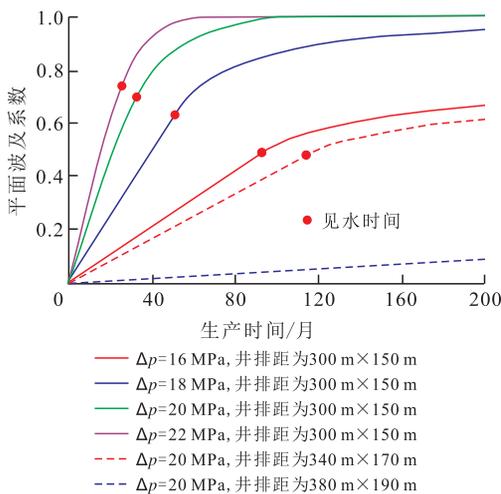


图5 注采参数对平面波及系数的影响

Fig.5 Effect of well spacing and pressure difference on areal sweep efficiency

相关,当油藏渗透率各向异性较强时,注入水沿渗透率主值方向快速突进,导致平面波及程度低,可通过优化井排距、增大注采压差或者井网加密的方式,减小死油区,从而提高注入水的波及程度。

#### 符号解释:

$q$ ——流量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $K$ ——等效地层渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $A$ ——流管截面积,  $\text{m}^2$ ;  $\nabla p$ ——压力梯度,  $\text{MPa}$ ;  $\mu$ ——地层流体粘度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $\lambda$ ——启动压力梯度,  $\text{MPa}/\text{m}$ ;  $x$ ——等效各向同性渗流空间井距方向,  $\text{m}$ ;  $x'$ ——各向异性渗流空间井距方向,  $\text{m}$ ;  $K_x$ —— $x$ 方向渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $y$ ——等效各向同性渗流空间井排方向,  $\text{m}$ ;  $y'$ ——各向异性渗流空间井排方向,  $\text{m}$ ;  $K_y$ —— $y$ 方向渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $d$ —— $\overline{AC}$ 的长度,  $\text{m}$ ;  $\alpha_m$ —— $\overline{BA}$ 与 $\overline{AC}$ 的夹角,  $(^\circ)$ ;  $\beta_m$ —— $\overline{BC}$ 与 $\overline{CA}$ 的夹角,  $(^\circ)$ ;  $\Delta\alpha$ ——注水井角增量,  $(^\circ)$ ;  $\Delta\beta$ ——生产井角增量,  $(^\circ)$ ;  $\alpha$ ——注水井角变量,  $(^\circ)$ ;  $\beta$ ——生产井角变量,  $(^\circ)$ ;  $A(\xi)$ ——流线长度为 $\xi$ 处的流管截面积,  $\text{m}^2$ ;  $\xi$ ——从注水井出发的流线长度,  $\text{m}$ ;  $h$ ——地层厚度,  $\text{m}$ ;  $\Delta q$ ——截面处流量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $p_i$ ——注入井井底压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_w$ ——生产井井底压力,  $\text{MPa}$ ;  $L$ ——流管中线长度,  $\text{m}$ ;  $t$ ——时间,  $\text{d}$ ;  $f_w'(S_{wi})$ ——前缘含水饱和度所对应的含水变化率;  $\phi$ ——孔隙度;  $t_1$ ——油水前缘到达拐点 $F$ 处的时间,  $\text{d}$ ;  $r_w$ ——井口半径,  $\text{m}$ ;  $t_1'$ ——主流线上油水前缘到达拐点 $F$ 处的时间,  $\text{d}$ ;  $t_2$ ——油水前缘到达生产井底( $C$ 点)的时间,  $\text{d}$ ;  $t_2'$ ——主流线上油水前缘到达生产井底( $C$ 点)的时间,  $\text{d}$ ;  $L_{t1}$ ——油水前缘未到达拐点 $F$ 时的水驱前缘位置,  $\text{m}$ ;  $S$ ——注入水波及面积,  $\text{m}^2$ ;  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$ ——启动角,  $(^\circ)$ ;  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ——油水前缘刚到达拐点 $F$ 所对应的流管与注水井及生产井的角度,  $(^\circ)$ ;  $L_{t2}$ ——油水前缘到达拐点 $F$ 后的水驱前缘位置,  $\text{m}$ ;  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$ ——油水前缘刚到达生产井底所对应的流管与注水井及生产井的角度,  $(^\circ)$ ;  $S_0$ ——渗流单元 $\triangle ABC$ 的面积,  $\text{m}^2$ ;  $\eta$ ——平面波及系数。

#### 参考文献:

- [1] 王道富,付金华,雷启鸿,等.鄂尔多斯盆地低渗透油气田勘探开发技术与展望[J].岩性油气藏,2007,19(3):126-130.  
Wang Daofu, Fu Jinhua, Lei Qihong, et al. Exploration technology and prospect of low permeability oil-gas field in Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(3): 126-130.
- [2] 薛永超,田虢丰.鄂尔多斯盆地长7致密油藏特征[J].特种油气藏,2014,21(3):111-115.  
Xue Yongchao, Tian Xiaofeng. Characteristics of Chang-7 tight oil reservoir, Ordos basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(3): 111-115.
- [3] 时保宏,郑飞,张艳,等.鄂尔多斯盆地延长组长7油层组石油成藏条件分析[J].石油实验地质,2014,36(3):285-290.  
Shi Baohong, Zheng Fei, Zhang Yan, et al. Hydrocarbon accumulation conditions of Chang7 section, Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 285-290.

- [4] 王欢,廖新维,赵晓亮,等.超低渗透油藏分段多簇压裂水平产能影响因素与渗流规律——以鄂尔多斯盆地长8超低渗透油藏为例[J].油气地质与采收率,2014,21(6):107-110.  
Wang Huan, Liao Xinwei, Zhao Xiaoliang, et al. A study on productivity and flow regimes of segmented multi-cluster fractured horizontal well in ultra-low permeability reservoir—a case of Chang8 ultra-low permeability reservoir in Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 107-110.
- [5] 庞军刚,李赛,杨友运,等.湖盆深水区细粒沉积成因研究进展:以鄂尔多斯盆地延长组为例[J].石油实验地质,2014,36(6):706-711.  
Pang Jungang, Li Sai, Yang Youyun, et al. Study progress of origin of fine-grained sedimentary rocks in deep-water area of lacustrine basin: Taking Yangchang Formation in Ordos Basin as an example [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(6): 706-711.
- [6] 计红,赵卫卫,王乃军.鄂尔多斯盆地地下寺湾地区延长组长2油层组储层特征[J].特种油气藏,2012,19(2):43-45.  
Ji Hong, Zhao Weiwei, Wang Naijun. Reservoir characteristics of the Chang-2 oil unit in Yanchang formation of Xiasiwan area in Ordos basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(3): 43-45.
- [7] 曹仁义,周焱斌,熊琪,等.低渗透油藏平面波及系数评价及改善潜力[J].油气地质与采收率,2015,22(1):74-77,83.  
Cao Renyi, Zhou Yanbin, Xiong Qi, et al. Evaluation and improvement of areal sweep efficiency for low permeability reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 74-77, 83.
- [8] 赵益忠,程远方,刘钰川,等.启动压力梯度对低渗透油藏微观渗流及开发动态的影响[J].油气地质与采收率,2013,20(1):67-69,73.  
Zhao Yizhong, Cheng Yuanfang, Liu Yuchuan, et al. Study on influence of start-up pressure gradient to micro-seepage in low permeability reservoirs and development trends [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(1): 67-69, 73.
- [9] 许建红,程林松,周颖,等.一种求解低渗透油藏启动压力梯度的新方法[J].石油勘探与开发,2007,34(5):594-597.  
Xu Jianhong, Cheng Linsong, Zhou Ying, et al. A new method for calculating kickoff pressure gradient in low permeability reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(5): 594-597.
- [10] 刘丽.低渗透油藏启动压力梯度的应力敏感性实验研究[J].油气地质与采收率,2012,19(2):81-83.  
Liu Li. Laboratory study on stress sensitivity of threshold pressure gradient in low permeability reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2): 81-83.
- [11] 张楠,王晓琴,徐锋,等.启动压力梯度和应力敏感效应对低渗透油藏直井产能的影响[J].特种油气藏,2012,19(1):74-77.  
Zhang Nan, Wang Xiaoqin, Xu Feng, et al. Influence of start-up pressure gradient and stress sensitivity on vertical well productivity of low-permeability oil reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(1): 74-77.

- [12] 刘文超,姚军,孙致学,等.低渗透油藏非达西渗流瞬时压力计算方法[J].油气地质与采收率,2013,20(1):74-76,80.  
Liu Wenchao, Yao Jun, Sun Zhixue, et al. Calculation method for the transient pressure of non-Darcy seepage flow in low-permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(1): 74-76, 80.
- [13] 程林松.高等渗流力学[M].北京:石油工业出版社,2011:287-299.  
Cheng Linsong. Advanced fluid flow in porous media [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 287-299.
- [14] 丁云宏,陈作,曾斌,等.渗透率各向异性的低渗透油藏开发井网研究[J].石油学报,2002,23(2):64-67.  
Ding Yunhong, Chen Zuo, Zeng Bin, et al. The development well-pattern of low and anisotropic permeability reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(2): 64-67.
- [15] 刘月田,徐明旺,彭道贵,等.各向异性渗透率油藏数值模拟[J].计算物理,2007,24(3):295-300.  
Liu Yuetian, Xu Mingwang, Peng Daogui, et al. Numerical simulation of petroleum reservoir with anisotropic permeability [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2007, 24(3): 295-300.
- [16] 张丽华,郎兆新.用数值方法研究面积井网系统的扫油效率[J].石油大学学报:自然科学版,1988,12(3):86-97.  
Zhang Lihua, Lang Zhaoxin. Determination of areal sweep efficiency of pattern flooding by use of simulator [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1988, 12(3): 86-97.
- [17] 武兵厂,姚军,吕爱民.水平井与垂直井联合井网波及系数研究[J].石油学报,2006,27(4):85-88.  
Wu Bingchang, Yao Jun, Lü Aimin. Research on sweep efficiency in horizontal-vertical combined well pattern [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 85-88.
- [18] 姚凯,姜汉桥,武兵厂,等.五点法水平井与垂直井联合井网波及系数研究[J].长江大学学报:自科版理工卷,2007,4(2):187-189.  
Yao Kai, Jiang Hanqiao, Wu Bingchang, et al. Research on sweep efficiency in five spot horizontal-vertical combined well pattern [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edit on Sci & Eng V, 2007, 4(2): 187-189.
- [19] 范江,张子香,扎拉杜新 A B.非均质油层波及系数计算模型[J].石油学报,1993,14(1):92-97.  
Fan Jiang, Zhang Zixiang, Zaladuxin A B. A model for the calculation of the sweep efficiency in a heterogeneous oil reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14(1): 92-97.
- [20] 计秉玉,李莉,王春艳.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. 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.
- [21] 郭粉转,唐海,吕栋梁,等.渗流启动压力梯度对低渗透油田四点井网面积波及效率影响[J].大庆石油学院学报,2010,34(1):33-38.  
Guo Fenzhuan, Tang Hai, Lü Dongliang, et al. Effects of seepage threshold pressure gradient on areal sweep efficiency for 4-spot pattern of low permeability reservoir [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2010, 34(1): 33-38.
- [22] 郭粉转,唐海,吕栋梁,等.渗流启动压力梯度对低渗透油田五点井网面积波及效率影响[J].大庆石油学院学报,2010,34(3):65-68.  
Guo Fenzhuan, Tang Hai, Lü Dongliang, et al. Effects of seepage threshold pressure gradient on areal sweep efficiency for five-spot pattern of low permeability reservoir [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2010, 34(3): 65-68.
- [23] 吕栋梁,唐海,郭粉转,等.低渗透油田反九点井网面积波及效率影响研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(1):147-153.  
Lü Dongliang, Tang Hai, Guo Fenzhuan, et al. Study of areal sweep efficiency for invert 9-spot pattern of low permeability reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(1): 147-153.
- [24] 朱圣举,朱洁,安小平,等.低渗透油藏菱形反九点井网面积波及系数研究[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2013,15(2):80-83.  
Zhu Shengju, Zhu Jie, An Xiaoping, et al. Research on areal sweep efficiency for rhombus invert 9-spot areal well pattern of low-permeability reservoir [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 15(2): 80-83.
- [25] 齐亚东,雷群,杨正明,等.特低渗透断块油藏不规则三角形井网有效动用系数计算及应用[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(3):1 065-1 071.  
Qi Yadong, Lei Qun, Yang Zhengming, et al. Calculation and application of effective development coefficient for irregular triangular patterns in extra-low permeability fault block oil reservoirs [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(3): 1 065-1 071.
- [26] 杨鹏,徐莎,骆瑛,等.江苏油田特低渗透油藏三角形井网有效动用系数评价[J].复杂油气藏,2011,4(2):52-55.  
Yang Peng, Xu Sha, Luo Ying, et al. Evaluation of effective development coefficient for triangle well patterns in extra-low permeability fault-block reservoirs of Jiangsu Oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2011, 4(2): 52-55.
- [27] 周瀛,唐海,吕栋梁,等.排状交错水平井井网面积波及效率研究[J].岩性油气藏,2012,24(5):124-128.  
Zhou Ying, Tang Hai, Lü Dongliang, et al. Areal sweep efficiency of staggered well pattern of horizontal wells in low permeability reservoirs [J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(5): 124-128.