

低渗透各向异性油藏菱形井网储量动用评价及设计优化

陈民锋^{1,2}, 杨子由³, 秦立峰², 付世雄², 荣金曦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; 3. 中海石油(中国)有限公司 天津分公司 渤海石油研究院, 天津 300459]

摘要: 确定菱形注采井网的合理注采井距和井排比, 是低渗透各向异性油藏实现储量有效动用和注采均衡驱替开发部署设计的关键。基于一般低渗透油藏特点, 建立了考虑启动压力梯度和渗透率各向异性影响的渗流方程, 利用经典渗流力学理论, 得到了菱形反九点井网注采单元中渗流场分布的解析解; 基于注采单元中平面渗流速度变化的分析, 提出了评价储量有效动用状况的方法, 得到了不同条件下低渗透各向异性油藏储量动用变化规律及主要影响因素; 以满足注采单元中“有效动用范围要求和均衡驱替系数最大”为优化目标, 建立了低渗透各向异性油藏菱形反九点井网优化的计算模型, 实现了菱形井网合理井距和最佳井排比的联立优化求解。实例分析表明, 根据建立的低渗透各向异性油藏菱形井网优化设计方法, 可以得到适合油藏实际条件和满足开发要求的合理井距和最佳井排比, 为此类油藏的有效开发和注采井网的优化部署提供了科学依据。

关键词: 储量有效动用; 均衡驱替; 优化设计; 各向异性; 菱形注采井网; 低渗透油藏; 油藏开发

中图分类号: TE348

文献标识码: A

Producing reserve estimation and design optimization of rhomboid well pattern in anisotropic reservoirs of low permeability

Chen Minfeng^{1,2}, Yang Ziyu³, Qin Lifeng², Fu Shixiong², Rong Jinxi²

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3. Bohai Oilfield Research Institute of Tianjin Branch, CNOOC, Tianjin 300459, China]

Abstract: Determining a well array with reasonable spacing for flooding in rhomboid well pattern, is the key to achieving effective development of reserves and well emplacement for equilibrium displacement development in regular low-permeability anisotropic reservoirs. Based on the characteristics of low-permeability reservoirs, we establish a seepage equation considering the influence of threshold pressure gradient and permeability anisotropy. Classical seepage mechanics is applied to obtain an analytical solution for the seepage field distribution in flooding unit of the rhomboid inverted nine-point well pattern. In turn, a method for evaluating the producing reserve is proposed in line with the analysis of the lateral seepage velocity variation in the flooding unit, and the main factors influencing and rules of producing reserve variation in low-permeability anisotropic reservoirs at different conditions are obtained. At last, a calculation model for optimizing the rhomboid inverted nine-point well pattern is built with the ultimate optimization purpose of meeting “requirement on effective producing reserve range and maximum equilibrium displacement coefficient”, and a simultaneous optimization for the best well array with reasonable spacing in this pattern is achieved. Case analysis shows that the rhomboid well pattern optimization design method for low-permeability anisotropic reservoirs can be applied to obtain the best well array with reasonable spacing in line with the actual conditions of the reservoir and the development requirements. The design in all, is of scientific basis to the effective development of reservoirs and optimal emplacement of well patterns.

Key words: effective reserve producing, equilibrium displacement, optimization design, anisotropy, rhomboid injection-production well pattern, low permeability reservoir, reservoir development

收稿日期: 2020-06-08; 修订日期: 2021-09-12。

第一作者简介: 陈民锋(1971—), 男, 博士, 油田开发系统理论方法和提高采收率技术。E-mail: cmfllp96@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05033005-007)。

中国有储量丰富的低渗透油藏,根据渗透率大小可划分为常规低渗透、特低渗和超低渗油藏等类型。由于启动压力梯度的影响存在一定的滞留区,此类油藏渗流阻力较大。此外,由于油藏储层物性变化以及天然和人工裂缝的影响,油藏平面不同方向上的渗透率存在较大差异,即渗透率各向异性明显。因此,低渗透各向异性油藏在开发过程中,常表现出储量动用难度大、动用程度低、注水沿主渗流方向突进以及平面驱替不均衡的特点,导致注水开发效果较差^[1-8]。此类油藏在实际开发中,初期一般采取菱形注采形式的基础井网,其中开发井距和井排比的优化配置是井网部署成功的关键。

针对低渗透各向异性油藏的开发规律,以及合理开发、菱形井网的优化设计问题,大部分学者运用油藏数值模拟和理论计算等方法,通过对产油量、含水率变化和稳产时间等为优化目标进行分析^[9-20];较少根据开发井网注采单元的渗流场分布变化,对注采单元中的储量动用以及注水驱替均衡性等方面进行论证;关于合理注采井距、井排比的确定,一般采取单因素对开发效果影响的优化分析方法^[21-28],而通过分析各因素对油藏储量动用效果和均衡驱替的影响,并考虑多因素交叉干扰条件下,实现合理井距和最佳井排比的联立优化求解的相关研究较少。

对于一般低渗透油藏(渗透率在 $10 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),具有一定的自然产能,油藏整体表现出孔隙渗流的特征,但储层具有一定启动压力梯度和较为明显的各向异性。此类油藏储量丰富,大量开发实践表明,采用合理的菱形井网是油藏开发成功的基础。本文基于实际低渗透各向异性油田开发的典型井网形式,应用经典渗流力学理论,研究不同因素影响下菱形井网中储量有效动用规律和均衡驱替效果,建立同时实现“储量有效动用程度满足油田开发要求、注采均衡驱替效果好”的菱形注采井网优化模型,为此类油藏的有效开发提供科学依据。

1 低渗透各向异性油藏菱形井网渗流方程及其求解

针对典型的低渗透油藏地质和开发条件,分析储层启动压力梯度和渗透率各向异性影响下的渗流方程,建立菱形井网形式下注采单元的渗流模型,并求解计算渗流场分布。

1.1 低渗透各向异性油藏适宜井网形式

菱形井网是矢量井网的一种特殊形式,矢量井网

通过控制注采井距提高储量动用程度,变化注采形式和调整井排比,特别适用于非均质性较强、主渗流方向明显的油藏。矢量井网形式一般有:矩形反五点法、矩形线性(排状)、矩形反七点法和菱形反九点法。

由于初期油井井数多,菱形反九点法井网更适合油藏开发初期的需求,沿主渗流方向上注采井距长、垂直主渗流方向上井排距离短,易于获得在各个方向上相对均衡的驱替效果;在开发中后期不增加井数的情况下,可以根据需要调整为矩形反五点法井网,或矩形线性(排状)井网。

中国大多数低渗透油藏的开发实践表明,菱形反九点法井网适合作为低渗透各向异性油藏开发的基础井网。因此,适合目标油藏条件、满足油田开发需求的菱形井网关键技术参数——合理井距、最佳井排比的确定,是油藏注采井网部署的关键。

1.2 低渗透各向异性菱形井网渗流方程及其求解

1.2.1 菱形反九点井网基本形式

典型的菱形反九点法井网如图1所示。在所研究的一个完整的注采单元中,有1口中心注水井和8口生产井。其中井距 d_s 为相同井排中两井之间的距离, m; 排距 d_R 为相邻两个井排之间的垂直距离, m; 井排比为井距与排距的比值,为 $\varepsilon = d_s/d_R$, 无量纲。

对于低渗透各向异性油藏,在确定条件下,通过“缩小井距”增大驱动压力梯度,来提高注采单元中储量的有效动用程度,通过“控制井排比”,来实现各个方向上的均衡驱替。基于该典型井网形式,考虑渗透率各向异性以及启动压力梯度的影响,利用渗流力学势的叠加原理,建立针对性的菱形注采井网渗流模型,研究不同条件下注采单元中平面渗流场变化规律,为实际油藏开发井网设计优化奠定理论基础。

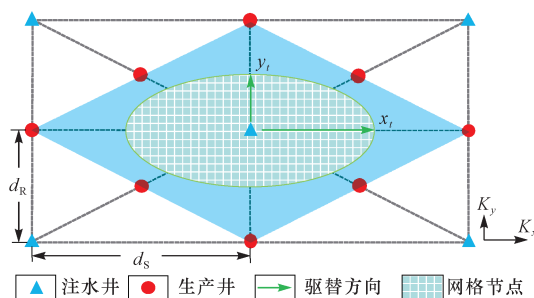


图1 菱形反九点基本井网形式示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing the rhomboid inverted nine-point well pattern

(x_i, y_i 为流体分别沿 x, y 方向流动时在某时刻到达的位置, m; K_x, K_y 分别为沿 x, y 方向的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; d_s 为井距, m; d_R 为排距, m.)

1.2.2 菱形反九点井网渗流方程的建立

1) 基本渗流模型

在常规油藏中,平面渗流基本微分方程为:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

式中: p 为压力,MPa; x 为沿渗流主方向的距离,m; y 为沿垂直渗流主方向的距离,m。

若油藏中所有井定产生产,则根据叠加原理可知,平面中某一点的压力为:

$$p = \sum_{i=1}^m p_i + C = \frac{\mu}{2\pi Kh} \sum_{i=1}^m (\pm q_i \ln r_i) + C \quad (2)$$

式中: m 为井数; $\pm q_i$ 为某井在任意点处产生的压力,MPa; C 为常数,无量纲; μ 为地层原油粘度,mPa·s; K 为油藏渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; h 为油藏有效厚度,m; q_i 为油井产液量或注水井注入量, m^3/d ; r_i 为任意点距某井的距离,m。

根据压力分布表达式,可以求出速度分布表达式:

$$v = \frac{1}{2\pi h} \sum_{i=1}^m \frac{\pm q_i}{r_i} \quad (3)$$

式中: v 为某一点速度,m/d。

2) 考虑启动压力梯度和各向异性影响的渗流模型

相关研究表明,储层启动压力梯度 G 与流度 $\lambda = K/\mu$ 之间满足对数关系,可表示为^[29]:

$$\ln G = A \ln \lambda + B \quad (4)$$

式中: G 为储层启动压力梯度,MPa/m; λ 为流体流度, $10^{-3} \mu\text{m}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ 。对于本文研究油藏, $A = -0.75$, $B = -3.76$ 。

在各向异性油藏中,流体在不同方向的渗流能力存在差异,其渗流阻力各不相同,因此各方向上的启动压力梯度也不同,可以得到不同方向上的渗流速度基本表达式:

$$\begin{cases} v_x = \frac{K_x}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - G_x \right) \\ v_y = \frac{K_y}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial y} - G_y \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: v_x, v_y 分别为沿 x, y 方向渗流速度,m/d; K_x, K_y 分别为沿 x, y 方向渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; G_x, G_y 分别为储层在 x, y 方向上的启动压力梯度,MPa/m。

在各向异性油藏中,假定主渗流方向为 x 轴方向, y 轴方向上渗透率最小,可得连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

式中: ρ 为流体密度, g/cm^3 。为简化上述渗流方程,通过坐标变换和等效处理,将原各向异性平面转化成各向同性平面,为此做出如下变换:

$$\begin{cases} X = x \sqrt{K/K_x} \\ Y = y \sqrt{K/K_y} \end{cases} \quad (7)$$

经过坐标变换,可得低渗透各向异性油藏的渗流方程为:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \left(\frac{\partial p}{\partial R} - G \right) = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[R \left(\frac{\partial p}{\partial R} - G \right) \right] = 0 \quad (8)$$

$$K = \sqrt{K_x K_y}, G = \sqrt{G_x G_y} \quad (9)$$

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (10)$$

式中: X, Y 分别为坐标变换后沿渗流主方向距离和垂直渗流主方向距离,m。

若无限大地层存在一口生产井,其产液量为 q 。在注采平面以该井轴为轴的圆柱面上,根据公式(10)可知,其半径为 R ,按照达西定律,可知通过井点的流体质量为:

$$q = \frac{2\pi Kh R_w}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial R} - G \right) \quad (11)$$

式中: q 为无限大地层中一口生产井的产液量, m^3/d ; R_w 为井筒半径,m; R 为井的泄流半径,m。

在变换后的各向同性平面上,无限大地层中考虑启动压力梯度的渗流控制方程为:

$$\begin{cases} \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[R \left(\frac{\partial p}{\partial R} - G \right) \right] = 0 \\ R \left(\frac{\partial p}{\partial R} - G \right) \Big|_{R=R_w} = \frac{q\mu}{2\pi Kh} \end{cases} \quad (12)$$

1.2.3 菱形反九点井网注采单元平面渗流场求解

1) 压力分布

根据公式(12)所示的方程组,可求出地层中任一点的压力分布表达式:

$$\begin{aligned} p(r) = & \frac{q\mu}{4\pi Kh} \ln \left(\frac{K}{K_x} \Delta x^2 + \frac{K}{K_y} \Delta y^2 \right) + \\ & G \sqrt{\frac{K}{K_x} \Delta x^2 + \frac{K}{K_y} \Delta y^2} + C \end{aligned} \quad (13)$$

当地层中有多口井同时生产时,根据叠加原理,可得注采单元中任一点的压力为:

$$\begin{aligned} p(r) = & \sum_{i=1}^m p_i + C = \sum_{i=1}^m \left[\frac{\pm q_i \mu}{4\pi Kh} \ln \left(\frac{K}{K_x} \Delta x_i^2 + \frac{K}{K_y} \Delta y_i^2 \right) + \right. \\ & \left. G \sqrt{\frac{K}{K_x} \Delta x_i^2 + \frac{K}{K_y} \Delta y_i^2} \right] + C \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $\Delta x_i = x - x_i$, $\Delta y_i = y - y_i$ 分别表示注采单元中任意一点距某井在 x, y 方向上的距离, m。

2) 渗流速度

由于速度是矢量, 可将任意点流体的速度在 x, y 方向上进行分解。在研究的注采单元中, 多口井生产时某一点流体在 x 方向上的分速度为:

$$v_x = \frac{K_x}{\mu} \left(\sum_{i=1}^m \frac{\partial p}{\partial x} - G_x \right) = \frac{K_x}{\mu} \left[\frac{\mu}{2\pi Kh} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\pm q_i \bar{K}_x \Delta x_i}{R_i^2} + G \frac{\bar{K}_x \Delta x_i}{R_i} \right) - G_x \right] \quad (15)$$

同理, 多口井生产时某一点流体在 y 方向上的分速度为:

$$v_y = \frac{K_y}{\mu} \left(\sum_{i=1}^m \frac{\partial p}{\partial y} - G_y \right) = \frac{K_y}{\mu} \left[\frac{\mu}{2\pi Kh} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\pm q_i \bar{K}_y \Delta y_i}{R_i^2} + G \frac{\bar{K}_y \Delta y_i}{R_i} \right) - G_y \right] \quad (16)$$

进而得到注采单元中某一点的渗流速度为:

$$v(r) = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \left\{ \left[\frac{K_x}{\mu} \left[\frac{\mu}{2\pi Kh} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\pm q_i \bar{K}_x \Delta x_i}{R_i^2} + G \frac{\bar{K}_x \Delta x_i}{R_i} \right) - G_x \right] \right]^2 + \left[\frac{K_y}{\mu} \left[\frac{\mu}{2\pi Kh} \sum_{i=1}^m \left(\frac{\pm q_i \bar{K}_y \Delta y_i}{R_i^2} + G \frac{\bar{K}_y \Delta y_i}{R_i} \right) - G_y \right] \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

式中:

$$R_i = \bar{K}_x (\Delta x_i)^2 + \bar{K}_y (\Delta y_i)^2 \quad (18)$$

$$\bar{K}_x = \frac{K}{K_x}, \bar{K}_y = \frac{K}{K_y} \quad (19)$$

基于低渗透各向异性油藏菱形井网典型形式(图1), 在注采单元整体保持注采平衡, 利用公式(14)和(17)可分别求出任一点的压力和速度, 即得到注采单元中渗流场分布。

1.3 菱形反九点井网渗流场分布规律

根据中国主要低渗透油田开发实践认识和本文研究油藏资料, 确定了主要参数的取值范围(表1)。其中, 平面渗透率级差 J_K 反映油藏渗透率的各向异性程度, 即

$$J_K = K_x/K_y \quad (20)$$

启动压力梯度与流度 λ 相关, 由公式(4)确定。

基于典型菱形反九点井网(图1), 设平行 x 方向为

表1 渗流场计算主要参数

Table1 Main parameters applied for seepage field calculation

参数	符号	取值范围	一般基准值
有效厚度/m	H	5~40	15.0
主方向渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	K_x	5~50	10.0
平面渗透率级差	J_K	1~20	10.0
原油粘度/($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	μ	1~20	5.0
井距/m	d_s	100~500	300.0
井排比	ε	1~6	2.0
注采压差/MPa	p	5~30	15.0

主渗流方向, 当各参数取表1中的一般基准值时, 计算得到注采单元中渗流场(包括压力场和速度场)分布(图2)。当各参数取不同值时, 可以分析不同条件下渗流场分布变化规律(在注采单元渗流场中, 黄色越深反映物理量的值越大, 蓝色越深反映物理量的值越小), 进而得到不同因素对渗流场分布的影响。由图2可以看出:

1) 对比有无启动压力梯度时, 注采单元中压力场、速度场(变化形态和控制范围)差别明显。存在启动压力梯度时, 渗流阻力更大, 在相同注采压差条件下, 注入端的高压区范围减小, 采出端的低压区范围增大。井点附近的高速流动区范围减小, 而井间低速流动区范围增大。

2) 当各向异性程度较大时, 注采单元中 x 方向上阻力小、压力传播快, 该方向的分速度大, 压力和速度分布图中的等值线明显的扁平化, 平行主渗流方向、垂直方向上的流动呈现驱替不均衡性。

3) 在不同地质条件下, 注采单元中的低速流动区范围、驱替均衡程度不同, 可以通过调整关键开发参数——井距和井排比, 使得注采单元中低速流动区范围尽量小、驱替均衡程度尽量高。

4) 注采单元中的速度场分布, 反映了不同位置处流体渗流速度的大小, 流体速度越大表示该区域储量越容易动用。因此, 可以利用注采单元中流体的渗流速度来反映流体(油相)动用的难易程度, 进而表征储量的动用状况。

2 不同条件下菱形井网注采单元储量有效动用规律

对于低渗透各向异性油藏, 进行菱形井网设计优化的目标, 旨在实现油藏储量的有效动用和高效开发, 即要求在整个注采单元中“低速流动区范围尽量小”, 同时不同方向上的“驱替均衡程度尽量高”。因此, 建立评价储量有效动用的指标和方法, 并分析各因素对储量有效动用规律的影响, 为低渗透各向异性油藏菱形井网设计优化奠定基础。

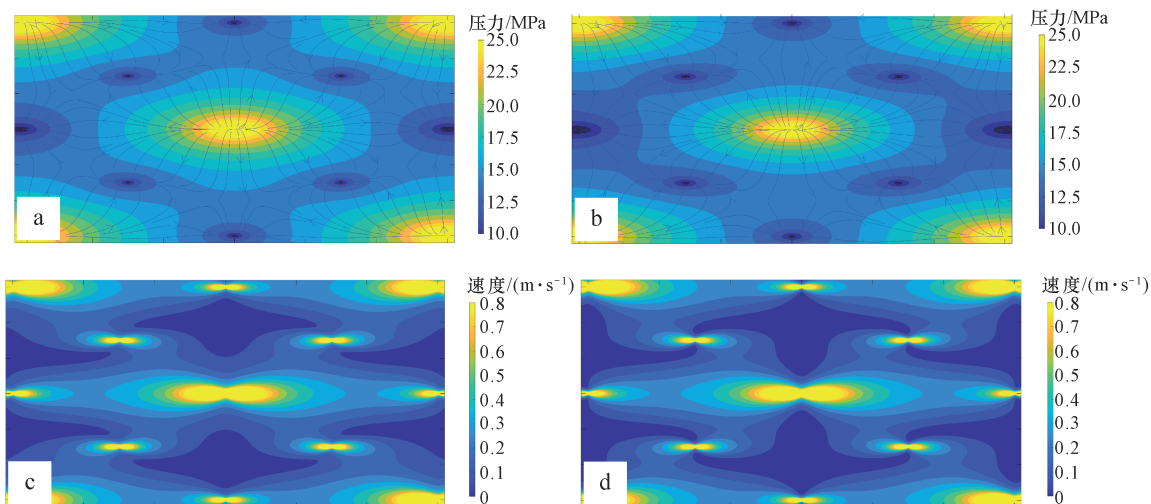


图2 不同条件下菱形反九点井网渗流场分布

Fig. 2 Seepage field distribution in rhomboid inverted nine-spot well pattern under different conditions

- a. 不考虑启动压力梯度的压力场; b. 考虑启动压力梯度的压力场;
c. 不考虑启动压力梯度的速度场; d. 考虑启动压力梯度的速度场

2.1 菱形井网注采单元有效动用评价方法

2.1.1 均衡驱替效果的评价方法

为反映注采单元中在平行主渗流方向、垂直主渗流方向上的驱替均衡程度,提出“均衡驱替系数”,来表征注采井网的均衡驱替效果。

在典型菱形反九点井网中,从注水井出发的速度等值变化范围(图1阴影处)。假设有两流体质点同时从注水井出发,分别沿 x, y 两方向流动,在某时刻分别到达 x_t 和 y_t 处。若要实现均衡驱替,距离 x_t 和 y_t 的比值应与注采井网的井排比尽可能相等,即有:

$$t_x = \frac{x_t}{v_{xa}} = t_y = \frac{y_t}{v_{ya}} \quad (21)$$

$$\frac{x_t}{y_t} = \frac{d_s}{d_R} \quad (22)$$

式中: t_x, t_y 为流体分别沿 x, y 方向流动时的流动时间, d; v_{xa}, v_{ya} 为流体分别沿 x, y 方向流动时的流速, m/d; x_t, y_t 为流体分别沿 x, y 方向流动时在某时刻到达的位置, m。

为便于在 x, y 方向上进行细分对比,可将不同方向上注采井间的距离均分成 n 个节点(n 越大,在流动距离上的细分程度就越高,分析结果就越精确,本文取 $n=20$),对流体分别沿 x, y 方向上的速度在每对应节点处进行对比(图3)。

在图3中,灰色柱状长度表示流体质点分别沿 x, y 方向流动时在某对应节点处的速度差,该差距越小,表示流体各方向驱替均衡程度越高。为便于对比分析,

将公式(22)带入公式(21),得到两方向上“速度差”表达式:

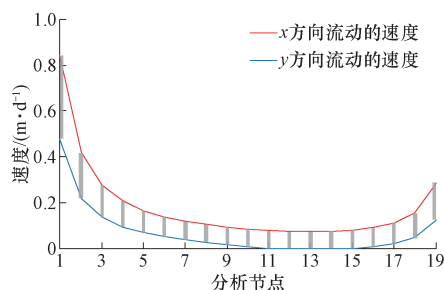
$$\delta = \left| v_{ya} - \frac{d_R v_{xa}}{d_s} \right| \quad (23)$$

若要最大限度地实现均衡驱替,就要使得流体质点在所有分析节点处、沿两方向的“速度差”趋于最小。定义“均衡驱替系数”的表达式为:

$$\sigma = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \delta_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left| v_{yai} - \frac{d_R v_{xai}}{d_s} \right|} \quad (24)$$

式中: σ 为均衡驱替系数,无量纲; v_{xai}, v_{yai} 为流体分别沿 x, y 方向流动时某节点处的流速, m/d; n 为分析节点个数,无量纲。

当“均衡驱替系数”最大时,说明水驱开发的驱替均衡性更好,此时可以得到在给定条件下,满足油藏注采井网均衡驱替效果的最佳井排比。

图3 流体沿 x, y 方向流动时各节点处速度对比Fig. 3 Comparison of velocities at each nodes when the fluid flows in the x and y directions

2.1.2 储量有效动用效果的评价方法

在给定的注采条件下,在注采单元中某些区域的驱替压力梯度小于或等于该处启动压力梯度时,导致该区域流体的渗流速度为0,则该区域的流体就不能动用。可将渗流速度为0的区域范围定义为无效动用范围,反之则为有效动用范围。

利用注采单元的“无因次有效动用范围”,来表征注采井网的储量有效动用效果,表达式为:

$$\omega = \frac{S_E}{S_T} \quad (25)$$

式中: ω 为无因次有效动用范围,无量纲; S_E 为注采单元中的有效动用范围面积, m^2 ; S_T 为注采单元中研究范围的总面积, m^2 。若无因次有效动用范围越大,注采单元中渗流速度为0的范围越小,储量动用情况越好。

可以根据无因次有效动用范围的大小,表征注采单元中储量动用程度的高低。在确定的油藏条件下,要想达到某一储量动用程度水平,可以设定无因次有效动用范围的期望值,来求解相应的开发技术界限(如合理井距等)。

2.2 不同条件下均衡驱替变化规律

根据表1参数的取值,计算不同条件下菱形注采井网的渗流场分布,并统计得到不同因素影响下的均衡驱替系数变化曲线(图4)。

均衡驱替系数越大,注采单元中 x 方向与 y 方向

上的驱替越均衡。均衡驱替系数最大时的井排比即为菱形井网最佳井排比。据图4可以看出:

1) 随注采压差、流度、渗透率级差、井距和井排比等因素取值的增大,均衡驱替系数一般呈现先增加后降低的规律,曲线极值点即对应该条件下的最佳井排比。

2) 当只考虑单因素变化的影响时,最佳井排比与流度、渗透率级差、井距呈非线性的正相关关系,与流度、注采压差呈非线性的负相关关系;而流度、注采压差和井距对最佳井排比的影响相对较小;渗透率级差对最佳井排比的影响相对较大。

3) 当综合考虑多因素变化的影响时,可以利用前述建立的理论方法,计算得到不同因素、不同取值水平组合下的结果,形成数据分析样本;再通过逐步回归分析法,得到菱形井网“均衡驱替系数”与不同影响因素之间的函数关系,作为低渗透各向异性油藏菱形井网设计的基础。

2.3 不同条件下有效动用范围变化规律

根据表1的参数取值,计算不同条件下菱形注采井网渗流场分布,并统计得到不同因素影响下的无因次有效动用范围的变化曲线(图5)。

无因次有效动用范围反映注采单元中能够流动的面积占单元控制面积的比,无因次有效动用范围越大,菱形井网注采单元中的储量动用程度越高。据图5可以看出:

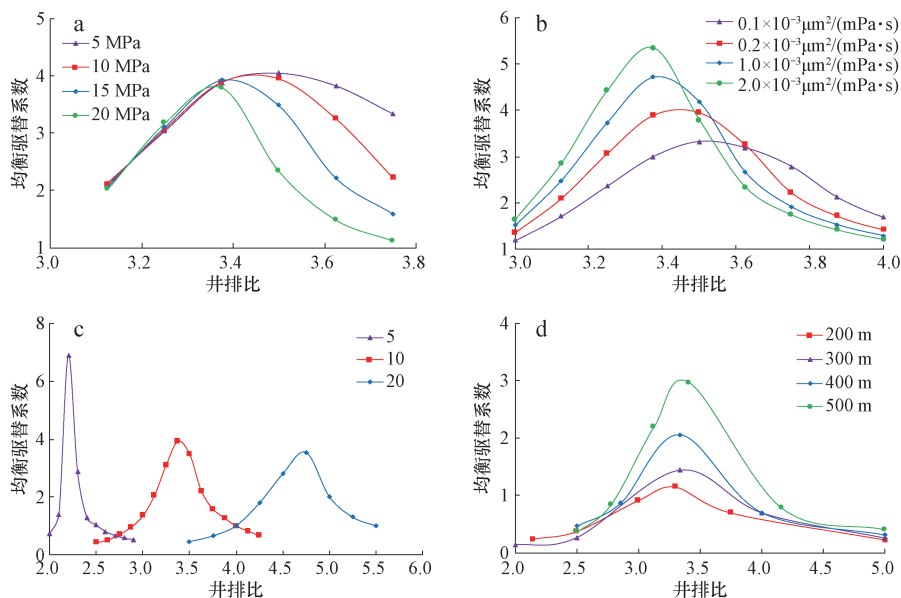


图4 不同条件下均衡驱替系数变化规律

Fig. 4 Variation rules of equilibrium displacement coefficients under different conditions

a. 不同注采压差; b. 不同流度; c. 不同渗透率级差; d. 不同井距

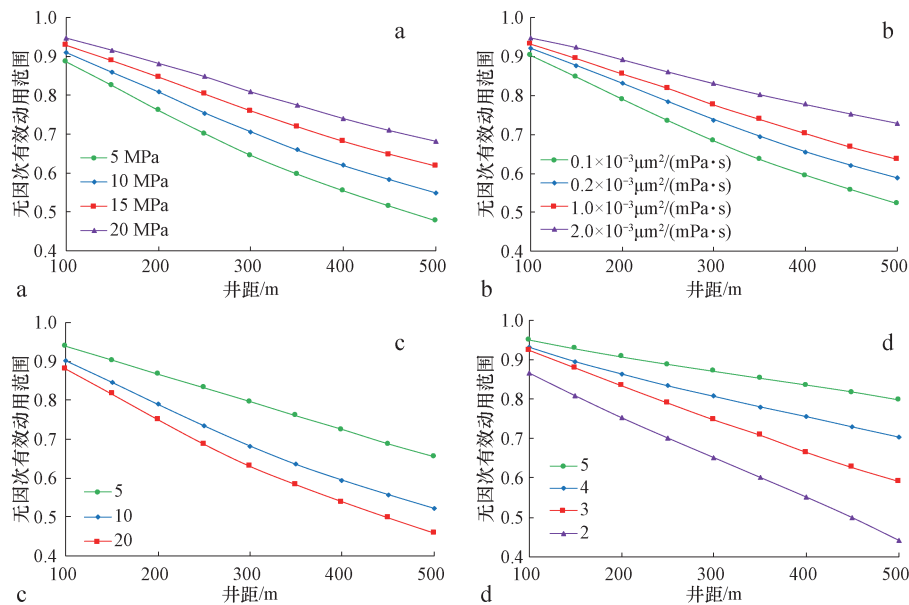


图 5 不同条件下无因次有效动用范围变化规律

Fig. 5 Variation rules of dimensionless effective producing range under different conditions

a. 不同注采压差;b. 不同流量;c. 不同渗透率级差;d. 不同井排比

- 1) 随注采压差、流量、渗透率级差、井距和井排比等各影响因素取值的增大,无因次有效动用范围一般呈现单调递增或递减的变化规律。
- 2) 当只考虑单因素变化的影响时,无因次有效动用范围与注采压差、流量、井排比呈正相关关系,与渗透率级差、井距呈负相关关系。
- 3) 当综合考虑多因素变化的影响时,可以利用前述建立的理论方法,计算得到不同因素、不同取值水平组合下的结果,形成数据分析样本;再通过逐步回归分析法,得到菱形井网“无因次有效动用范围”与不同影响因素之间的函数关系,作为低渗透各向异性油藏菱形井网设计的基础。

3 基于储量有效动用的菱形井网优化设计方法

3.1 菱形井网优化设计方法和步骤

基于以上不同因素对低渗透各向异性油藏菱形井

网渗流场分布规律的认识,建立菱形注采井网优化设计方法,详细步骤如下。

1) 基于菱形井网注采单元中的“均衡驱替系数、无因次有效动用范围”与不同影响因素之间的变化关系,确定函数的自变量、因变量和取值范围(表 2)。

2) 根据不同条件下菱形井网储量有效动用变化规律的认识,基于表 2 中各参数取值,进行计算得到不同条件组合下“均衡驱替系数、无因次有效动用范围”结果——数据分析样本。

利用逐步回归分析方法,可以得到描述“均衡驱替系数 $\sigma = f_1(\lambda, J_K, p, d_s, \varepsilon)$ ”、“无因次有效动用范围 $\omega = f_2(\lambda, J_K, p, d_s, \varepsilon)$ ”的非线性变化数学模型。

3) 确定菱形井网优化设计目标,如需要同时满足:①均衡驱替系数最大($\sigma_{\max}$);②无因次有效动用范围大于或等于目标值 $\omega_{\min}$ (如目标值为 80%)。则相应的菱形井网优化目标函数为:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_{\max} \\ \omega \geq \omega_{\min} \end{cases} \tag{26}$$

表 2 储量有效动用主要影响因素及其取值范围

Table 2 Main factors influencing effective development of reserves and their value ranges

参数名称	流量	平面渗透率级差	注采压差	井距	井排比
符号	λ	J_K	p	d_s	ε
单位	$10^{-3} \mu\text{m}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$	无量纲	MPa	m	无量纲
取值范围	0.1 ~ 5.0	1 ~ 20	5 ~ 30	100 ~ 500	1 ~ 6
与“均衡驱替系数”的变化关系	非线性,拐点位置 相关程度小	非线性,拐点位置 相关程度大	非线性,拐点位置 相关程度小	非线性,拐点位置 相关程度小	非线性,拐点位置 相关程度大
与“无因次有效动用范围”的变化关系	非线性变化, 正相关	非线性变化, 负相关	非线性变化, 正相关	非线性变化, 负相关	非线性变化, 正相关

4) 根据目标实际油藏条件,确定基础参数的取值,包括:流度、渗透率级差、注采压差和启动压力梯度(与流度相关)等。

利用优化算法(逐步寻优法),联立求解目标函数,可得到同时满足“均衡驱替系数最大、有效动用范围大于目标值”的菱形井网优化设计参数:合理井距 d_{sm} 和最佳井排比 ε_m 。

根据计算结果,综合考虑实际油田的储量大小、产量要求和经济因素等方面,最终确定菱形井网的优化部署方案。

3.2 基于多元逐步回归建立多因素非线性预测模型

3.2.1 数据样本的多元逐步回归

基于表2中各参数取值,计算得到不同条件组合下的数据样本,然后采用多元逐步回归法,建立多因素非线性模型,主要步骤如下。

1) 保留影响作用程度大的变量,反之则剔除。已知1个自变量和因变量,根据相关系数矩阵 R ,可求出每个自变量的贡献大小,即:

$$P_i = R_{iy}^2 / R_{ii} \quad (27)$$

式中: P_i 为方差贡献系数,无量纲;其中 R_{iy} 表示第 i 个自变量对因变量的贡献大小,无量纲; R_{ii} 为因变量自相关系数,无量纲。

则第 k 步计算得出的方差贡献系数为:

$$P_i^k = (R_{iy}^{k-1})^2 / R_{ii}^{k-1} \quad (28)$$

式中: P_i^k 为第 k 步计算中方差贡献系数,无量纲;其中 R_{iy}^{k-1} 表示第 $k-1$ 步第 i 个自变量对因变量的贡献大小,无量纲; R_{ii}^{k-1} 为第 $k-1$ 步计算中因变量自相关系数,无量纲。

2) 对贡献最小的自变量进行剔除。设定一个显著水平,根据 F 检验找到其变量剔除临界值 F_α 。在第 k 步计算中,假如第 j 个自变量贡献最大,记

$$P_{jmax}^k = \max(P_h^k) \quad (29)$$

式中: P_{jmax} 为最大的方差贡献系数,无量纲; h 为还没引入模型的自变量,无量纲; P_h 为还没引入模型自变量的方差贡献系数,无量纲。计算变量引入的 F 值判断公式:

$$F_{opt} = (s - k - 1) P_{jmax}^k / (R_{ii}^{k-1} - P_{jmax}^k) \quad (30)$$

式中: F_{opt} 为所要引入变量的检验值,无量纲; s 为数据样品数,无量纲。如果 $F_{opt} > F_\alpha$,则该自变量引入。若第 n 步计算中:

$$P_{jmin}^k = \min(P_h^k) \quad (31)$$

式中: P_{jmin} 为最小的方差贡献系数,无量纲。则根据剔

除的 F 值判断公式:

$$F_{out} = (s - k - 2) P_{jmin}^k / R_{ii}^{k-1} \quad (32)$$

式中: F_{out} 为剔除变量的检验值,无量纲。如果 $F_{out} \leq F_\alpha$,则该自变量剔除。

3) 在整个回归计算过程中,自变量的引入和剔除同时进行。经过往复计算,直至不能引入和剔除自变量为止。

3.2.2 多因素非线性预测模型的建立

根据以上不同条件组合下计算的结果,经多元逐步回归分析,得到多因素影响下“均衡驱替系数”变化的计算模型:

$$\begin{aligned} \sigma = & -17.141 + 1.616\varepsilon + 3.349\lambda + 0.721p + 0.042d_s - \\ & 0.339J_K - 0.528\varepsilon^2 - 0.0054\lambda d_s - 0.0015pd_s - \\ & 0.000018d_s^2 + 0.183\varepsilon J_K - 0.000017J_K d_s - \\ & 0.000014d_s p \end{aligned} \quad (33)$$

根据以上不同条件组合下计算的结果,经多元逐步回归分析,得到多因素影响下“无因次有效动用范围”变化的计算模型:

$$\begin{aligned} \omega = & -1.744 + 0.0142d_s + 0.0936J_K + 0.0155p + \\ & 0.0524\varepsilon - 0.000023d_s^2 + 0.0994\lambda^2 - \\ & 0.00036d_s J_K + 0.0095\lambda J_K - 0.00054J_K^2 - \\ & 0.00001d_s p - 0.00011p^2 + 0.00035d_s \varepsilon - \\ & 0.0417\lambda \varepsilon - 0.0015p \varepsilon - 0.0075\varepsilon^2 \end{aligned} \quad (34)$$

对预测模型进行“回归诊断”检验,通过预测计算结果和分析样本的“残差概率分布”分析,该模型的残差具有明显的正态性,基本服从正态分布,可以认定建立的预测模型可靠。

4 实际油田应用

一般井网设计的方法,首先是利用油藏工程方法,计算油藏合理经济技术井网密度、注采井距界限;然后,设计多套可行方案,利用数值模拟进行计算,再通过指标筛选出最佳方案。而本文方法,考虑了多因素组合条件下的储量动用、均衡驱替效果,实现合理井距和最佳井排比的联立优化求解,可以更精细、更全面地指导基于实际模型的数值模拟研究工作。

4.1 油田基本情况

CY 油田为特低渗透各向异性油藏,基本参数如下:油藏中部深度 1 190 m,平均有效厚度为 26 m;主渗流方向近似为北偏西 40°,渗透率为 $22.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,垂

直主渗流方向渗透率为 $4.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 地下原油粘度为 $4.0 \text{ mPa} \cdot \text{s}$; 原始地层压力为 14.0 MPa , 破裂压力约为 21.8 MPa , 饱和压力 5.6 MPa , 最大注采压差约为 15.0 MPa 。通过室内实验和矿场试油、试采资料分析, 油藏具有一定启动压力梯度(约为 0.012 MPa/m), 整体表现为孔隙渗流的特征, 但储层各向异性的影响明显。

根据油田开发实践经验, 低渗透油藏在部署初期的菱形反九点井网后, 在适当条件下, 需要将井网调整为矩形反五点法井网。因此, 本文基于实际油藏条件, 首先对初期菱形反九点井网进行优化设计, 然后分析后期调整为矩形反五点法井网后, 对提高储量动用效果的改善程度。

4.2 油田合理井网优化设计及部署

4.2.1 初期菱形反九点井网设计结果

首先, 根据油田储层条件和本区相关经济参数, 计算油田经济极限井网密度、单井经济日产量界限; 其次在满足油田开发经济界限的基础上, 确定本区开发井网部署须达到的技术目标(如井网控制区内储量无因次有效动用范围大于 80% , 采油速度满足开发需要等); 然后, 根据本文方法进行“菱形注采井网关键参数寻优计算”, 可同时得到 CY 油田菱形反九点注采井网不同条件下均衡驱替系数、无因次有效动用范围的变化曲线(图 6)。

可以看出, 在均衡驱替系数变化曲线中, 曲线极大值对应的井排比(即满足均衡驱替效果最佳)在 2.42 左右; 而在无因次有效动用范围变化曲线中, 当目标值 $\omega_{\min}$ 为 80% 时, 对应的注采井网合理井距为 343 m 。

4.2.2 后期调整为矩形五点法井网的效果

在低渗透各向异性油藏开发后期, 为使井网单元的储量未动用区得以动用, 通常将反九点菱形井网加密调整为矩形反五点井网(图 7)。

可以用“无因次有效动用范围”、“均衡驱替系数”的增加幅度, 来定量描述井网调整后, 注采单元中驱替效果的改善程度。对比初期菱形反九点注采井网, 后期矩形反五点井网储量动用效果的变化(图 8)。

可以看出, 初期的菱形反九点注采井网, 在调整为矩形反五点井网后, 无因次有效动用范围和均衡驱替系数都得到较大提高; 井网调整后, 无因次有效动用范围和均衡驱替系数的增幅与注采压差均呈负相关关系, 说明在注采压差较低条件下, 井网调整对注采单元中储量动用程度及储量均衡动用效果的改善作用更显著。

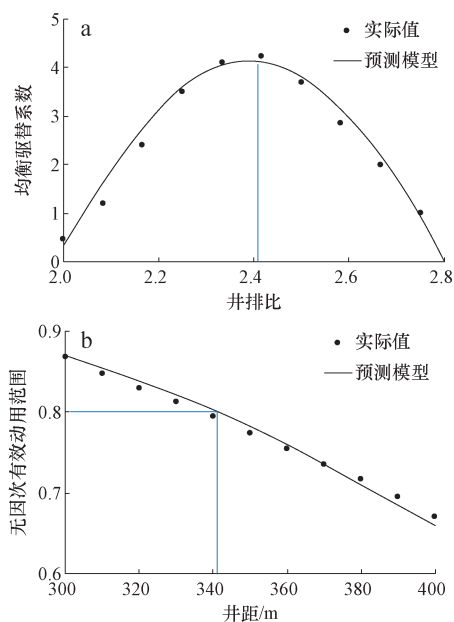


图 6 CY 油田均衡驱替系数(a)和无因次有效动用范围(b)变化曲线

Fig. 6 Curves of equilibrium displacement coefficients vs. dimensionless effective development range variation in CY oilfield

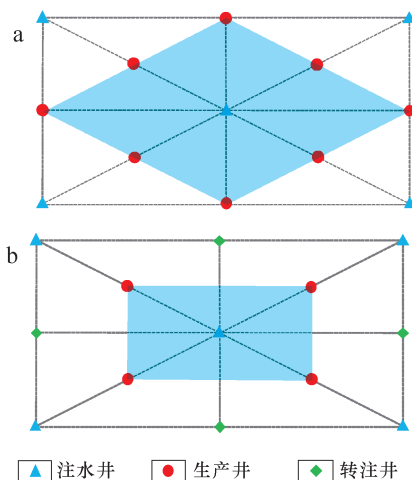


图 7 井网调整方式

Fig. 7 Well pattern adjustment mode

a. 初始菱形反九点井网 b. 矩形反五点井网

4.2.3 油田合理井网部署建议

基于以上井网论证的结果, 来指导油藏数值模拟中计算方案设计, 以实现油田优化注采井网的目标, 既能实现均衡驱替、又满足储量有效动用程度, 为高效开发该类油田奠定基础。CY 低渗透各向异性油藏采取菱形反九点井网形式, 在平行主渗流方向拉长井距(约 340 m), 在垂直主渗流方向缩小排距(约 140 m), 油田井网设计部署结果见图 9。

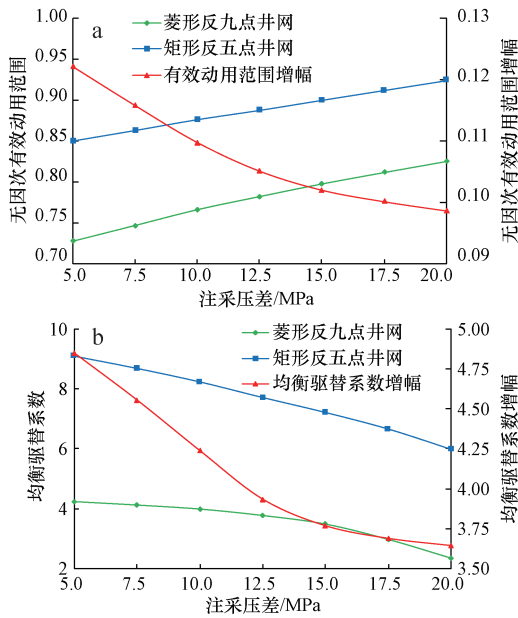


图 8 井网调整后储量动用效果改善程度变化曲线
Fig. 8 Curves showing displacement equalization effect and improvement of reserve producing after well pattern adjustment
a. 无因次有效动用范围 b. 均衡驱替系数

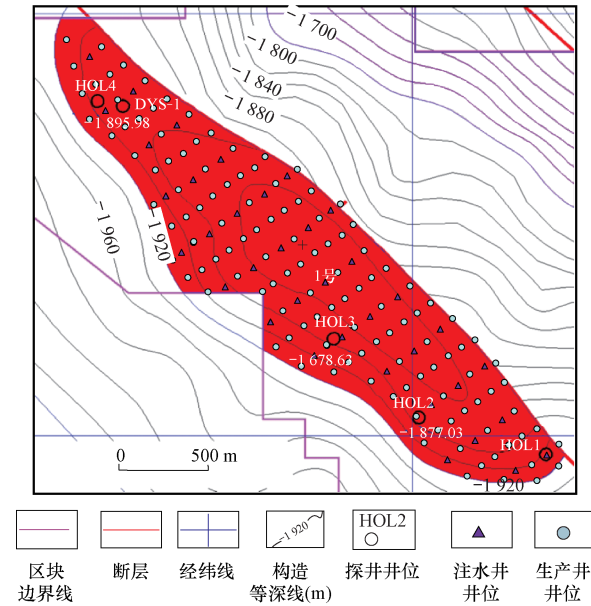


图 9 CY 油田菱形反九点注采井网设计部署
Fig. 9 Diagram showing design of rhomboid reverted nine-point well pattern in CY oilfield

5 结论

1) 考虑启动压力梯度和各向异性的影响,建立了菱形井网形式下的渗流方程,推导出菱形井网注采单元渗流场分布解析解,可得到不同条件下注采单元中压力、速度分布的变化规律。

2) 利用注采单元中的速度分布变化来表征和反映储量动用状况,进而建立评价低渗透各向异性油藏有效开发的方法,得到不同条件下储量有效动用范围、注采均衡驱替效果的变化规律。

3) 建立同时满足“储量有效动用程度满足油田开发要求、注采均衡驱替效果好”的菱形注采井网优化模型,形成菱形井网优化设计方法。实例应用表明,该方法可用于确定菱形注采井网合理井距、最佳井排比,具有很好的实用性和可操作性。

参 考 文 献

[1] 朱维耀,刘今子,宋洪庆,等. 低/特低渗透油藏非达西渗流有效动用计算方法[J]. 石油学报,2010,31(3):452-457.
Zhu Wei-yao, Liu Jin-zi, Song Hong-qing, et al. Calculation of effective startup degree of non-Darcy flow in low or ultra-low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 452-457.

[2] Xu J, Jiang R, Xie L, et al. Non-Darcy flow numerical simulation for low-permeability reservoirs[C]//SPE. Europec/EAGE Annual Conference. Copenhagen, Denmark; 2012.

[3] Sheng J. Discussion of permeability anisotropy effect in transformation[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2010, 49(7): 42-46.

[4] Yao Yuedong, Ge Jiali. Characteristics of non-Darcy flow in low-permeability reservoirs[J]. Petroleum Science, 2011, 8(1): 55-62.

[5] 于友,魏建光,张宝忠,等. 低渗透油藏常规水驱与二氧化碳驱井距界限研究[J]. 特种油气藏, 2021, 28(2): 120-125.
Yu You, Wei Jiangguang, Zhang Baozhong, et al. Study on well spacing limit for conventional waterflooding and carbon dioxide flooding in low-permeability reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(2): 120-125.

[6] 郭鸣黎,陈艳,郑振恒,等. 致密油藏可采储量概率快速评估方法——以红河油田长 8 油藏为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(1): 154-160.
Guo Mingli, Chen Yan, Zheng Zhenheng, et al. Rapid evaluation of probable recoverable reserves in tight reservoirs——A case study of Chang 8 reservoir (eighth member of Yanchang Formation) in Honghe oil field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1): 154-160.

[7] 王任一. 基于生产动态数据的井间储层连通性识别方法[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 443-450.
Wang Renyi. An approach to recognize interwell reservoir connectivity based on production data[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 443-450.

[8] 计秉玉,何应付. 基于低速非达西渗流的单井压力分布特征[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 466-469.
Ji Bingyu, He Yingfu. Formation pressure distribution of a single well based on low-velocity non-Darcy flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 466-469.

[9] Mazo E O, Moreno J, Schiozer D. Effects of directional permeability anisotropy on sweep efficiency of water injection under fracturing conditions process[C]//PETSCO. Canadian International Petroleum

- Conference. Calgary, Canada;2007.
- [10] Yu Rongze, Bian Yanan, Wang Kaiju, et al. Numerical simulation study on diamond-shape inverted nine-spot well pattern[J]. Physics Procedia,2012,24:390-396.
- [11] Tian X, Cao R, Tian J, et al. Low-velocity non-linear numerical simulation in tight sandstone oil reservoirs[C]. SPE Technical Conference & Exhibition. Dubai, UAE;2016.
- [12] Xiong Y, Yu J, Sun H, et al. A new non-Darcy flow model for low-velocity multiphase flow in tight reservoirs[J]. Transport in Porous Media,2017,117(3):367-383.
- [13] Yu R, Lei Q, Yang Z, et al. Nonlinear flow numerical simulation of an ultra-low permeability reservoir[J]. Chinese Physics Letters,2010,27(7):176-179.
- [14] 张连锋,梁丽梅,薛国勤,等.双河油田IV1-3层系非均相复合驱井网调整研究[J].油气藏评价与开发,2020,10(6):85-89.
Zhang Lianfeng, Liang Limei, Xue Guoqin, et al. Well pattern adjustment for heterogeneous composite flooding in IV 1-3 reservoir in Shuanghe Oilfield[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development,2020,10(6):85-89.
- [15] 向刘洋,邹陈蓉.致密砂岩气藏井网加密优化研究——以新场气田沙溪庙组气藏为例[J].石油地质与工程,2020,34(3):61-66.
Xiang Liuyang, Zou Chenrong. Optimization of well pattern infilling in tight sandstone gas reservoirs——by taking Shaximiao formation of Xinchang gas field as an example[J]. Petroleum Geology and Engineering,2020,34(3):61-66.
- [16] 吴浩,姜汉桥,乔岩,等.封闭油藏不同含水期的井网方案优化[J].断块油气田,2019,26(3):342-345.
Wu Hao, Jiang Hanqiao, Qiao Yan, et al. Optimization of well pattern design at different water-cut stage of closed reservoir[J]. Fault-Block Oil and Gas Field,2019,26(3):342-345.
- [17] 梁文福.大庆萨南油田特高含水期水驱注采结构优化调整方法[J].大庆石油地质与开发,2020,39(4):53-58.
Liang Wenfu. Optimizing and adjusting methods of the waterflooding injection-production structure at extra-high watercut stage for Daqing Sanan Oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2020,39(4):53-58.
- [18] 李荣强,吕爱民,王建忠,等.低渗透油藏仿水平井注采井网产能[J].石油与天然气地质,2016,37(3):439-443.
Li Rongqiang, Lu Aimin, Wang Jianzhong, et al. Production capacity of injection and production pattern of horizontal Wells in low permeability reservoirs[J]. Oil & Gas Geology,2016,37(3):439-443.
- [19] 王德龙,郭平,汪周华,等.非均质油藏注采井组均衡驱替效果研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(5):122-125,199.
Wang Delong, Guo Ping, Wang Zhouhua, et al. Study on the effect of balanced displacement in injection and production groups of heterogeneous oil reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition),2011,33(5):122-125,199.
- [20] 赵继勇,安小平,王晶,等.超低渗油藏井网适应性定量评价方法——以鄂尔多斯盆地三叠系长6、长8油藏为例[J].石油勘探与开发,2018,45(3):482-488.
Zhao Jiyong, An Xiaoping, Wang Jing, et al. Quantitative evaluation method of well pattern adaptability in ultra-low permeability reservoirs——a case study of Chang6 and Chang8 reservoirs of Triassic system in ordos basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2018,45(3):482-488.
- [21] Liu Y. Destruction and reconstruction of well patterns in anisotropic oil reservoirs[C]//SPE. International Oil Conference and Exhibition. Veracruz, Mexico,2007.
- [22] Liu Yuetian. Performance analysis and optimal design for well patterns in anisotropic formations[J]. Petroleum Science,2008,5(3):251-257.
- [23] Onwunalu J E, Durlofsky L J. Development and application of a new well pattern optimization algorithm for optimizing large scale field development[C]//SPE. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, USA;2009.
- [24] 陈民锋,赵晶,张贤松,等.低渗透稠油油藏水平井极限动用范围[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(2):103-108.
Chen Minfeng, Zhao Jing, Zhang Xiansong, et al. Limit drainage radius of horizontal wells in low-permeability heavy oil reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2014,38(2):103-108.
- [25] 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 rational well spacing of the diamond-shaped reversed nine-spot well pattern in anisotropic reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Edition of Natural Science),2016,38(6):125-130.
- [26] 王相,何岩峰,冯其红,等.基于均衡驱替理念的非均质油藏井组设计方法[J].常州大学学报(自然科学版),2018,30(6):41-46.
Wang Xiang, He Yanfeng, Feng Qihong, et al. A well pattern design method for heterogeneous reservoir based on the concept of equilibrium displacement[J]. Journal of Changzhou University (Edition of Natural Science),2018,30(6):41-46.
- [27] 王文环,彭缓缓,李光泉,等.特低渗透油藏水驱规律及最佳驱替模式[J].石油与天然气地质,2019,40(1):182-189.
Wang Wenhuan, Peng Xinxuan, Li Guangquan, et al. Law and optimal displacement model of water flooding in extra-low permeability reservoirs[J]. Oil & Gas Geology,2019,40(1):182-189.
- [28] 朱桂良,孙建芳,刘中春.塔河油田缝洞型油藏气驱动用储量计算方法[J].石油与天然气地质,2019,40(2):436-442.
Zhu Guilang, Sun Jianfang, Liu Zhongchun. An approach to calculate developed reserves in gas drive fractured-vuggy reservoirs in Tahe oil-field[J]. Oil & Gas Geology,2019,40(2):436-442.
- [29] 程林松.高等渗流力学[M].北京:石油工业出版社,2011:291-292.
Cheng Linsong. Advanced Seepage Mechanics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press,2011:291-292.