



基于最大注水效率的平面均衡驱替方法

陈存良 马奎前 王相 岳红林 吴晓慧

Research on the Planar Equilibrium Displacement Based on Maximum Water Injection Efficiency

CHEN Cunliang, MA Kuiqian, WANG Xiang, YUE Honglin, WU Xiaohui

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021028>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于驱替定量表征的高含水油田注水井分层配注量确定方法

A Method to Determine the Layered Injection Allocation Rates for Water Injection Wells in High Water Cut Oilfield Based on Displacement Quantitative Characterization

石油钻探技术. 2018, 46(2): 87–91 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018027>

基于非均质大模型的特高含水油藏提高采收率方法研究

Research on Large Scale Heterogeneous Model Based EOR Methods for Ultra-High Water Cut Reservoirs

石油钻探技术. 2018, 46(5): 83–89 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018078>

胡状集油田特高含水油藏剩余油水驱技术

Water Flooding Technology for the Residual Oil in the Ultra-High Water Cut Oil Reservoirs of the Huzhuangji Oilfield

石油钻探技术. 2018, 46(5): 95–101 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018081>

渤海Q油田隔夹层发育底水稠油油藏精细注采技术

Fine Injection-Production Technology for Bottom-Water Viscous Oil Reservoirs with Interlayers in Bohai Q Oilfield

石油钻探技术. 2018, 46(2): 75–80 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018016>

塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏量化注水开发技术

Quantitative Water Injection Technology for Cavernous Fractured Karst Carbonate Reservoirs in the Tahe Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(2): 104–107 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019122>

不同注气介质驱替致密油藏微观孔隙动用特征研究

Research on the Microscopic Pore Producing Characteristics of Tight Reservoirs Displaced by Different Gas Injection Media

石油钻探技术. 2020, 48(5): 85–91 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020078>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2021028

引用格式: 陈存良, 马奎前, 王相, 等. 基于最大注水效率的平面均衡驱替方法 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 124-128.

CHEN Cunliang, MA Kuiqian, WANG Xiang, et al. Research on the planar equilibrium displacement based on maximum water injection efficiency [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 124-128.

基于最大注水效率的平面均衡驱替方法

陈存良¹, 马奎前¹, 王相², 岳红林¹, 吴晓慧¹

(1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459; 2. 常州大学石油工程学院, 江苏常州 213159)

摘要: 针对现有平面均衡驱替评价方法未定量考虑油藏非均质性的问题, 基于注采井间动态驱替方程, 并考虑油藏的非均质性, 建立了注水效率与累计产油量之间的关系方程, 以实现注水效率最大化为目标。然后, 通过求导的方式得到了平面均衡驱替的特征条件, 并以此为基础形成了平面均衡驱替注采结构调整方法。研究认为, 均质油藏均衡驱替的特征条件是, 各注采方向的注水量与孔隙体积的比相同; 非均质油藏均衡驱替的特征条件是, 平面各注采方向注水量与孔隙体积的比满足线性差异关系。海上 BZ 油田利用平面均衡驱替法调整注采结构后, 日产油量增加 155 m³, 有效改善了开发效果。研究结果表明, 基于最大注水效率的平面均衡驱替方法可用于指导油藏平面注采结构的调整。

关键词: 注水效率; 均衡驱替; 非均质性; 降水增油

中图分类号: TE357.6 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2021)03-0124-05

Research on the Planar Equilibrium Displacement Based on Maximum Water Injection Efficiency

CHEN Cunliang¹, MA Kuiqian¹, WANG Xiang², YUE Honglin¹, WU Xiaohui¹

(1. Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin, 300459, China; 2. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu, 213159, China)

Abstract: The existing planar equilibrium displacement evaluation method does not quantitatively consider the heterogeneity of the reservoir. For that reason, a new equation describing the relationship between water injection efficiency and cumulative oil production was built based on the dynamic displacement equation between injection and production wells with consideration of reservoir heterogeneity. The goal was to maximize water injection efficiency. The characteristic conditions of planar equilibrium displacement were obtained by derivation, on which the adjustment method for the injection-production structure of planar equilibrium displacement was developed. It is considered that the characteristic condition of equilibrium displacement in homogeneous reservoirs was that the ratios of injection volume to pore volume in all injection-production directions were the same; while that of equilibrium displacement in heterogeneous reservoirs was that the mentioned ratios in all injection-production directions were in a linear difference relationship. After adjusting the injection-production structure in the offshore BZ Oilfield by the planar equilibrium displacement method, the daily oil production increased by 155 m³, indicating the largely improved development effect. The results demonstrate that the planar equilibrium displacement method based on maximum water injection efficiency can be used guide the adjustment of the reservoir planar injection-production structure.

Key words: water injection efficiency; equilibrium displacement; heterogeneity; water decrease and oil increase

注水开发是目前油田最主要的开发方式, 由于水源易得且经济, 注水开发仍将是未来最重要的开发方式之一, 特别是油田进入中高含水期后, 以注水为核心的综合调整是实现油田稳产、进一步提高

收稿日期: 2020-08-14; 改回日期: 2021-03-07。

作者简介: 陈存良 (1988—), 男, 山东济南人, 2012年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业, 2015年获中国石油大学(华东)油气田开发工程专业硕士学位, 工程师, 主要从事海上油气田开发方面的研究与管理工作。E-mail: chencl4@cnooc.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(编号: 2016ZX05058-001)、“海上稠油油田开发模式研究”(编号: 2016ZX05025-001)和中海石油(中国)有限公司科技攻关项目“渤海双高油田挖潜关键技术研究”(编号: YXKY-2018-TJ-04)资助。

采收率的重要手段^[1-3]。近些年,大量室内试验及油田实践表明,实现均衡驱替可以有效改善油田的开发效果。王军和严科等人^[4-5]以各注采方向同时见水为均衡驱替标准开展了平面注采调整方法研究。杨勇等人^[6]利用室内物模试验开展了平面动用均衡程度的研究。王德龙等人^[7]以各注采方向采出程度相同为均衡驱替标准开展了研究,着重分析了井距和配产对均衡驱替的影响,后期,部分研究人员也以此标准为基础开展了层间或平面均衡驱替的研究^[8-10]。刘敏和韩光明等人^[11-12]定义了驱替突破系数,并以驱替突破系数等于 3 为均衡驱替的界限,开展了平面注采结构的调整。尽管国内外专家学者在纵向和平面均衡驱替方面已经做了大量的工作,并取得了一定的效果。但是,关于均衡驱替的认定标准表述不一,缺乏严谨的理论基础,随意性大,且未将非均质性的影响定量体现到均衡驱替标准中;对于非均质性的考虑侧重于井位部署与优化,鲜有对现有井网的动态调整方法。为此,笔者利用油藏工程方法和渗流力学理论,建立了基于最大注水效率的平面均衡驱替方法,提出了非均质油藏的差异化定量均衡驱替标准,以期为油田实现均衡驱替提供理论依据,为中高含水期油田进一步挖潜剩余油提供技术支持。

1 均衡驱替理论论证

实践表明,在相同注水量下,通过优化井距和产液量实现均衡驱替,油田的整体开发效果最好,累计产油量最多,即注水效率最大。注水效率^[13]是注水井向周边采油井供水驱替出原油总量与注水量的比,可以表示为:

$$\lambda = \frac{N_p}{W_i} \quad (1)$$

式中: λ 为注水效率; N_p 为累计产油量, m^3 ; W_i 为累计注水量, m^3 。

文献 [14] 建立了注采平衡条件下的注采井间动态驱替方程(式(2)),并据此绘制了不同渗透率下累计注水量和累计产油量的关系曲线,如图 1 所示。根据式(1),图 1 中曲线的斜率对应生产状态的注水效率。

$$W_i = BV_\phi \left(e^{\frac{N_p}{V_\phi}} - 1 \right) + N_p \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad B = \frac{\mu_o e^{cS_{wc}}}{ce^d \mu_w} \quad (3)$$

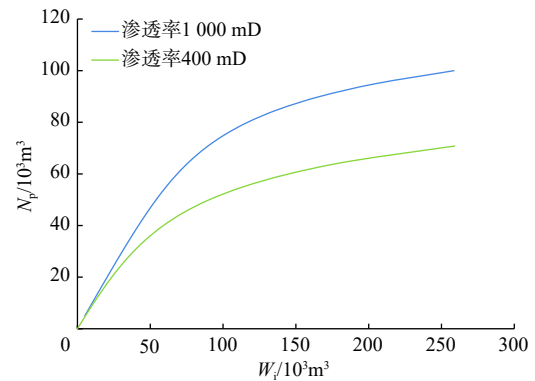


图 1 不同渗透率下累计产油量与累计注水量的关系曲线
Fig. 1 Relationship between cumulative oil production and cumulative water injection at different permeabilities

$$V_\phi = V\phi \quad (4)$$

式中: μ_o 为原油黏度, $mPa \cdot s$; V_ϕ 为油藏孔隙体积, m^3 ; V 为油藏体积, m^3 ; μ_w 为水的黏度, $mPa \cdot s$; ϕ 为孔隙度; S_{wc} 为束缚水饱和度; c 和 d 为相渗曲线指数式回归系数。

从图 1 可以看出,随着注入水不断注入,原油不断被驱替出来,而且随着注水进行,含水率不断上升,单位注水量的原油采出量不断降低,即注水效率不断降低;不同渗透率下的开发规律不同,即相同注水量下的注水效率不同,不均驱替势必造成油田开发效果下降。因此,在注水量一定的情况下,通过分配不同方向的注水量,可使油田的注水效率最大,油田的产油量最多。笔者以此为基础,并以 1 注水井 2 采油井为例,开展平面均衡驱替的论证。先作以下基本假设:各注采方向物性有差异,即平面上存在非均质性;油藏温度不变;油水两相流符合达西渗流规律;岩石、流体均不可压缩;忽略毛管力、重力等的影响。

将式(2)代入式(1),1 注水井 2 采油井的注水效率可以表示为:

$$\lambda = \frac{N_{pt}}{B_1 V_{\phi 1} \left(e^{c_1 \frac{N_{p1}}{V_{\phi 1}}} - 1 \right) + B_2 V_{\phi 2} \left(e^{c_2 \frac{N_{pt} - N_{p1}}{V_{\phi 2}}} - 1 \right) + N_{pt}} \quad (5)$$

式中: $V_{\phi 1}$ 为注采方向 1 的孔隙体积, m^3 ; $V_{\phi 2}$ 为注采方向 2 的孔隙体积, m^3 ; N_{p1} 为注采方向 1 的累计产油量, m^3 ; N_{pt} 为油藏总的累计产油量, m^3 ; c_1 , c_2 , B_1 和 B_2 为各注采方向对应的参数。

由式(5)可知,在累计产油量一定时,注水效率是注采方向 1 累计产油量的函数。对式(5)的倒数进行连续求导,可得:

$$\frac{d\frac{1}{\lambda}}{dN_{p1}} = \frac{1}{N_{pt}} \left(B_1 c_1 e^{c_1 \frac{N_{p1}}{V_{\phi 1}}} - B_2 c_2 e^{c_2 \frac{N_{pt} - N_{p1}}{V_{\phi 2}}} \right) \quad (6)$$

$$\frac{d^2\frac{1}{\lambda}}{dN_{p1}^2} = \frac{1}{N_{pt}} \left(\frac{B_1 c_1^2}{V_{\phi 1}} e^{c_1 \frac{N_{p1}}{V_{\phi 1}}} + \frac{B_2 c_2^2}{V_{\phi 2}} e^{c_2 \frac{N_{pt} - N_{p1}}{V_{\phi 2}}} \right) \quad (7)$$

在 $[0, N_{pt}]$ 区间内, 二阶导数(式(7))恒大于 0, 且当且仅当式(8)成立时, 一阶导数(式(6))的值为 0。也就是说当式(8)成立时注水效率的倒数有最小值, 即注水效率有最大值。

$$B_1 c_1 e^{c_1 \frac{N_{p1}}{V_{\phi 1}}} = B_2 c_2 e^{c_2 \frac{N_{pt} - N_{p1}}{V_{\phi 2}}} \quad (8)$$

令
$$a = \frac{c_1}{c_2} \quad (9)$$

$$b = \left(c_1 B_1 - c_2 B_2 + \ln \frac{c_1 B_1}{c_2 B_2} \right) \frac{1}{c_2} \quad (10)$$

式(8)可简化为:

$$q_2 = a q_1 + b \quad (11)$$

式中: q_1 为注采方向 1 的注水量, 孔隙体积; q_2 为注采方向 2 的注水量, 孔隙体积; a 和 b 为系数。

式(10)表明, 对于非均质油藏, 当各注采方向的注水量满足一定的线性关系时, 就能实现平面均衡驱替。均衡驱替允许各注采方向上的注水量存在一定差异, 达到均衡驱替时注水效率最高。当油藏为均质油藏时, $a=1, b=0$, 此时式(11)可以表示为:

$$q_1 = q_2 \quad (12)$$

从式(12)可以看出, 均质油藏各注采方向的注水量相同时, 就可实现平面均衡驱替。

分析认为, 其他注采方向也有类似规律。

2 均衡驱替调整方法

实现平面均衡驱替的核心是做好油田平面的注采调整工作, 在配注量一定的情况下, 实现平面均衡驱替的重点在于制定采油井的工作制度, 即通过产出液实现注入水的引流, 基于此, 建立了一种基于均衡驱替的调整方法, 具体步骤(以 2 个注采方向为例)为:

1) 计算各个注采方向目前的注水量 q_{now1}, q_{now2} 。

2) 根据储层物性参数, 计算系数 a 和 b , 并假定达到均衡驱替时, 某个注采方向的注水量为 q_{m1} , 根据式(9)计算达到均衡驱替时, 其他注采方向的注水量 q_{m2} 。

3) 计算各个注采方向需要的注水量。

$$\Delta q_1 = q_{m1} - q_{now1} \quad (13)$$

$$\Delta q_2 = q_{m2} - q_{now2} \quad (14)$$

式中: Δq_1 为要达到均衡驱替时注采方向 1 所需的注水量, 孔隙体积; Δq_2 为要达到均衡驱替时注采方向 2 所需的注水量, 孔隙体积; q_{m1} 为达到均衡驱替时注采方向 1 的注水量, 孔隙体积; q_{m2} 为达到均衡驱替时注采方向 2 的注水量, 孔隙体积; q_{now1} 为注采方向 1 目前的注水量, 孔隙体积; q_{now2} 为注采方向 2 目前的注水量, 孔隙体积。

4) 根据计划时间计算各个注采方向的日注水量:

$$q_{J1} = \frac{\Delta q_1 V_{\phi 1}}{t} \quad (15)$$

$$q_{J2} = \frac{\Delta q_2 V_{\phi 2}}{t} \quad (16)$$

$$q_J = q_{J1} + q_{J2} \quad (17)$$

式中: q_{J1} 为注采方向 1 的日注水量, m^3 ; q_{J2} 为注采方向 2 的日注水量, m^3 ; q_J 为单井日注水量, m^3 ; t 为调控时间, d。

5) 计算单井日注水量与计划日配注量之间的误差, 并不断更新 q_{m1} , 重复步骤 2)~5), 直至满足生产误差要求, 输出各注采方向的注水量。计算误差:

$$\delta = |q_{jd} - q_J| \quad (18)$$

式中: q_{jd} 为计划日配注量, m^3 ; δ 为计算误差, m^3 。

6) 根据油藏工程理论, 注水量、采出程度、含水饱和度及其对应的油、水相渗具有一一对应关系。因此, 可以计算此时各采油井的生产压差。

$$\Delta p_1 = \frac{q_{J1} L_1}{\bar{K}_1 A_1 \left(\frac{K_{ro} \bar{S}_{w1}}{\mu_o} + \frac{K_{rw} \bar{S}_{w1}}{\mu_w} \right)} \quad (19)$$

$$\Delta p_2 = \frac{q_{J2} L_2}{\bar{K}_2 A_2 \left(\frac{K_{ro} \bar{S}_{w2}}{\mu_o} + \frac{K_{rw} \bar{S}_{w2}}{\mu_w} \right)} \quad (20)$$

式中: Δp_1 为注采方向 1 所需的注采压差, MPa; Δp_2 为注采方向 2 所需的注采压差, MPa; L_1 为注采方向 1 的井距, m; L_2 为注采方向 2 的井距, m; \bar{K}_1 为注采方向 1 的平均渗透率, mD; \bar{K}_2 为注采方向 2 的平均渗透率, mD; A_1 为注采方向 1 的截面积, m^2 ; A_2 为注采方向 2 的截面积, m^2 ; K_{ro} 为油相相对渗透率; K_{rw} 为水相相对渗透率; \bar{S}_{w1} 为注采方向 1 的平均含水饱和度; \bar{S}_{w2} 为注采方向 2 的平均含水饱和度。

对于多注多采的油田, 调整一口采油井势必会

影响其他注水井及采油井, 大大增加了调整难度。因此, 笔者建议优先调整非均衡程度大的井组, 逐步实现油田的均衡驱替。定义非均衡系数(见式(21)), 用其评价注采井组的非均衡程度, 该值越大, 非均衡程度越大, 应优先调整。

$$\gamma_i = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta q_{ij}^2}{n} \quad (21)$$

式中: γ_i 为注采井组 i 的非均衡系数; Δq_{ij} 为注水井 i 与采油井 j 要达到均衡驱替时所需的注水量, 孔隙体积; n 为注采井组 i 内采油井的数量。

3 现场应用

BZ34 油田位于渤海南部海域, 位于黄河口凹陷中央构造带, 断层普遍发育, 单砂体石油地质储量较小, 非均质性强, 主要分布在明化镇组和馆陶组, 原油黏度为 2~12 mPa·s, 属于中轻质油复杂断块油藏。

首先在该油田的 X 砂体(如图 2 所示)开展了平面均衡驱替调整试验。X 砂体位于油田西部, 砂体均质性好, 部署 2 口采油井开采该砂体, 部署 1 口注水井(采用分层管柱与其他砂体共用)注水。自 2015 年开发至今, 砂体累计产油约 $18.66 \times 10^4 \text{ m}^3$, 目前已进入中高含水阶段, 采油井 X18 井日产液 96 m^3 , 含水率 56%, 采油井 X29 井日产液 133 m^3 , 含水率为 91%, 开展平面均衡驱替调整有助于改善开发效果。将注水井与采油井 X18 井记为注采方向 1, 注水井与采油井 X29 井记为注采方向 2。计算出注采方向 1 目前的注水量为 0.23 倍孔隙体积, 注采方向 2 目前的注水量为 0.28 倍孔隙体积。根据上文理论可知, 达到平面均衡驱替时 2 个注采方向注水量与孔隙体积的比满足一定的线性差异, 由于 2 个注采方向的差距不大, 计划调整周期为 1 年, 维持注水井目前日注水量 250 m^3 , 迭代计算注采方向 1 的注水量为 0.30 倍孔隙体积, 注采方向 2 的注水量为 0.31 倍孔隙体积, 非均衡系数为 0.0029。结合相渗曲线, 计算注采方向 1 的注采压差为 0.83 MPa, 注采方向 2 第注采压差为 0.40 MPa, 根据原油体积系数 1.141, 换算采油井 X18 井调整后日产液量 157 m^3 , 采油井 X29 井调整后日产液量 84 m^3 。2019 年 4 月调整工作制度后, 采油井 X18 井含水率降至 51.5%, 采油井 X29 井含水率降至 88.5%, 砂体日增油量 32 m^3 , 起到了很好的降水增油效果。



图 2 X 砂体井位示意

Fig.2 Well location of sand body X

在 X 砂体试验的基础上, 对 BZ34 油田部分砂体开展了平面均衡驱替调整, 调整情况及效果见表 1。除 X 砂体外, 调整后 BZ34 油田其余砂体日增油量 123 m^3 , 合计日增油量约 155 m^3 。上述实践再次证明基于本文提出的均衡驱替理念开展平面均衡注采调整可以有效改善油田的开发效果。

表 1 部分砂体调整结果

Table 1 Adjustment results of partial sand bodies

砂体	注采井组	非均衡系数	是否调整	日增油量/ m^3
1D	X3	0.0039	是	37
	X4	0.0026	是	18
2D	X27	0.0011	否	
	X16	0.0028	是	33
	X17	0.0011	否	
X-1	X8	0.0021	是	35

但需要注意的是, 在多注多采系统中对于各方向动静态参数的劈分是一个重要的步骤, 现场多依据开发经验或者面积单元劈分静态参数, 利用示踪剂分析资料或采用注采井间动态连通性方法^[15-17]劈分动态参数(油、水、液)。油田开发效果的好坏与平面均衡驱替有关, 但对于多层油藏, 还与层间均衡驱替有关, 此类油藏应注重层间均衡与平面均衡的结合。另外, 注水开发调整并非一成不变, 应根据开发动态不断调整注采方案, 从而达到均衡驱替的目的。随着注采井数量增多, 调整难度增大。因此, 建议优先调整非均衡程度较高的注采井组。

4 结论

1) 考虑油藏的非均质性, 基于最大注水效率提出了平面均衡驱替开发理论, 弥补了传统方法未将

非均质特性定量体现在均衡驱替标准中的缺陷。

2) 对于非均质油藏, 当各注采方向的注水量满足一定的线性关系时, 即可实现平面均衡驱替, 此时注水效率最高。

3) 提出了平面均衡驱替注采调整方法及非均衡程度评价方法, 根据非均衡程度调整注采结构, 就可实现注水开发油藏的均衡驱替。

4) 在 BZ34 油田的实践, 验证了平面均衡驱替方法的可靠性。BZ34 油田注采结构调整后, 日增油量 155 m^3 , 有效改善了该油田的开发效果。

参 考 文 献

References

- [1] 常毓文, 袁士义, 曲德斌. 注水开发油田高含水期开发技术经济政策研究[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 97-100.
CHANG Yuwen, YUAN Shiyi, QU Debin. Technical and economic limits for the development of high water cut oilfields[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2005, 32(3): 97-100.
- [2] 胡永乐, 王燕灵, 杨思玉, 等. 注水油田高含水后期开发技术方针的调整[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 65-69.
HU Yongle, WANG Yanling, YANG Siyu, et al. Adjustment of technical policy for water-flooding oilfield with high water cut in the late stage of development[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(5): 65-69.
- [3] 韩大匡. 关于高含水油田二次开发理念、对策和技术路线的探讨[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 583-591.
HAN Dakuang. Discussions on concepts, countermeasures and technical routes for the redevelopment of high water-cut oilfields[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2010, 37(5): 583-591.
- [4] 王军. 注采井网均衡驱替的产量设计[J]. 特种油气藏, 2005, 12(6): 37-39.
WANG Jun. Flow rate design for equilibrium displacement of flood pattern[J]. *Special Oil & Reservoirs*, 2005, 12(6): 37-39.
- [5] 严科, 张俊, 王本哲, 等. 平面非均质油藏均衡水驱调整方法研究[J]. 特种油气藏, 2015, 22(5): 86-89.
YAN Ke, ZHANG Jun, WANG Benzhe, et al. Balance water flooding adjustment of plane heterogeneous reservoir[J]. *Special Oil & Reservoirs*, 2015, 22(5): 86-89.
- [6] 杨勇, 姜汉桥, 马康. 断块油藏平面动用均衡程度实验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(16): 168-172.
YANG Yong, JIANG Hanqiao, MA Kang. Experimental research of development equilibrium degree in fault block reservoir[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(16): 168-172.
- [7] 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.
WANG Delong, GUO Ping, WANG Zhouhua, et al. Study on equilibrium displacement effect of injection-production well group in heterogeneous reservoir[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute (Science & Technology Edition)*, 2011, 33(5): 122-125.
- [8] 崔传智, 姜华, 段杰宏, 等. 基于层间均衡驱替的分层注水井间合理配注方法[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 94-96.
CUI Chuazhi, JIANG Hua, DUAN Jiehong, et al. Reasonable injection rate allocation method of separate-layer water injection wells based on interlayer equilibrium displacement[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(5): 94-96.
- [9] 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): 41-45.
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 (Natural Science Edition)*, 2018, 30(6): 41-45.
- [10] 崔传智, 刘力军, 丰雅, 等. 基于均衡驱替的分段注水层段划分及合理配注方法[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(4): 67-71.
CUI Chuazhi, LIU Lijun, FENG Ya, et al. Layer classification and rational sectional water injection allocation method based on equilibrium displacement[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(4): 67-71.
- [11] 刘敏. 埕岛油田馆陶组上段油藏合理产液量及注水量矢量优化方法[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(3): 105-109.
LIU Min. Vector optimization method for reasonable fluid production and water injection rate of reservoir in the upper Guantao Formation, Chengdao Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(3): 105-109.
- [12] 韩光明, 代兆国, 杨建雷, 等. 基于均衡驱替的多井干扰下产液量优化方法[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(2): 254-258.
HAN Guangming, DAI Zhaoguo, YANG Jianlei, et al. Liquid producing capacity optimization method under multiwell interference based on equilibrium displacement[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2017, 39(2): 254-258.
- [13] 黄勇, 王业飞, 孙致学, 等. 基于流线模拟的高含水油田注水效率优化[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(2): 53-58.
HUANG Yong, WANG Yefei, SUN Zhixue, et al. Optimization of water injection efficiency based on streamline simulation in high water cut stage[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science)*, 2017, 32(2): 53-58.
- [14] 陈存良, 王相, 刘学, 等. 基于最大净现值的水驱多层油藏均衡驱替方法[J]. 特种油气藏, 2019, 26(1): 122-125.
CHEN Cunliang, WANG Xiang, LIU Xue, et al. Isostatic displacement of waterflooding multi-layer reservoir based on maximum net present value[J]. *Special Oil & Reservoirs*, 2019, 26(1): 122-125.
- [15] ALBERTONI A, LAKE L W. Inferring connectivity only from well-rate fluctuations in water floods[R]. SPE 83381, 2003.
- [16] SAYARPOUR M. Development and application of capacitance-resistive models to water/CO₂ floods[D]. Austin: The University of Texas, 2008: 41-44.
- [17] GENTIL P H. The use of multilinear regression models in patterned waterfloods: physical meaning of the regression coefficients[D]. Austin: The University of Texas, 2005: 5-8.

[编辑 刘文臣]