

文章编号:1009-9603(2021)05-0100-09

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.05.012

各向异性油藏水平井加密矢量 组合井网合理调整策略

屈丹^{1,2}, 陈民锋^{1,3}, 毛梅芬¹, 杨子由¹, 杨金欣¹

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司, 重庆 408014;
3. 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)

摘要:各向异性油藏经长期水驱开发后,常表现出平面驱替不均衡、开发效果差的特点,为实现水驱液流改向、提高储量动用效果,达到均衡驱替开发,如何有效进行井网调整是关键。采用在反九点直井井网的对角油井间加密水平井的方式,利用渗流力学保角变换和镜像反映原理,建立井间对角线加密水平井注采井网渗流模型,并提出评价注采井网储量动用能力及动用效果的方法。结合油田实际参数,分析在储层具有渗透率各向异性的条件下,水平井加密后注采单元中的储量动用规律;综合储量动用效果和开发实施条件,确定了各向异性油藏井间对角线加密水平井的合理长度及开发制度。结果表明,该水平井加密模式对储层具有渗透率各向异性时有较好的适应性,加密水平井合理长度约为原井网对角线井间长度的0.5倍。

关键词:各向异性;水平井;加密调整;渗流模型;渗流场分布;调整策略

中图分类号:TE341

文献标识码:A

Reasonable adjustment strategy of horizontal well infill vector combination well pattern in anisotropic reservoir

QU Dan^{1,2}, CHEN Minfeng^{1,3}, MAO Meifen¹, YANG Ziyou¹, YANG Jinxin¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China; 2. SINOPEC Chongqing Fuling Shale Gas Exploration and Development Co., Ltd., Chongqing City, 408014, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: After long-term waterflooding development, anisotropic oil reservoirs often show uneven planar flooding and poor development effects. How to effectively adjust the well pattern is the key to redirection of waterflooding fluid flow, enhanced producing reserves, and balanced flooding development. The infill horizontal wells between diagonal oil wells with the inverted nine-point vertical well pattern are adopted, and the conformal transformation and the principle of mirror reflection of seepage mechanics are employed to create a seepage model of the injection-production pattern of diagonal infill horizontal wells. In addition, a method to evaluate the producing reserves capacity and effect of the injection-production well pattern is proposed. In light of the actual parameters of the oilfield, the law of producing reserves in the injection-production unit after horizontal well infill is analyzed in the reservoirs with anisotropic permeabilities. With regard to the effect of producing reserves and development conditions, the reasonable length and development system of diagonal infill horizontal wells between wells in anisotropic reservoirs have been determined. The results show that the horizontal well infill mode has good adaptability in the reservoirs with anisotropic permeabilities; the reasonable horizontal well infill length is about 0.5 times the diagonal interwell length of the original well pattern.

Key words: anisotropy; horizontal well; infill adjustment; seepage model; seepage field distribution; adjustment strategy

收稿日期:2021-01-21。

作者简介:屈丹(1996-),女,重庆万州人,硕士,从事油田开发系统理论方法研究工作。E-mail:qudan96@126.com。

通信作者:陈民锋(1971-),男,河南清丰人,副教授,博士。E-mail:cmfllp96@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“油气资产价值评估体系研究”(2016ZX05033005-007)。

由于储层沉积物性变化、油藏内部存在裂缝等的影响,油藏平面上呈渗透率各向异性,其影响随着生产开发的进行逐渐凸显,常表现为储量动用程度低、不同区域开发效果差异大,注水沿主渗流方向突进、平面驱替不均衡^[1-3]。为缓解油田开发生产后期出现的问题,以提高油藏开发效果,常采用转注或加密等调整方式对油田开发基础井网进行调整^[4-6]。将水平井加密到基础直井井网形成组合井网,一方面可充分利用基础井网、节约成本,另一方面可增强区域的生产能力,有利于水驱均衡驱替^[7-13]。目前各向异性油藏井网渗流场的研究主要集中在井网部署前,研究其适宜的井排距及部署方向以指导实际开发^[14-20];而当原始基础井网确定后,主渗流方向与井排距方向呈一定角度时,渗透率各向异性对加密调整井的影响研究较少。

海上油田开发风险性高,投资成本大,需全面、深入研究以确定井网合理调整技术策略。为此,笔者基于渤海HD油田,考虑油田特点建立渗流模型,研究水平井部署后注采单元渗流场变化以及注采单元储量有效动用规律,分析不同因素对提高储量动用效果的影响,进而确定水平井合理加密技术界限,为后期结合油藏实际模型的数值模拟等相关研究奠定理论基础。

1 储层渗透率各向异性的影响及其调整

1.1 HD油田注采井网调整设想

渤海HD油田储层为河流相沉积,平均渗透率为2 339 mD,地层原油黏度为78 mPa·s,主力层有效厚度为20 m,油田初期采用350 m×350 m的正方形反九点直井井网进行注水开发。随着注水开发

的深入,逐渐暴露出井网密度较低、单井控制储量较大以及注水井数较少、油井水驱受效弱等问题。主渗流方向与井网排向呈一定角度,井网动用不均衡;另外由于原油黏度较高、水驱稠油渗流阻力大等影响,水井连线上动用较弱,需在主力油层上进行井网整体加密调整,提高水驱开发效果。

考虑在基础反九点直井井网中,首先将角井转注,然后在对角线油井的井间区域加密水平井,形成转向为45°的一排油井与一排水井的排状注采井网(图1)。加密水平井后形成的组合注采井网,一方面缩小了注采井距、提高了井间驱动压力梯度,扩大了水驱波及面积;另一方面实现了整体液流改向,可有效增大原弱动用区的动用强度。

典型注采单元由水平采油井、两侧直井采油井及正对两侧直井注水井组成。为方便后续计算与求解,将典型注采单元旋转45°(图2)。通过建立典型注采单元的渗流模型,研究加密水平井后对基础井网渗流场的影响。结合实际油藏参数,研究井间对角线加密水平井组合井网的储量动用规律,分析比较不同条件对储量动用影响,确定反九点直井井网对角线井间加密水平井的合理长度及开发制度。

1.2 典型注采单元渗流模型的建立及求解

1.2.1 注采单元中势的求解

模型基本假设条件为:①油藏中流体的流动为单相流体稳定渗流。②不考虑岩石及流体压缩性。③主渗流方向与基础井网井排方向的角度取45°,即主渗流方向为井网对角油井连线方向。

根据渗流力学理论,为方便求解,将物平面中的渗流问题通过保角变换转换成像平面中进行求解,将解析解通过逆变换到物平面中即可得到任一点的势。在物平面中,基于典型注采单元,以水平井中心为原点建立平面直角坐标系(图3)。将水平

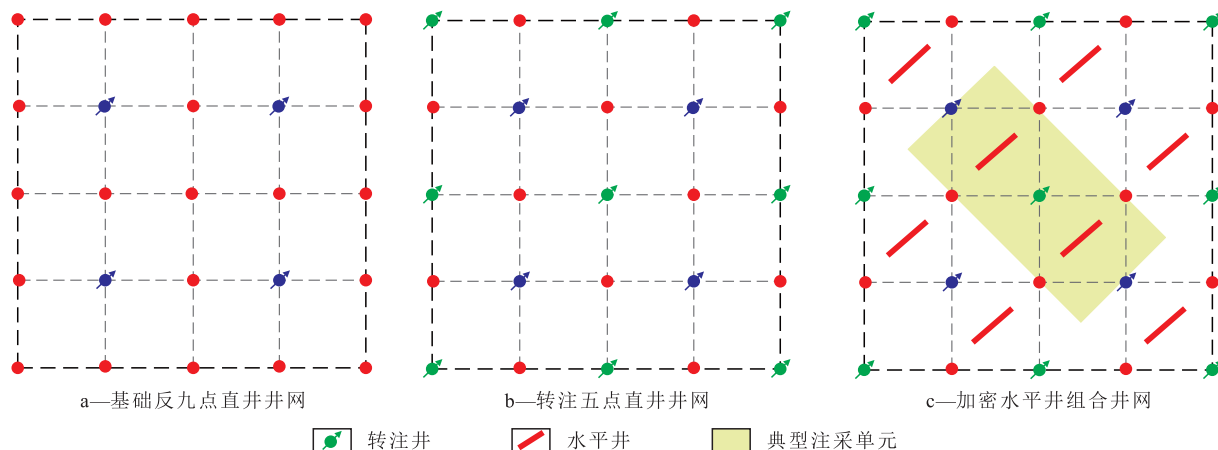


图1 井间对角线加密水平井基本形式

Fig.1 Basic form of diagonal infill horizontal wells

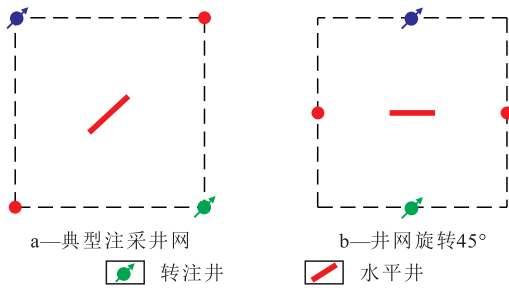


图2 典型注采单元
Fig.2 Typical injection-production unit

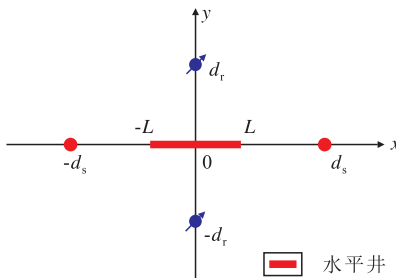


图3 典型注采单元物平面示意
Fig.3 Plane diagram of typical injection-production unit

井左右两侧直井采油井依次标号为1号采油井和2号采油井,水平井上下两侧直井注水井依次标号为1号注水井和2号注水井, x 轴方向为主渗流方向。

为方便求解,通过坐标变换将各向异性油藏转化为等价各向同性油藏,取变换式为:

$$\begin{cases} X = x \sqrt{\frac{K_e}{K_x}} \\ Y = y \sqrt{\frac{K_e}{K_y}} \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$K_e = \sqrt{K_x K_y} \quad (2)$$

变换后的水平井长度为:

$$L' = L \sqrt{\frac{K_e}{K_x}} \quad (3)$$

采油井和注水井距中心点距离分别为:

$$d'_s = d_s \sqrt{\frac{K_e}{K_x}} \quad (4)$$

$$d'_r = d_r \sqrt{\frac{K_e}{K_y}} \quad (5)$$

根据组合井网基本注采对应关系,利用渗流力学中保角变换对物平面进行映射、转换。取保角变换为:

$$z = L'chw \quad (6)$$

同时:

$$z = X + iY \quad (7)$$

$$w = \xi + i\eta \quad (8)$$

根据(1)式得到物平面与像平面坐标对应关系为:

$$\begin{cases} X = L'ch\xi \cos\eta \\ Y = L'sh\xi \sin\eta \end{cases} \quad (9)$$

由(9)式可得:

$$\frac{X^2}{L'^2 ch^2 \xi} + \frac{Y^2}{L'^2 sh^2 \xi} = \cos^2 \eta + \sin^2 \eta = 1 \quad (10)$$

由(10)式可求取物平面上相应的 (X, Y) 与像平面的位置对应关系为:

$$\begin{cases} ch^2 \xi = \frac{1}{2L'^2} \times \\ \left[X^2 + Y^2 + L'^2 + \sqrt{(X^2 + Y^2 + L'^2)^2 - 4X^2 L'^2} \right] \\ sh^2 \xi = \frac{1}{2L'^2} \times \\ \left[X^2 + Y^2 - L'^2 + \sqrt{(X^2 + Y^2 + L'^2)^2 - 4X^2 L'^2} \right] \\ \cos^2 \eta = \frac{1}{2L'^2} \times \\ \left[X^2 + Y^2 + L'^2 - \sqrt{(X^2 + Y^2 + L'^2)^2 - 4X^2 L'^2} \right] \\ \sin^2 \eta = \frac{1}{2L'^2} \times \\ \left[-X^2 - Y^2 + L'^2 + \sqrt{(X^2 + Y^2 + L'^2)^2 - 4X^2 L'^2} \right] \end{cases} \quad (11)$$

由(11)式映射后,物平面上半部分变为像平面上宽度为 π 的区域,水平井位于 η 轴的0到 π 之间。

物平面上相应的 (X, Y) 在像平面的位置如图4所示。

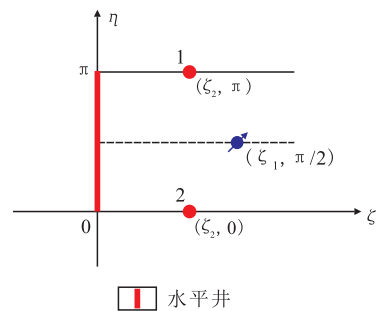


图4 典型注采单元像平面示意

Fig.4 Image plane diagram of typical injection-production unit

其中,物平面中直井井点坐标经过(9)式转换后,在像平面中横坐标满足的关系式为:

$$\begin{cases} \xi_1 = \operatorname{arcsch} \frac{d'_r}{L'} \\ \xi_2 = \operatorname{arcch} \frac{d'_s}{L'} \end{cases} \quad (12)$$

以像平面 $(\xi_2, 0)$ 和 (ξ_2, π) 处的采油井为例(其

余井同理可得),由镜像反映法,可映射出一列无限注水井排与一系列无限采油井排(图5)。

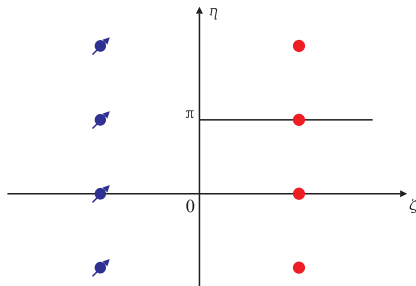


图5 镜像反映法示意

Fig.5 Schematic diagram of mirror reflection method

采油井在像平面上由镜像反映法映射出的无限采油井排及无限注水井排的坐标可依次归纳为:

$$\begin{cases} (-\xi_2, n\pi) & n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \\ (\xi_2, n\pi) & n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases} \quad (13)$$

无限大地层平面中任一点势的表达式为:

$$\phi = \frac{q}{2\pi} \ln \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} + C \quad (14)$$

其中:

$$q = \frac{Q}{h} \quad (15)$$

通过(14)式及势的叠加原理,将平面上各点源(汇)产生的势进行叠加,可得采油井共同在平面一点产生的势为:

$$\phi_2 = \frac{q_2}{4\pi} \sum_{-\infty}^{+\infty} \ln \frac{\sqrt{(\xi - \xi_1)^2 + (\eta - n\pi)^2}}{\sqrt{(\xi + \xi_1)^2 + (\eta - n\pi)^2}} + C \quad (16)$$

利用贝塞尔公式:

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} \ln [(x - x_1)^2 + (y - nh - y_1)^2] = \ln \left[\operatorname{ch} \frac{2\pi(x - x_1)}{h} - \cos \frac{2\pi(y - y_1)}{h} \right] \quad (17)$$

可将(16)式化简为:

$$\phi_2 = \frac{q_2}{4\pi} \ln \left[\frac{\operatorname{ch} 2(\xi - \xi_2) - \cos 2\eta}{\operatorname{ch} 2(\xi + \xi_2) - \cos 2\eta} \right] + C \quad (18)$$

根据上述方法,同理可得 $(\xi_1, \frac{\pi}{2})$ 处注水井在像平面上任一点产生的势为:

$$\phi_1 = \frac{q_1}{4\pi} \ln \left[\frac{\operatorname{ch} 2(\xi + \xi_1) - \cos 2\left(\eta - \frac{\pi}{2}\right)}{\operatorname{ch} 2(\xi - \xi_1) - \cos 2\left(\eta - \frac{\pi}{2}\right)} \right] + C \quad (19)$$

由(18)式和(19)式,通过势叠加可得注采单元在像平面中任一点产生的势为:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{单元}} = & \frac{q_1}{4\pi} \ln \left[\frac{\operatorname{ch} 2(\xi + \xi_1) - \cos 2\left(\eta - \frac{\pi}{2}\right)}{\operatorname{ch} 2(\xi - \xi_1) - \cos 2\left(\eta - \frac{\pi}{2}\right)} \right] + \\ & \frac{q_2}{4\pi} \ln \left[\frac{\operatorname{ch} 2(\xi - \xi_2) - \cos 2\eta}{\operatorname{ch} 2(\xi + \xi_2) - \cos 2\eta} \right] + C \quad (20) \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{cases} \xi_1 = \operatorname{arcsch} \frac{d_r \sqrt{K_x}}{L' \sqrt{K_y}} \\ \xi_2 = \operatorname{arccch} \frac{d_s}{L} \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \operatorname{ch}^2 \xi = \frac{1}{2L^2} \times \left[x^2 + y^2 \frac{K_x}{K_y} + L^2 + \sqrt{\left(x^2 + y^2 \frac{K_x}{K_y} + L^2\right)^2 - 4x^2 L^2} \right] \\ \operatorname{sh}^2 \xi = \frac{1}{2L^2} \times \left[x^2 + y^2 \frac{K_x}{K_y} - L^2 + \sqrt{\left(x^2 + y^2 \frac{K_x}{K_y} + L^2\right)^2 - 4x^2 L^2} \right] \\ \cos^2 \eta = \frac{1}{2L^2} \times \left[x^2 + y^2 \frac{K_x}{K_y} + L^2 - \sqrt{\left(x^2 + y^2 \frac{K_x}{K_y} + L^2\right)^2 - 4x^2 L^2} \right] \\ \sin^2 \eta = \frac{1}{2L^2} \times \left[-x^2 - y^2 \frac{K_x}{K_y} + L^2 + \sqrt{\left(x^2 + y^2 \frac{K_x}{K_y} + L^2\right)^2 - 4x^2 L^2} \right] \end{cases} \quad (22)$$

基于(20)式,根据物平面与像平面之间的坐标对应关系,将像平面上的位置反演到物平面上,即可得到该注采井组在物平面上任一点产生的势。

1.2.2 注采单元中流函数的求解

基于任一点的势函数(20)式,结合柯西-黎曼条件 $\frac{\partial \phi}{\partial \xi} = \frac{\partial \psi}{\partial \eta}$ 和 $\frac{\partial \psi}{\partial \xi} = -\frac{\partial \phi}{\partial \eta}$,可求得注采井组中对应的流函数。

平面中任意一点的流函数为:

$$\psi_{\text{单元}} = \psi_1 + \psi_2 \quad (23)$$

其中:

$$\psi_1 = \frac{q_1}{4\pi} \left\{ \begin{array}{l} 2\text{sh}(\xi + \xi_1) \arctan \left[\frac{\tan \frac{\eta}{2} \text{ch}(\xi + \xi_1) + 1}{|\text{sh}(\xi + \xi_1)|} \right] \\ \hline |\text{sh}(\xi + \xi_1)| \\ 2\text{sh}(\xi + \xi_1) \arctan \left[\frac{\tan \frac{\eta}{2} \text{ch}(\xi + \xi_1) - 1}{|\text{sh}(\xi + \xi_1)|} \right] \\ \hline |\text{sh}(\xi + \xi_1)| \\ 2\text{sh}(\xi - \xi_1) \arctan \left[\frac{\tan \frac{\eta}{2} \text{ch}(\xi - \xi_1) + 1}{|\text{sh}(\xi - \xi_1)|} \right] \\ \hline |\text{sh}(\xi - \xi_1)| \\ 2\text{sh}(\xi - \xi_1) \arctan \left[\frac{\tan \frac{\eta}{2} \text{ch}(\xi - \xi_1) - 1}{|\text{sh}(\xi - \xi_1)|} \right] \\ \hline |\text{sh}(\xi - \xi_1)| \end{array} \right\} \quad (24)$$

$$\psi_2 = \frac{q_2}{4\pi} \left\{ \begin{array}{l} 2\text{sh}(\xi - \xi_2) \arctan \left[\frac{\tan \frac{\eta}{2} |\text{sh}(\xi - \xi_2)|}{\text{ch}(\xi - \xi_2) + 1} \right] \\ \hline |\text{sh}(\xi - \xi_2)| \\ 2\text{sh}(\xi - \xi_2) \arctan \left[\frac{\tan \frac{\eta}{2} |\text{sh}(\xi - \xi_2)|}{\text{ch}(\xi - \xi_2) - 1} \right] \\ \hline |\text{sh}(\xi - \xi_2)| \\ 2\text{sh}(\xi - \xi_2) \arctan \left[\frac{\tan \frac{\eta}{2} |\text{sh}(\xi - \xi_2)|}{\text{ch}(\xi - \xi_2) + 1} \right] \\ \hline |\text{sh}(\xi - \xi_2)| \\ 2\text{sh}(\xi - \xi_2) \arctan \left[\frac{\tan \frac{\eta}{2} |\text{sh}(\xi - \xi_2)|}{\text{ch}(\xi - \xi_2) - 1} \right] \\ \hline |\text{sh}(\xi - \xi_2)| \end{array} \right\} \quad (25)$$

利用前述方法,可计算典型注采井网单元中渗流场的分布,分析不同条件下注采单元储量动用规

律,为确定合理调整策略奠定基础。

1.3 注采单元中储量动用效果的评价方法

1.3.1 反映储量动用能力的表征方法

在均值、等厚地层中,当渗透率和流体黏度为定值时,流体渗流速度与该处流体的压力梯度成正比:

$$v = -\frac{K}{\mu} \text{grad}(p) \quad (26)$$

压力梯度越大,流体渗流速度越大,相应地该处储量动用能力越好。通过以下渗流场中势与压力的关系,可求取平面渗流场中任一点处的驱动压力梯度:

$$d\phi = \frac{K}{\mu} dp \quad (27)$$

基于推导的平面势函数,可求取平面任一点压力,定义平面横向、纵向驱动压力梯度分别为:

$$\nabla p_x = \frac{p(i,j) - p(i-1,j)}{dy} \quad (28)$$

$i = 2, 3, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N$

$$\nabla p_y = \frac{p(i,j) - p(i,j-1)}{dx} \quad (29)$$

$i = 1, 2, \dots, N; j = 2, 3, \dots, N$

∇p_x 与 ∇p_y 为矢量,方向分别为 x 轴正方向与 y 轴正方向。总驱动压力梯度为:

$$\nabla p = \sqrt{\nabla p_x^2 + \nabla p_y^2} \quad (30)$$

总驱动压力梯度反映了油藏内驱动流体流动能量,流体流动能力反映此区域能否动用;某一位置的总驱动压力梯度越大,流体越易流动,储量动用能力越强。

在图1注采单元中,控制面积为 S_0 ,当驱动压力梯度大于某一值 ∇p_k 时,其等值线在注采单元中包络的面积定义为动用范围 S_k 。为统一对比条件,定义无因次动用范围为:

$$S_{Dk} = \frac{S_k}{S_0} \quad 0 < S_{Dk} \leq 1 \quad (31)$$

无因次动用范围越大,注采单元中的储量动用效果越好。根据分析,可用注采单元中驱动压力梯度分布和占有范围来评价储量动用能力。统计井网注采单元的渗流场分布,作出无因次动用范围与驱动压力梯度的关系曲线,分析注采单元的储量有效动用情况。

1.3.2 反映储量动用效果的表征方法

定义无因次动用强度来表征注采井网单元中整体储量有效动用效果。注采单元控制面积中,不同驱动压力梯度(区间)等值线包络的无因次面积,与对应驱动压力梯度的乘积,进行累积取和,即为

无因次动用强度:

$$T_D = \sum S_{Dk} \times \nabla p_k \quad (32)$$

无因次动用强度越大,表示该条件下单位无因次面积内的驱动力越大,注采单元中的储量动用效果越好。

定义驱替均衡系数来表征注采井网单元中驱替均衡状况(0~1),越趋近1越均衡:

$$T_E = \frac{\bar{S}_n}{S_{n \max}} \quad (33)$$

根据不同条件下渗流场分布,作出无因次动用强度和驱替均衡系数的变化曲线,综合分析不同因素对储量有效动用效果的影响。

2 直井-水平井井网渗流规律

2.1 加密水平井对注采单元渗流场的影响

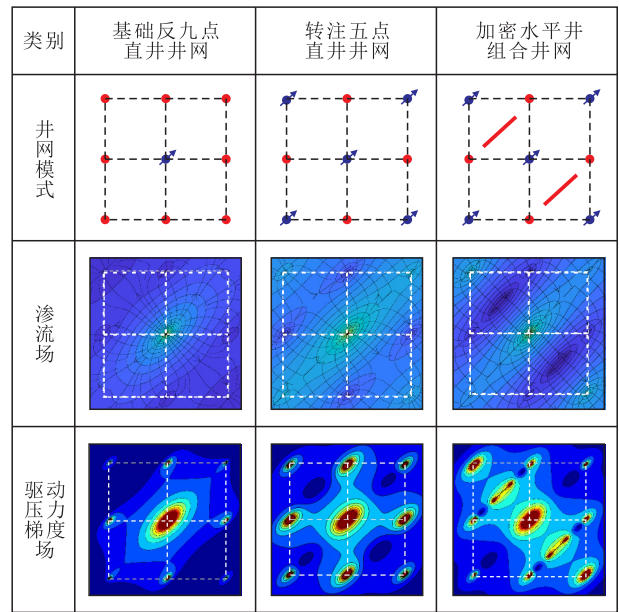
某油田基本参数包括:井网井排距为350 m,水平井长度为200 m,中心直井注水井的日注入量为120 m³/d,井网单元中保持整体注采平衡。根据新建立的方法,对典型的反九点直井井网及其水平井加密后的组合井网进行渗流场的计算与研究(图6)。

基于渗流场计算结果,对比井网调整前后储量动用能力的变化,研究发现:①基础反九点直井井网中流线集中于主渗流方向,垂直于主渗流方向上2口油井流线稀疏、驱动压力梯度小,储量有效动用程度低,需通过转注及加密等措施完善注采井网。②部署水平井后,降低了对角井间连线上的势,垂直于主渗流方向上流线增多,呈线性驱替,较基础反九点直井井网更为均衡,实现了液流改向。③水平井加密部署至基础反九点直井井网中后,基础井网中垂直于主渗流方向上的弱动用区的驱动压力梯度显著增强,有效地提升了整个井网单元的注采强度。

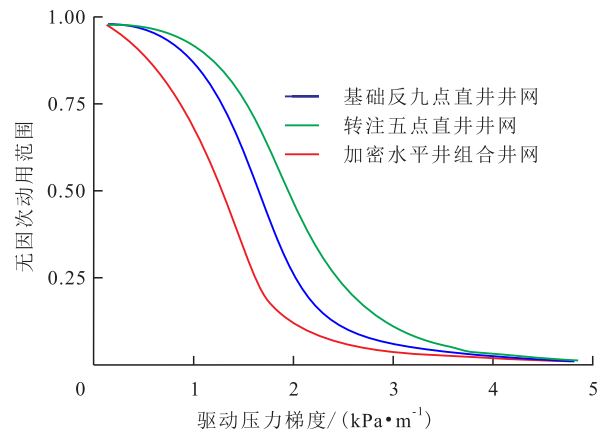
2.2 储层各向异性对水平井加密效果的影响

计算对比不同储层各向异性条件下注采井网单元渗流场,并统计分析储层各向异性对储量动用效果的影响,以确定调整后组合井网对各向异性油藏的适应性。与图6中 $K_x/K_y=5$ 进行对比,在相同注采条件下,分别计算 $K_x/K_y=1, K_x/K_y=10$ 时注采单元渗流场以及各驱动压力梯度下无因次动用范围变化(图7)。

由图7可以看出:在注采单元渗流场中,主渗流方向上储层渗透率各向异性越强,流线越呈线性驱替;井间对角线区域中的高驱动压力梯度范围越



在渗流场分布中,蓝色越深,反映该位置处的势越小;红色越深,反映该位置处的势越大;流线箭头反映注入井流向生产井,流线越密集,反映该位置处流量越大。在驱动压力梯度场分布中,蓝色越深,反映该位置处的驱动压力梯度越小;红色越深,反映该位置处的驱动压力梯度越大
a—不同井网条件下的渗流场及驱动压力梯度场

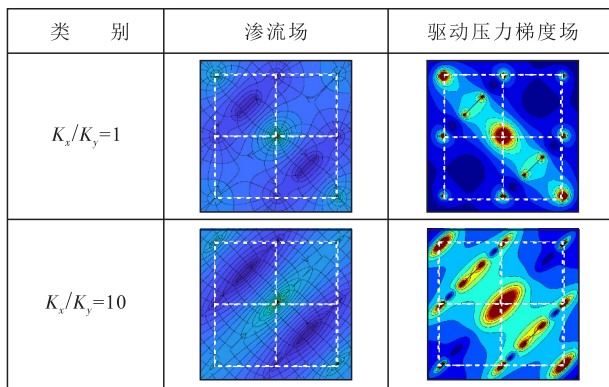


b—不同井网条件下无因次动用范围
图6 加密水平井前后注采井网渗流场及动用情况对比
Fig.6 Comparison between seepage fields and producing reserves ranges of injection-production well pattern before and after horizontal well infill

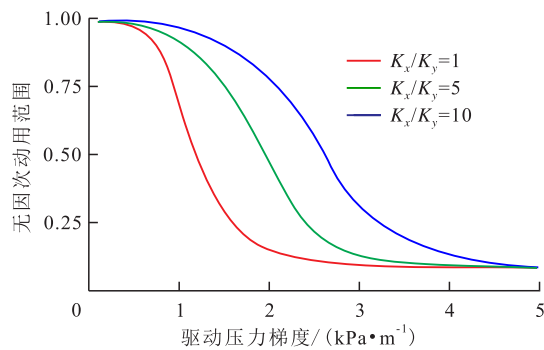
大,启动了较多弱动用区,井网动用越均衡。随着渗透率各向异性强度的增大,在相同驱动压力梯度下,无因次动用范围越大,即该水平井加密模式对渗透率各向异性油藏有较好的适应性,且各向异性越强,调整效果越好。

3 加密水平井的合理调控策略

根据建立的注采单元储量动用效果分析评价方法,定量研究在渗透率各向异性油藏中,基于基础反九点直井井网加密水平井方式下,进行注采调



a—不同各向异性条件下的渗流场及驱动压力梯度场



b—不同各向异性条件下无因次动用范围

图7 不同各向异性条件下注采井网渗流场及动用情况对比

Fig.7 Comparison between seepage fields and producing reserves ranges of injection-production well patterns under different anisotropy conditions

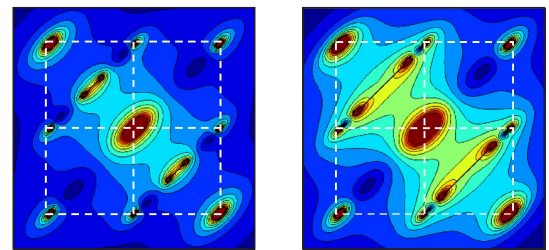
控的关键参数技术界限——水平井合理长度、水平井产液量。

3.1 加密水平井合理长度

油田实际井网为350 m×350 m基础反九点直井井网,对角线上两井间的距离约为500 m,加密水平井的长度受到一定的限制。根据油田开发经验和相关理论认识,加密水平井长度需同时考虑油田产量、避免井间干扰(不超过井间距离的2/3)和过早见水的要求,水平井长度为100~300 m。

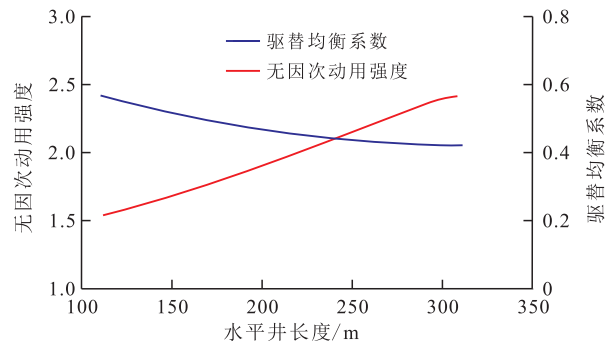
取水平井长度分别为100,150,200,250和300 m,在相同生产条件下,保持整体注采平衡,计算不同水平井长度下注采单元驱动压力梯度场和储量动用变化(图8)。

由图8可以看出:①在注采单元驱动压力梯度场中,水平井长度越长,井间对角线区域的高驱动压力梯度条带越宽,该区域动用范围越大,更多弱动用区的动用能力增大,整体提高了单元储量动用程度。②随着水平井长度的增大,井网单元中无因次动用强度随之增大,储量动用强度越大,但更多的集中在对角线高动用区,井网单元驱替均衡程度



a—水平井长度为100 m 驱动压力梯度场

b—水平井长度为300 m 驱动压力梯度场



c—不同水平井长度条件下储量动用效果

图8 不同水平井长度条件下驱动压力梯度场及动用效果对比

Fig.8 Comparison between drive pressure gradient fields and effects of producing reserves with different horizontal well lengths

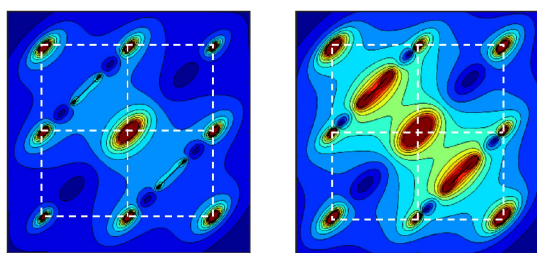
降低。水平井长度越长,储量动用程度越高,但井网驱替均衡系数降低,同时经济投入也相应增大。综合考虑投资及成本、产量和均衡驱替效果,选取合理长度为250~300 m,约为原井网对角线井间长度的0.5倍。

3.2 合理水平井/直井产液比

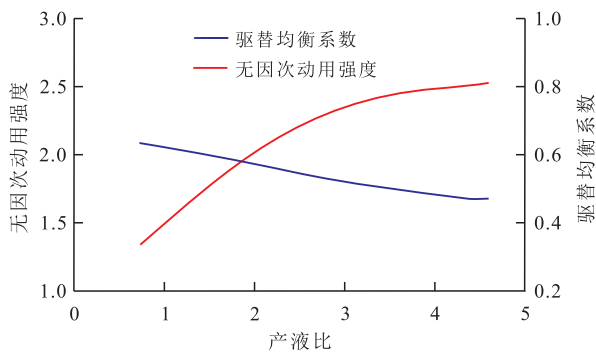
在加密水平井后的注采井网中,水平井产液量的高低直接影响着注采单元中渗流场分布规律和储量动用效果。根据油田开发经验和相关理论认识,水平井产液量应同时考虑产量要求、避免对周围井的干扰和过早见水的要求,一般是周围直井产液量的2~3倍以上。

考虑相邻直井的产液量来调配合适的水平井产液量,以期获得最佳的驱替效果。以直井产液量为基准对比条件,取水平井与直井产液比分别为1,2,3,4和5,整个注采单元保持注采平衡,计算不同产液比下注采单元驱动压力梯度场分布和储量动用的变化规律。

由图9可知:①在井网注采单元驱动压力梯度场中,水平井/直井产液比越大,对角线高驱动压力梯度条带驱替程度越大,但井间对角线区域的注采强度提高的同时,拉大了与周围区域的差异,产液比越高,流动越集中于对角线上的区域内。②随着水平井/直井产液比的增大,无因次动用强度随之增大,储量动用强度越大,但更多的集中在对角线高



a—产液比为1驱动压力梯度场 b—产液比为4驱动压力梯度场



c—不同产液比条件下储量动用效果

图9 不同产液比驱动压力梯度场及动用效果对比

Fig.9 Comparison between drive pressure gradient fields and effects of producing reserves under different liquid production ratios

动用区,井网单元驱替均衡程度降低。考虑井网动用程度的同时,为实现整个注采单元的驱替效果相对均衡,合理水平井/直井产液比应控制在3.0~3.5。

4 结论

基于基础反九点注采井网,建立了井间对角线加密水平井组合井网的渗流模型,可定量计算不同条件下渗流场分布变化,直观反映驱替能力和驱替效果。建立注采井网储量动用效果的评价方法,定量表征不同条件下加密水平井改变反九点直井井网渗流场的作用,以及加密调整后注采单元中的储量变化规律。结合油田实际,综合储量动用效果和开发实施条件,确定了基础反九点注采井网对角线加密水平井的关键技术策略,水平井合理长度约为250~300 m(约为原井网对角线井间长度的0.5倍),合理水平井与原直井的产液比应控制在3.0~3.5。

符号解释

- C ——常数;
- d_r ——原注水井距中心点距离, m;
- d_r' ——坐标变换后注水井距中心点距离, m;
- d_s ——原采油井距中心点距离, m;
- d_s' ——坐标变换后采油井距中心点距离, m;
- h ——储层厚度, m;

- i ——虚数单位;
- j ——列数;
- n ——整数;
- N ——正整数;
- K ——油藏渗透率, mD;
- K_e ——油藏综合渗透率, mD;
- K_x ——沿 x 方向上渗透率, mD;
- K_y ——沿 y 方向上渗透率, mD;
- L ——原水平井长度, m;
- L' ——变换后水平井长度, m;
- p ——压力, MPa;
- ∇p ——总驱动压力梯度, MPa/m;
- ∇p_k ——驱动压力梯度, MPa/m;
- ∇p_x ——平面横向驱动压力梯度, MPa/m;
- ∇p_y ——平面纵向驱动压力梯度, MPa/m;
- q ——单位厚度下的日注入(产出)量, m²/d;
- q_1 ——单位厚度下注水井的日注入量, m²/d;
- q_2 ——单位厚度下采油井的日产出量, m²/d;
- Q ——点源(汇)的日注入(产出)量, m³/d;
- S_0 ——控制面积, m²;
- S_{Dk} ——无因次动用范围;
- S_k ——不同驱动压力梯度下的动用面积, 即动用范围, m²;
- S_n ——各驱动压力梯度区间的面积, m²;
- T_D ——无因次动用强度;
- T_E ——驱替均衡系数;
- v ——渗流速度, m/d;
- w ——像平面;
- x, y ——原各向异性油藏平面坐标;
- x_0, y_0 ——点源(汇)的坐标;
- x_1 ——平面上一定点的横坐标;
- y_1 ——平面上一定点的纵坐标;
- X, Y ——等价各向同性油藏平面坐标;
- z ——物平面;
- ϕ ——油藏中的势, m²/d;
- $\phi_{单元}$ ——井网单元在平面上任一点产生的势, m²/d;
- ϕ_1 ——注水井的势, m²/d;
- ϕ_2 ——采油井的势, m²/d;
- μ ——地层原油黏度, mPa·s;
- ξ, η ——像平面坐标;
- ξ_1 ——像平面上1井的横坐标;
- ξ_2 ——像平面上2井的横坐标;
- ψ ——流函数, m²/d;
- $\psi_{单元}$ ——注采单元流函数, m²/d;
- ψ_1 ——注水井的流函数, m²/d;
- ψ_2 ——采油井的流函数, m²/d。

参考文献

[1] 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.
- [2] 刘月田.各向异性油藏注水开发布井理论与方法[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.
- [3] 汪益宁,李洪,曹淑慧,等.各向异性底水油藏长水平井产能公式[J].油气地质与采收率,2016,23(4):108-111,116.
WANG Yining, LI Hong, CAO Shuhui, et al. Productivity formula for long horizontal well in anisotropic bottom-water reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(4): 108-111, 116.
- [4] 程大勇.组合井网水平井潜力评价指标及挖潜对策[J].特种油气藏,2019,26(6):88-92.
CHENG Dayong. Recovery countermeasures and potential indicators of horizontal wells in combination well pattern[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(6): 88-92.
- [5] 叶双江,姜汉桥,李俊键,等.混合井网条件下加密井产能计算模型及应用[J].计算物理,2011,28(5):693-697.
YE Shuangjiang, JIANG Hanqiao, LI Junjian, et al. Productivity calculation of infill horizontal wells in mixed well pattern[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2011, 28(5): 693-697.
- [6] 刘凡,周文胜,耿站立,等.复杂河流相稠油油田整体加密调整技术——以渤海A油田为例[J].石油地质与工程,2020,34(3):57-60.
LIU Fan, ZHOU Wensheng, GENG Zhanli, et al. Integral infilling adjustment technology of heavy oil field with complex fluvial facies—by taking Bohai A oilfield as an example[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(3): 57-60.
- [7] STONE T W, EDMUNDS N R, KRISTOFF B J. A comprehensive wellbore reservoir simulator[R]. SPE 18419, 1989.
- [8] COLLINS D A, NGHIEM L X, AGARWAL R K, et al. Field-scale simulation of horizontal wells with hybrid grids[R]. SPE 21218, 1991.
- [9] 刘月田.水平井整体井网渗流解析解[J].石油勘探与开发,2001,28(3):57-59,66.
LIU Yuetian. Analytic solution for flow through horizontal well network[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(3): 57-59, 66.
- [10] 赵春森.水平井与直井整体开发渗流理论研究[D].大庆:大庆石油学院,2001.
ZHAO Chunsen. The study of integral development percolation theory with horizontal well and vertical well[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2001.
- [11] 葛家理,刘月田,姚约东.现代油藏渗流力学原理[M].北京:石油工业出版社,2003:88-112.
GE Jiali, LIU Yuetian, YAO Yuedong. The modern mechanics of fluids flow in oil reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 88-112.
- [12] 曾晓晶,同登科.水平井水平段最优长度设计方法改进[J].石油勘探与开发,2011,38(2):216-220.
ZENG Xiaojing, TONG Dengke. An improvement of the design method of optimal horizontal wellbore length[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 216-220.
- [13] 凌宗发,王丽娟,胡永乐,等.水平井注采井网合理井距及注入量优化[J].石油勘探与开发,2008,35(1):85-91.
LING Zongfa, WANG Lijuan, HU Yongle, et al. Flood pattern optimization of horizontal well injection[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(1): 85-91.
- [14] 谢利成.鄂尔多斯盆地南部下寺湾蒲家沟水平井部署参数优化研究[J].非常规油气,2017,4(3):63-69.
XIE Licheng. Study on optimization of deployment parameters of horizontal wells in Pujiagou, Xiasiwan, southern Ordos Basin[J]. Unconventional Oil and Gas, 2017, 4(3): 63-69.
- [15] 吴小张,江聪,张博,等.直井注-水平井采组合井网优化研究及应用[J].复杂油气藏,2018,11(3):47-51.
WU Xiaozhang, JIANG Cong, ZHANG Bo, et al. Optimization and application of combined well pattern with vertical injector and horizontal producer[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2018, 11(3): 47-51.
- [16] 刘峰,陈小凡.各向异性油藏菱形反九点井网合理井排距研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2016,38(6):125-130.
LIU Feng, CHEN Xiaofan. Study on diamond inverted nine-spot well pattern reasonable well spacing for planar anisotropic reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Natural Science Edition, 2016, 38(6): 125-130.
- [17] 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.
- [18] 王福顺,刘鹏程,王文环,等.各向异性低渗透油藏菱形反九点井网压裂缝优化[J].现代地质,2018,32(3):547-553.
WANG Fushun, LIU Pengcheng, WANG Wenhuan, et al. Optimization study of fracturing length for rhombus inverse nine-spot diamond reverse well pattern in anisotropy reservoirs[J]. Geoscience, 2018, 32(3): 547-553.
- [19] 谢伟伟,王晓冬,牛丽娟.各向异性油藏中五点井网的变形作用[J].西南石油大学学报:自然科学版,2017,39(6):117-123.
XIE Weiwei, WANG Xiaodong, NIU Lijuan. Deformation of five-spot well patterns for anisotropic oil reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2017, 39(6): 117-123.
- [20] 杨子由,陈民锋,屈丹,等.特低渗透各向异性油藏井网加密储量动用规律[J].油气地质与采收率,2020,27(3):57-63.
YANG Ziyou, CHEN Minfeng, QU Dan, et al. Reserve producing law of extra-low permeability anisotropic reservoirs with infilled well pattern[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(3): 57-63.