

文章编号:1009-9603(2020)03-0057-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2020.03.007

特低渗透各向异性油藏井网加密储量动用规律

杨子由^{1,2}, 陈民锋^{1,2}, 屈丹^{1,2}, 杨金欣^{1,2}

(1. 油气资源与探测国家重点实验室 中国石油大学(北京), 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

摘要:在特低渗透油藏中,由于高渗透条带的发育,通常使其表现出渗透率各向异性特征,导致注采井间的渗流规律与常规油藏不同,对井网加密形式的适应性也存在差异。基于各向异性油藏的渗流特点及井网调整形式,利用叠加原理,得到注采平面渗流场计算公式;引入线状排驱概念,对各向异性油藏井网加密形式进行适应性分析;用驱动压力梯度表征储量动用程度,提出无因次动用提高程度概念,建立定量表征注采井间储量动用规律的方法。结果表明,将初始正方形反九点井网系统地调整为排状加密井网,形成线状排驱,可有效提升特低渗透各向异性油藏的储量动用程度;初始井网井距大于400 m时,注采井间储量动用提升潜力较大。

关键词:特低渗透油藏;各向异性;井网加密;线状排驱;储量动用程度

中图分类号:TE348

文献标识码:A

Reserve producing law of extra-low permeability anisotropic reservoirs with infilled well pattern

YANG Ziyou^{1,2}, CHEN Minfeng^{1,2}, QU Dan^{1,2}, YANG Jinxin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China; 2. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: There is permeability anisotropy due to the high-permeability channels in extra-low permeability reservoirs, which leads to the different percolation behaviors between injectors and producers compared with conventional reservoirs, and different adaptability of well pattern infilling. Based on the percolation behaviors of anisotropic reservoirs and infilled well pattern, the calculation formula of plane percolation field between injectors and producers is obtained by using the superposition principle. The linear displacement is introduced to analyze the adaptability of infilled well pattern in the anisotropic reservoir. The driving pressure gradient is used to characterize percentage of producing reserve, and the dimensionless incremental percentage of producing reserve is proposed. A quantitative characterization method for producing reserve between injectors and producers is established. The results show that the initial inverted nine-point well patterns are systematically infilled to row well patterns to form linear displacement, which can effectively improve the producing reserve in the extra-low permeability anisotropic reservoirs. When the initial well spacing is greater than 400 m, the potential of producing reserve between injectors and producers is improved significantly.

Key words: extra-low permeability reservoir; anisotropy; infilled well pattern; linear displacement; percentage of producing reserve

在特低渗透油藏中,流体在多孔介质的渗流过程中往往存在启动压力梯度,且由于高渗透条带的发育,通常使得油藏渗透率在不同方向差异化分布,导致特低渗透油藏出现渗透率各向异性特征。

高渗透条带的存在使得水驱开发过程中出现单方向水窜,因此,常规井网形式不再适合此类油藏的开发^[1-5]。

在对各向异性油藏的渗流理论研究中,往往使

收稿日期:2020-03-05。

作者简介:杨子由(1996—),男,河北石家庄人,在读硕士研究生,从事油田开发系统理论方法研究工作。E-mail: yangzy_06@163.com。

通信作者:陈民锋(1971—),男,河南濮阳人,副教授,博士。E-mail: cmfllp96@126.com。

基金项目:中海石油(中国)有限公司综合科研项目“渤海双高油田挖潜关键技术研究”(YXKY-2018-TJ-04)。

用流管模型对个别渗流方向上的渗流规律进行分析^[6-10],研究渗透率在不同方向上的差异对整个注采井网系统渗流规律的影响较少;在储量动用规律研究中,多基于油藏注水波及情况及油井产能等指标进行井网调整^[11-17],较少在油田注采井网模型的基础上,对特低渗透各向异性油藏井网加密方式进行适应性评价,并以此来论证井网加密方式对此类油藏的合理性。为此,基于实际油田注采井网形式,考虑油藏各向异性的渗流特点,得到不同注采井网条件下渗流场分布规律,论证排状加密井网对各向异性油藏的适应性,建立储量动用评价方法,以研究井网加密后的储量动用规律。

1 考虑各向异性影响的注采井网渗流场求解

1.1 油藏各向异性及其影响

油藏的非均质性一般包括层间、层内、平面和微观非均质性,其中平面上渗透率的各向异性最为普遍,直接影响水驱波及系数和驱油效率。对于重点解决油藏各向异性问题的注采井网设计来说,为保证各方向上的均衡驱替,需要重点考虑渗透率在不同位置及方向上的差异。

油藏在投入开发时,由于各类资料相对较少,油藏的各向异性特征和主渗流方向不甚明确,基础井网系统往往是正方形反九点井网。注水开发过程中,油藏水驱动态越来越表现出单方向水窜的特点,反映了油藏渗流非均匀性对水驱开发的不利影响。

由于正方形反九点井网越来越表现出不适应地下水驱流动的非均匀性,后续开发过程中力图通过井网加密改变注水井网形式,使调整后的井网形式与各向异性油藏的渗流特点相适应,以最大可能地提高油藏水驱波及系数,进而提高注采井间储量动用程度。

1.2 各向异性油藏渗流方程

若均质油藏中有1口井,其产液量或注入量为 q ,则油藏平面上任意点处的势为:

$$\phi = \frac{q}{2\pi} \ln r + C \quad (1)$$

若油藏中有多口井同时注入或生产,根据叠加原理,假定各投产井的坐标为 (x_i, y_i) ,则任意点处 (x, y) 的势为:

$$\phi = \sum_{i=1}^m \phi_i = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^m \left[\pm q_i \ln \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \right] + C \quad (2)$$

若为各向异性油藏,任意点处的势为:

$$\phi = \sum_{i=1}^m \phi_i = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^m \left[\pm q_i \ln \sqrt{\frac{K_e}{K_x} (x - x_i)^2 + \frac{K_e}{K_y} (y - y_i)^2} \right] + C \quad (3)$$

其中:

$$K_e = \sqrt{K_x K_y} \quad (4)$$

假定 $K_x = nK_y$ ($n=1$ 时为均质油藏),将(4)式代入(3)式得:

$$\phi = \sum_{i=1}^m \phi_i = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^m \left[\pm q_i \ln \left[\frac{1}{\sqrt{n}} (x - x_i)^2 + \sqrt{n} (y - y_i)^2 \right] \right] + C \quad (5)$$

根据势可确定驱动压力梯度。压力梯度为矢量,其沿 x 与 y 轴正方向的分量为:

$$\begin{cases} \frac{d\phi}{dx} = \frac{\mu_o}{K_x} \times \frac{d\phi}{dx} = \frac{\mu_o}{2\pi K_x} \sum_{i=1}^m \frac{q_i (x - x_i)}{(x - x_i)^2 + n(y - y_i)^2} \\ \frac{d\phi}{dy} = \frac{\mu_o}{K_y} \times \frac{d\phi}{dy} = \frac{n\mu_o}{2\pi K_y} \sum_{i=1}^m \frac{q_i (y - y_i)}{(x - x_i)^2 + n(y - y_i)^2} \end{cases} \quad (6)$$

1.3 初始注采井网及加密形式

在CZ特低渗透各向异性油藏注水开发过程中,针对沿主渗流方向水驱突进的问题,一般将初始的正方形反九点基础井网整体加密为交错排状井网,使注水井排方向与油藏主渗流方向一致,以改善水驱效果。初始注采井网为井距与排距相等的正方形反九点井网(图1a);在初始反九点井网的两井排中间,生产井交错位置处加密生产井,初始井网中的生产井转为注水井,形成排状加密井网(图1b)。

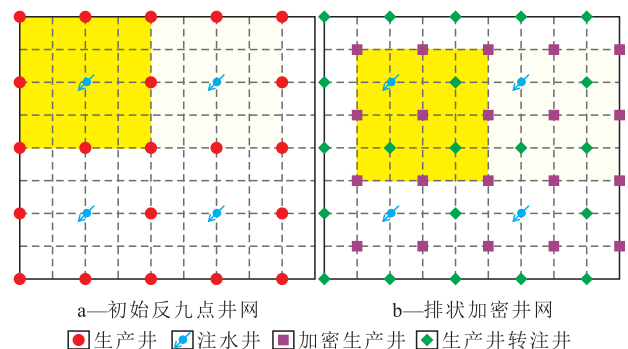


图1 加密前后注采井网形式

Fig.1 Well patterns before and after infilling

1.4 不同井网形式下的渗流规律

基于各向异性油藏渗流方程,可得到2种井网形式下注采井间的势和驱动压力梯度分布。

初始反九点井网 在初始反九点井网中取1个正方形注采单元(图1a中深黄区域)作为研究单元,以注水井作为坐标原点,考虑配产配注原则,设注水井的注入量为 q_w ;各角生产井的产量为 q_{oA} ,其坐标为 (x_{oAi}, y_{oAi}) ;各边生产井的产量为 q_{oE} ,其坐标为 (x_{oEi}, y_{oEi}) 。

根据势叠加原理,可以得到研究单元中任意点 $M(x, y)$ 处的势为:

$$\phi_M = \frac{1}{4\pi} \times \left[q_w \ln(x^2 + y^2) - q_{oA} \sum_{i=1}^4 \ln(x_{ai}^2 + y_{ai}^2) - q_{oE} \sum_{i=1}^4 \ln(x_{bi}^2 + y_{bi}^2) \right] \quad (7)$$

其中:

$$x_{ai} = x - x_{oAi} \quad (8)$$

$$y_{ai} = y - y_{oAi} \quad (9)$$

$$x_{bi} = x - x_{oEi} \quad (10)$$

$$y_{bi} = y - y_{oEi} \quad (11)$$

根据(6)式,可以得到任意点 M 处的驱动压力梯度为:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu_o}{2\pi} \times \left[\frac{1}{K_x} \left(\frac{q_w x}{x^2 + ny^2} - \sum_{i=1}^4 \frac{q_{oA} x_{ai}}{x_{ai}^2 + ny_{ai}^2} - \sum_{i=1}^4 \frac{q_{oE} x_{bi}}{x_{bi}^2 + ny_{bi}^2} \right)^2 + \frac{n}{K_y} \left(\frac{q_w y}{x^2 + ny^2} - \sum_{i=1}^4 \frac{q_{oA} y_{ai}}{x_{ai}^2 + ny_{ai}^2} - \sum_{i=1}^4 \frac{q_{oE} y_{bi}}{x_{bi}^2 + ny_{bi}^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

排状加密井网 在排状加密井网中(图1b)取1个注采单元作为研究区域。以中心生产井为坐标原点,考虑配产配注原则,设中心生产井的产量为 q_o ;各注水井的注入量为 q_w ,其坐标为 (x_{wti}, y_{wti}) ;各角生产井的产量为 q_{oAt} ,其坐标为 (x_{oAti}, y_{oAti}) ;各边生产井的产量为 q_{oEt} ,坐标为 (x_{oEti}, y_{oEti}) 。同理,可以得到排状加密井网任意点 M 处的势和驱动压力梯度分别为:

$$\phi_M = \frac{1}{4\pi} \times \left[-q_o \ln(x^2 + y^2) + q_w \sum_{i=1}^4 \ln(x_{ci}^2 + y_{ci}^2) - q_{oAt} \sum_{i=1}^4 \ln(x_{di}^2 + y_{di}^2) - q_{oEt} \sum_{i=1}^4 \ln(x_{ei}^2 + y_{ei}^2) \right] \quad (13)$$

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\mu_o}{2\pi} \times \left[\frac{1}{K_x} \left(-\frac{q_o x}{x^2 + ny^2} + \sum_{i=1}^4 \frac{q_w x_{ci}}{x_{ci}^2 + ny_{ci}^2} - \sum_{i=1}^4 \frac{q_{oAt} x_{di}}{x_{di}^2 + ny_{di}^2} - \sum_{i=1}^4 \frac{q_{oEt} x_{ei}}{x_{ei}^2 + ny_{ei}^2} \right)^2 + \frac{n}{K_y} \left(-\frac{q_o y}{x^2 + ny^2} + \sum_{i=1}^4 \frac{q_w y_{ci}}{x_{ci}^2 + ny_{ci}^2} - \sum_{i=1}^4 \frac{q_{oAt} y_{di}}{x_{di}^2 + ny_{di}^2} - \sum_{i=1}^4 \frac{q_{oEt} y_{ei}}{x_{ei}^2 + ny_{ei}^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

其中:

$$x_{ci} = x - x_{wti} \quad (15)$$

$$y_{ci} = y - y_{wti} \quad (16)$$

$$x_{di} = x - x_{oAti} \quad (17)$$

$$y_{di} = y - y_{oAti} \quad (18)$$

$$x_{ei} = x - x_{oEti} \quad (19)$$

$$y_{ei} = y - y_{oEti} \quad (20)$$

2 储量动用评价方法

2.1 评价参数的确定

驱动压力梯度可反映流体在油藏中流动的难易程度,通过统计注采井间驱动压力梯度的分布,定量表征注采井间的储量动用情况。为此,提出无因次动用范围与无因次动用提高程度2个概念。

无因次动用范围 在注采井间,设研究范围的总面积为 R_T 。在此范围内,若驱动压力梯度大于某值的面积为 R ,则该条件下无因次动用范围定义为:

$$R_D = \frac{R}{R_T} \quad (21)$$

无因次动用提高程度 井网加密后,若某位置处的驱动压力梯度更大,则视该位置处的储量动用程度提高。在研究范围内,设储量动用程度提高范围的总面积为 N_T ,在此范围内,若井网加密后驱动压力梯度增量大于某值的面积为 N ,定义无因次动用提高程度为:

$$N_D = \frac{N}{N_T} \quad (22)$$

2.2 评价方法的建立

基于不同井网形式下渗流场分布,可以定量表征井网加密后储量动用的变化规律,为此建立储量有效动用规律的评价方法。其主要步骤包括:①在不同井网形式下,计算注采井间各位置处驱动压力

梯度。该值可表示流体动用强度,进而反映注采井间各位置处的储量动用程度。②统计不同井距条件下不同驱动压力梯度对应的无因次动用范围。通过分析驱动压力梯度与无因次动用范围的关系,研究注采井间的储量动用程度。③根据统计的驱动压力梯度增量与无因次动用提高程度的关系,可以定量表征井网加密后储量动用的提升效果,并进一步确定井网加密的合理初始井距范围。

2.3 注采井网中储量动用程度的划分

在特低渗透油藏中,若某区域的驱动压力梯度小于油藏启动压力梯度,流体不流动,此区域称为难动用区,反之则为储量有效动用区。由于多孔介质在微观尺度上存在差异,不同特低渗透油藏的启动压力梯度不同,判别储量有效动用的标准也不同。依据CZ特低渗透各向异性油藏的物性,将驱动压力梯度小于0.015 MPa/m的区域定义为难动用区,驱动压力梯度为0.015~0.03 MPa/m的区域定义为低-中动用区,驱动压力梯度大于0.03 MPa/m的区域定义为中-高动用区。

特低渗透油藏井网加密的目的是缩小注采井间难动用区范围,扩大低-中动用区范围,进而提高全油田范围内的储量动用程度。

3 不同井网形式下储量动用规律

根据CZ特低渗透各向异性油藏开发实践及调整经验,设置各向异性油藏在不同方向上渗透率的关系为 $K_x = 5K_y$,此条件下可以明显体现不同方向上渗透率的差异。研究范围为各自井网形式下2个相邻的注采单元(图1中深黄和浅黄区域)。各井定产液量或注入量,初始注采井距为200~600 m。

3.1 加密井网对各向异性油藏的适应性

排状井网的线性排驱和注采沿线 在排状井网中,注水井排和生产井排交替排列,在注水井排附近形成高压(势)区,生产井排附近形成低压(势)区。若油藏为各向异性油藏,且井排布置方向与高渗透方向一致时,注水井附近的高压区交汇,形成高压水线。该高压水线的延伸方向与注水井排一致,并与生产井排附近形成低压带交替分布,在注采井间形成线状排驱。

在注水井排上,以不同位置为起点,分别向相邻生产井排作垂线,将此类垂线定义为注采沿线。当各向异性油藏使用排状井网进行开发时,注水井排不同位置为起点的诸多注采沿线上,其势分布规律相近,说明不同注采沿线上流体的流动状态相

似,体现各向异性油藏在排状井网形式下的开发特点。由此可知,对于各向异性油藏,线状排驱可以使注入流体沿低渗透方向整体排驱,有效提高低渗透方向的储量动用程度,进而提高储量动用程度。

井网加密前后注采井间势分布规律 根据(7)式和(13)式,可分别得到均质油藏和各向异性油藏在井网加密前后的势分布(初始井距为400 m)。由图2可以看出:①在反九点井网中,均质油藏等势线呈圆形分布,而各向异性油藏中势场呈椭圆形分布,二者形态差异反映了流体在各自油藏条件下的渗流特征。②对于各向异性油藏,井网加密后,注水井排附近高势带呈现线状分布,形成高压水线,与生产井排处的低势带交错分布,形成线状排驱。③相比于均质油藏,各向异性油藏在井网加密后,注采井间势等值线近似线状分布,体现注水井排整体排驱的特性;井排间等值线分布更密集,说明沿低渗透方向势梯度更大,注入流体更多地沿低渗透方向驱替,发挥线状排驱优势。

注采沿线势分布规律 注采主沿线定义为以注水井为起点的注采沿线,注采非主沿线定义为起点非注水井的注采沿线。为使论证更具代表性和充分性,取注采主沿线、距注水井1/4井距和1/2井距处为起点的非主沿线作为研究对象。井网加密前后不同油藏注采沿线上势分布规律(图3)表明:①在注采主沿线上,近井区域(距井约40 m内的区域)势呈漏斗状下降趋势,后渐变为近线性下降的趋势;在非主沿线上,势随距注水井排距离的增加呈相对平缓下降的趋势。②在均质油藏中,3条注采沿线中任意2条在确定距离条件下,势始终存在一定的差值,该差值在超过近井区域范围内基本趋于一致,反映了注采井间径向驱动的特点。③在各向异性油藏中,注采主沿线、非主沿线上,势的变化趋势在超过近井区域基本趋于一致,且势的大小接近,说明在此条件下形成了注水井排的高压水线,势分布等值线横向轮廓几乎与井排相互平行,产生整体向生产井排线性排驱的态势。

综合分析图2和图3后发现:在各向异性油藏中,将初始反九点井网转化为排状加密井网,可以在注采井间形成线性排驱;不同注采沿线上势相近的变化规律,表明注入水可以对油藏中流体沿低渗透方向(注采沿线方向)整体性排驱,使该方向的水驱效果更为均衡。因此,排状加密井网更适合各向异性油藏的注采开发。

3.2 储量动用变化规律

注采井间驱动压力梯度分布 基于(12)式和

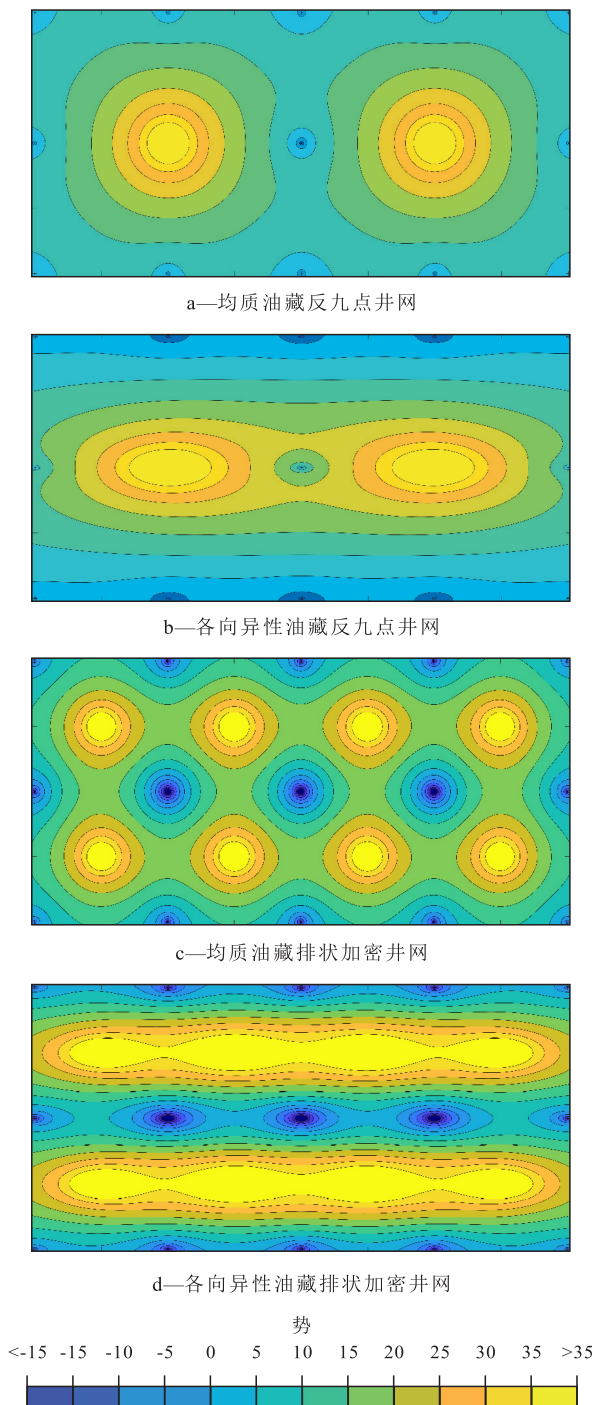


图2 井网加密前后不同油藏中的势分布

Fig.2 Potential distribution in different reservoirs before and after well pattern infilling

(14)式,可以得到在确定条件下井网加密前后2个相邻注采单元的驱动压力梯度分布。由初始井距为400 m时的驱动压力梯度分布(图4)可以看出:①井网加密后,在注采井间的较大范围内,驱动压力梯度有一定程度的增大,有效缩小了井网加密前难动用区范围,储量动用程度有所提高。②动用提高范围主要集中在加密井附近,由此可知井网加密对该区域储量动用程度提升效果明显,而两相邻注水

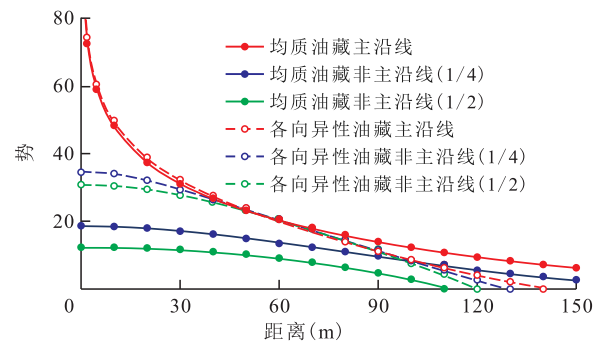
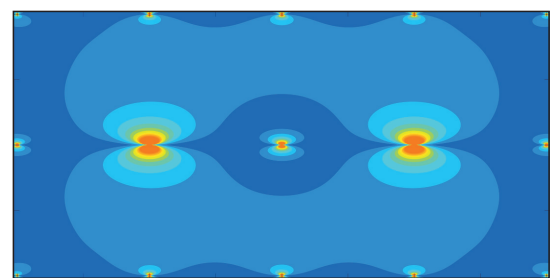
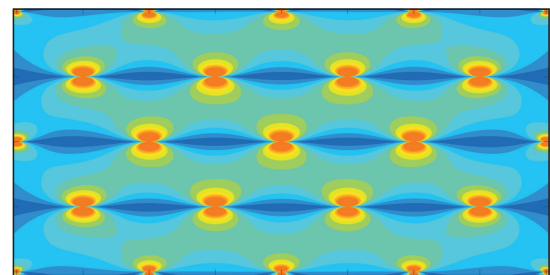


图3 井网加密前后注采沿线势分布规律

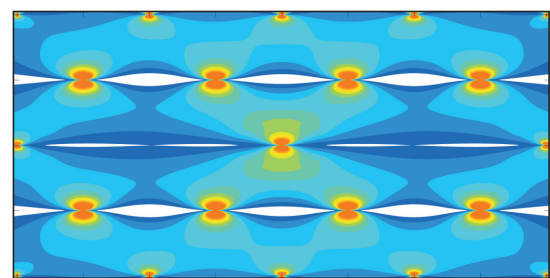
Fig.3 Potential distribution along injector and producer line before and after well pattern infilling



a—初始反九点井网驱动压力梯度分布



b—排状加密井网驱动压力梯度分布



c—排状加密井网驱动压力梯度增值分布



图4 注采井间驱动压力梯度分布

Fig.4 Driving pressure gradient distribution between injectors and producers

井之间区域动用效果较差,后期可采取其他措施以改善该区域的储量动用效果。

不同条件下储量动用变化规律 根据(21)式和(22)式,可得到在不同初始井距条件下,井网加密前后的无因次动用范围和无因次动用提高程度。

由无因次动用范围曲线(图 5a, 5b)可以看出:①当井网形式一定时,相同驱动压力梯度下,随着井距的减小,无因次动用范围均增加,储量动用程度有所提高;在任意曲线上,随驱动压力梯度的升高,均出现曲线斜率突增的拐点(图中虚线与各曲线交点)。在注采井间,小于拐点处驱动压力梯度的区域,可以看作是此条件下注采井间主要动用区域。②相比于初始井网,井网加密后,相同驱动压力梯度下的无因次动用范围更大,说明井网加密后,注采井间的储量动用效果更好。③井网加密前,对于井距大于 400 m 的曲线,其拐点处对应的驱动压力梯度较小($< 0.015 \text{ MPa/m}$),此时注采井间的主要动用区域为难动用区,说明在此条件下,注采井间主

要动用范围的驱动压力梯度较低,初始井距越大,其井网加密后储量动用提高潜力越大。

根据图 5c 可以看出:①当驱动压力梯度一定时,井距越小,动用提高区域的范围越大,储量动用程度越高。②在无因次动用提高程度曲线中,亦有拐点的出现。在井距一定的条件下,小于此拐点以及大于反九点井网无因次动用曲线(图 5a)中拐点对应的驱动压力梯度范围,即为该条件下井网加密主要提升的动用范围。③当井距大于 400 m 时,井网加密主要缩小难动用区范围($< 0.015 \text{ MPa/m}$),提升低-中动用区($0.015 \sim 0.03 \text{ MPa/m}$)动用范围,而井距在小于 400 m 的条件下对中-高动用区提升效果较好。

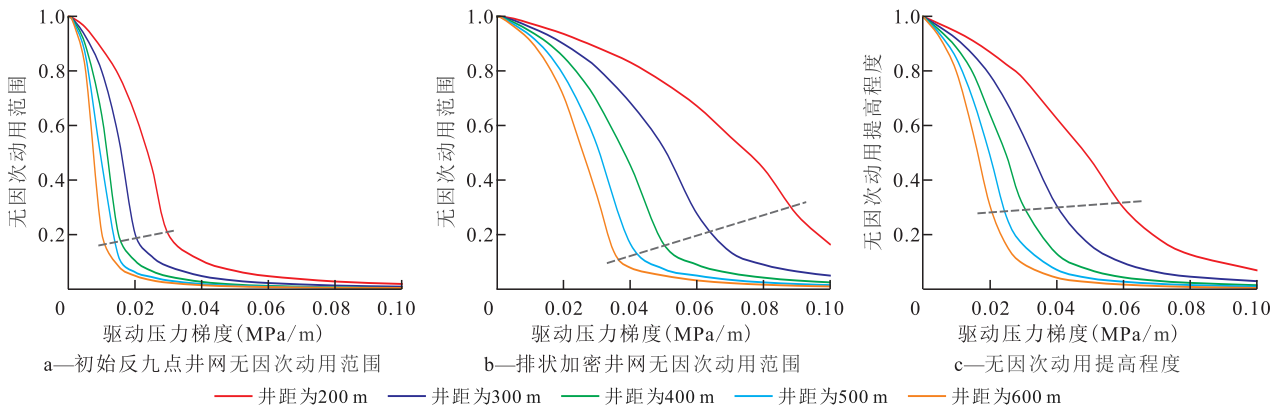


图5 无因次动用范围和无因次动用提高程度变化曲线
 Fig.5 Dimensionless producing range and dimensionless incremental percentage of producing range

4 结论

基于典型油藏注采井网的加密方式,建立反映油藏各向异性的注采井间渗流场计算方法,可以得到不同条件下注采井间渗流场分布。

基于特低渗透各向异性油藏有效动用条件,建立了定量分析此类油藏井网加密前后储量动用变化规律的评价方法。

加密后的排状井网更适合各向异性油藏的水驱开发,注采井间的储量有效动用程度显著提高;当初始反九点井网井距大于 400 m 时,井网加密对储量动用提升效果更为明显。

符号解释

q ——井产液量或注入量, m^3/d ; ϕ ——势, 无量纲; r ——任意点与井之间的距离, m ; C ——常数; x_i, y_i ——第 i 口井横、纵坐标, m ; i ——井编号; m ——井总数, 口; ϕ_i ——第 i 口井在任意点产生的势, 无量纲; q_i ——第 i 口井产液量或注入量, m^3/d ; x, y ——任意点的横、纵坐标, m ; K_c ——油藏平均渗

透率, mD ; K_x, K_y ——油藏横、纵向渗透率, mD ; n ——渗透率级差, 无量纲; p ——地层中任意处的压力, MPa ; μ_o ——地层原油黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; q_w ——注水井注入量, m^3/d ; q_{oA} ——初始井网中各角生产井的产量, m^3/d ; x_{oAi}, y_{oAi} ——初始井网中各角生产井的横、纵坐标, m ; q_{oE} ——初始井网中各边生产井的产量, m^3/d ; x_{oEi}, y_{oEi} ——初始井网中各边生产井的横、纵坐标, m ; ϕ_M ——任意点 M 处的势, 无量纲; x_{ai}, y_{ai} ——初始井网中任意点距各角生产井在 x 和 y 方向的距离, m ; x_{bi}, y_{bi} ——初始井网中任意点距各边生产井在 x 和 y 方向的距离, m ; q_o ——排状加密井网中中心生产井产量, m^3/d ; x_{wi}, y_{wi} ——排状加密井网中各注水井的横、纵坐标, m ; q_{oAi} ——排状加密井网中各角生产井的产量, m^3/d ; x_{oAi}, y_{oAi} ——排状加密井网中各角生产井的横、纵坐标, m ; q_{oEi} ——排状加密井网中各边生产井的产量, m^3/d ; x_{oEi}, y_{oEi} ——排状加密井网中各边生产井的横、纵坐标, m ; x_{ci}, y_{ci} ——排状加密井网中任意点距各注水井在 x 和 y 方向的距离, m ; x_{di}, y_{di} ——排状加密井网中任意点距各角生产井在 x 和 y 方向的距离, m ; x_{ei}, y_{ei} ——排状加密井网中任意点距各边生产井在 x 和 y 方向的距离, m ; R_T ——研究区域的总面积, m^2 ; R ——研究区域内驱动压力梯度高于某值时的面积, m^2 ; R_D ——无因次动用范围, 无量纲; N_D ——无因次动用提高程度, 无量纲; N ——研究范围内驱动压力梯

度增量高于某值时的面积, m^2 ; N_T ——研究范围内储量动用程度提高区域的总面积, m^2 。

参考文献

- [1] 邱伟娇.非均质渗透率构型的低渗透油藏渗流特征研究[D].大庆:东北石油大学,2017:8-10.
DI Weijiao. Based on configuration parameters seepage characteristics fluid mechanics theoretical research of low-permeability heterogeneous reservoir [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017: 8-10.
- [2] 陈民锋,王兆琪,张琪琛,等.启动压力影响下注采井间有效驱替规律[J].深圳大学学报:理工版,2017,34(1):91-97.
CHEN Minfeng, WANG Zhaoqi, ZHANG Qichen, et al. Effective displacement rules for interwell with threshold pressure [J]. Journal of Shenzhen University: Science & Engineering, 2017, 34(1): 91-97.
- [3] 罗宪波,李波,刘英,等.存在启动压力梯度时储层动用半径的确定[J].中国海上油气,2009,21(4):248-250.
LUO Xianbo, LI Bo, LIU Ying, et al. The determination of drainage radius for reservoirs with a start-up pressure gradient [J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(4): 248-250.
- [4] 翟云芳.渗流力学[M].北京:石油工业出版社,2003:134-137.
ZHAI Yunfang. Mechanics of flow through porous media [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 134-137.
- [5] 邱淑霞,徐鹏,郁伯铭.各向异性多孔介质中径向渗流的分形分析[C]//卢义玉.渗流力学与工程的创新与实践——第十一届全国渗流力学学术大会论文集.重庆:重庆大学出版社,2011:481-486.
QIU Shuxia, XU Peng, YU Boming. Fractal analysis of radial seepage in anisotropic porous media [C]//LU Yiyu. Innovation and Practice of Seepage Mechanics and Engineering—Proceedings of the 11th National Congress of Seepage Mechanics. Chongqing: Chongqing University Press, 2011: 481-486.
- [6] 谢伟伟,王晓冬,董文秀,等.低渗透各向异性油藏中五点井网优化[J].科学技术与工程,2017,17(34):43-48.
XIE Weiwei, WANG Xiaodong, DONG Wenxiu, et al. Design of five-spot well patterns in low-permeability anisotropic oil reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(34): 43-48.
- [7] 陆程,程敏华,刘雄.平面各向异性油藏变形五点井网研究[J].特种油气藏,2013,20(3):111-113,126.
LU Cheng, CHENG Minhua, LIU Xiong. Research on skewed five-spot pattern for planar anisotropic reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(3): 111-113, 126.
- [8] 胡利民,程时清,唐蕾,等.超低渗透油藏菱形反九点井网合理排距[J].大庆石油地质与开发,2018,37(2):62-68.
HU Limin, CHENG Shiqing, TANG Lei, et al. Reasonable row spacing of the diamond inverted nine-spot well pattern in ultra-low permeability oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(2): 62-68.
- [9] 冯其红,王相,王端平,等.考虑渗透率张量的各向异性油藏流线模拟方法[J].中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(1):75-80.
FENG Qihong, WANG Xiang, WANG Duanping, et al. A streamline simulation method for heterogeneous oil reservoirs considering permeability tensor [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Sciences, 2014, 38(1): 75-80.
- [10] 杨明,刘英宪,陈存良,等.复杂断块油藏不规则注采井网平面均衡驱替方法[J].断块油气田,2019,26(6):756-760.
YANG Ming, LIU Yingxian, CHEN Cunliang, et al. Equilibrium displacement of irregular injection-production pattern in complex fault block reservoir [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(6): 756-760.
- [11] 肖佳林,刘德华.各向异性多层砂岩油藏矢量化井网研究[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2010,12(6):38-40.
XIAO Jialin, LIU Dehua. Study on anisotropy multilayer sand reservoir with vectorization well pattern [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2010, 12(6): 38-40.
- [12] 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.
- [13] 赵春森,许秋石,孙广义,等.低渗透油藏各向异性交错井网优化[J].油气田地面工程,2010,29(11):17-18.
ZHAO Chunsen, XU Qiushi, SUN Guangyi, et al. Optimal study on anisotropic staggered well pattern in low permeability reservoir [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2010, 29(11): 17-18.
- [14] 肖武.非均质水驱油藏无因次采液指数曲线的预测及应用[J].油气地质与采收率,2019,26(5):127-131.
XIAO Wu. Prediction and application of dimensionless fluid production index curve in heterogeneous water flooding reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 127-131.
- [15] 常会江,孙广义,陈晓明,等.基于均衡驱替的平面注采优化研究与应用[J].特种油气藏,2019,26(4):120-124.
CHANG Huijiang, SUN Guangyi, CHEN Xiaoming, et al. Lateral injection-production optimization and application based on balanced flooding [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(4): 120-124.
- [16] 阳晓燕.非均质油藏水驱开发效果研究[J].特种油气藏,2019,26(2):152-156.
YANG Xiaoyan. Waterflood development effect study of heterogeneous reservoir [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2): 152-156.
- [17] 柳涵,石成方,王继强,等.特高含水期油藏动用状况评价方法[J].大庆石油地质与开发,2019,38(3):73-79.
LIU Han, SHI Chengfang, WANG Jiqiang, et al. Evaluating method of the oil reservoir developed condition at ultra-high water-cut stage [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(3): 73-79.