

# 一种考虑层间干扰的多层合采油藏水驱采收率预测方法

李廷礼,高振南,党胜国,耿志刚,杜春晓

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459)

**摘要:**考虑层间干扰研究多层合采油藏各层水驱采收率变化规律,对制定油田开发调整政策具有重要意义。联合 Buckley-Leverett 水驱理论和 Welge 水驱方程,推导了考虑层间渗流阻力干扰的多层合采油藏水驱采收率计算方法。该方法通过各层渗流阻力差异体现层间干扰程度即注入端各层吸水量系数值,针对各层的注入量采用水驱油理论和物质平衡原理建立水驱采收率计算式,循环迭代计算各小层的渗流阻力、吸水量和水驱指标(含水饱和度、含水率、水驱波及系数及采收率),可以预测各小层水驱采收率与累积注入量关系。该方法应用于渤海 QHD 油田高含水期开发调整,首次在海上采取大规模水平井联合定向井分层系开发模式,通过实施开发调整,各主力层采油速度由 0.5%~0.8% 提高至 1.9%~2.2%,采收率由 10.4%~22.4% 提高至 26.5%~37.9%,极大改善了油田开发效果。应用实例表明,该方法计算简便且具有较高的准确性和实用性,可真实反映多层合采油藏水驱过程中高、中、低渗层(低、中、高黏层)之间的干扰程度及其对水驱采收率的影响。

**关键词:**多层油藏;渗透率级差;黏度级差;层间干扰;渗流阻力;开发层系;水驱采收率

**中图分类号:**TE341 **文献标志码:**A

## A water flooding recovery prediction method for multi-layer combined production reservoir considering inter-layer interference

LI Tingli, GAO Zhennan, DANG Shengguo, GENG Zhigang, DU Chunxiao

(CNOOC China Limited Tianjin Branch, Tianjin 300459, China)

**Abstract:** It is important to study the change law of water flooding recovery rate of each layer in a multi-layer co-production reservoir considering inter-layer interference for the formulation of oilfield development adjustment policy. Based on the Buckley-Leverett water flooding theory and the Welge water flooding equation, it was derived the calculation method of water flooding recovery rate for multi-layer combined reservoirs considering the inter-layer seepage resistance interference. The method reflects the degree of inter-layer interference through the difference in seepage resistance of each layer, i.e., the value of the water absorption coefficient of each layer at the injection end. The calculation formula of the water-driven recovery rate is established by using the water-driven oil theory and material balance principle for the injection amount of each layer, and the seepage resistance, water absorption volume, and water-driven index (water saturation, water cut, water flooding swept efficiency and oil recovery rate) of each small layer are calculated by cyclic iteration, which can predict the relationship between water-driven recovery rate and cumulative injection amount of each small layer. This method was applied to the development adjustment of the QHD Oilfield in the Bohai Sea during the high water cut period. For the first time, the development mode of large-scale horizontal wells combined with directional wells was adopted offshore. Through the implementation of development adjustment, the oil recovery rate of each main formation was increased from 0.5%–0.8% to 1.9%–2.2% and the recovery factor was increased from 10.4%–22.4% to 26.5%–37.9%, which greatly improved the oilfield development effect. The application example shows that the method is easy to calculate and has high accuracy and practicality, and can truly reflect the interference degree among high, medium, and low permeability layers (low, medium and high viscosity layers) in the waterflooding process of multi-layer combined reservoir and its influence on the recovery rate of waterflooding.

**Key words:** multi-layer reservoir; permeability difference; viscosity difference; inter-layer interference; seepage resistance; development layer; water flooding recovery

**引用格式:** 李廷礼,高振南,党胜国,等.一种考虑层间干扰的多层合采油藏水驱采收率预测方法[J].复杂油气藏,2023,16(2):204–210,214.

LI Tingli, GAO Zhennan, DANG Shengguo, et al. A water flooding recovery prediction method for multi-layer combined production reservoir considering inter-layer interference[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(2): 204–210, 214.

收稿日期:2022-06-02;改回日期:2022-07-12。

第一作者简介:李廷礼(1978—),高级工程师,主要从事海上油气田开发综合研究工作。E-mail:litl@cnooc.com.cn。

基金项目:“十三五”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”(2016ZX05058001)。

海上油田受地质情况复杂、开发成本高等因素制约,初期通常采用多层合采开发方式,以降低开发风险和提高开发效益。随着开发不断深入,多层合采油藏层间矛盾逐渐暴露,直接影响油田含水上升率、递减率和水驱采收率等开发指标。因此针对层间干扰研究多层合采油藏水驱开发规律,对制定油田开发政策具有重要指导作用。

由于层间干扰影响因素多且各因素之间关联作用机制极为复杂,针对层间干扰作用机理及其对水驱开发效果的影响研究一直是行业热点和难点。早期通过分层产能、产吸剖面等测试手段获得直接的资料,后来有的学者利用室内实验模拟层间干扰及其对驱替效果影响,同时采用数模方法拟合或预测层间干扰控制因素及其对开发指标的影响<sup>[1-7]</sup>。于春生等设计多层非均质水驱油实验,研究多层油藏层间干扰主控因素及其对驱油效率的影响<sup>[8-11]</sup>;许家峰等基于层间干扰特征,建立多层合采砂岩稠油油藏层间干扰动态表征方法<sup>[12-14]</sup>;李文红等以生产动态数据和分层测试数据为基础,通过数据整理建立水驱油藏多层合采井产量动态劈分方法<sup>[15-18]</sup>;支继强等考虑层间渗流阻力,提出多层合采油藏注入液劈分机理及优化方法<sup>[19-20]</sup>;冯其红等考虑层间非均质的影响,建立多层油藏开发指标预测方法<sup>[21]</sup>;王增林等根据注采关系和驱替实验数据,推导出水驱油田采收率预测方法<sup>[22-24]</sup>。目前考虑层间干扰的多层油藏水驱开发研究主要集中在动态表征、注采劈分和指标预测等,而对于层间干扰动态变化规律及其对水驱采收率影响的研究较少。

针对上述情况,以油田开发实践认识为基础,从 Buckley-Leverett 水驱理论和 Welge 水驱方程出发,推导了考虑层间渗流阻力干扰的多层合采油藏水驱采收率计算方法,研究合采过程中各层动态干扰程度及其对水驱采收率的影响,并应用于渤海 QHD 油田高含水期开发调整研究及实施,极大改善了油田开发效果,为该类油田高效开发提供借鉴。

## 1 计算方法

### 1.1 渗流阻力、吸水量计算

针对多层油藏(见图1),研究一维水驱油过程,假设:①各层渗透率或流体性质有差异,油层厚度、渗流截面积、注采井距一样;②油相、水相为达西线性流,非活塞式驱替;③不考虑重力、毛管压力与启动压力梯度,岩石和流体不可压缩;④合注合采,注

采平衡,不考虑层间窜流,各层注水量按照各层渗流阻力值劈分。

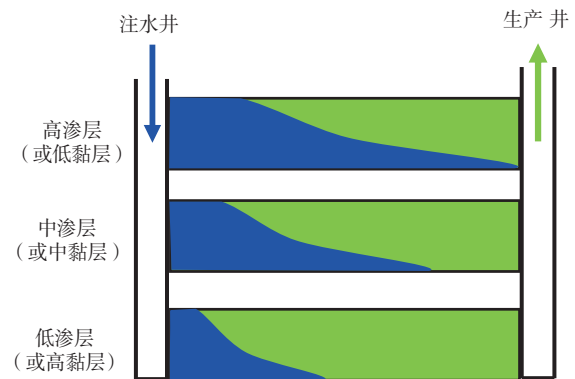


图1 多层合采水驱模型示意

根据达西定律得到任一含水饱和度为  $S_w$  的截面油水流量为<sup>[25]</sup>:

$$q_i = -KA \left[ \frac{k_{ro}(S_w)}{\mu_o} + \frac{k_{rw}(S_w)}{\mu_w} \right] \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

对式(1)变形:

$$q_i = - \frac{dp}{dx} \frac{KA \left[ \frac{k_{ro}(S_w)}{\mu_o} + \frac{k_{rw}(S_w)}{\mu_w} \right]}{\quad} \quad (2)$$

式(2)分母项即为该截面的油水渗流阻力:

$$\Omega = \frac{dx}{KA \left[ \frac{k_{ro}(S_w)}{\mu_o} + \frac{k_{rw}(S_w)}{\mu_w} \right]} \quad (3)$$

水驱油过程中随着前缘饱和度移动,存在两相区和纯油区,因此渗流阻力由两相区渗流阻力和纯油区渗流阻力组成,对式(3)进行积分得到注入端到出口端油水渗流阻力:

$$\Omega = \int_0^{x_f} \frac{1}{KA \left[ \frac{k_{ro}(S_w)}{\mu_o} + \frac{k_{rw}(S_w)}{\mu_w} \right]} dx + \frac{L - x_f}{KA \left[ \frac{k_{ro}(S_{wi})}{\mu_o} \right]} \quad (4)$$

式(1)~(4)中: $q_i$ 为流过任一含水饱和度为  $S_w$  的截面产液量,  $m^3/d$ ;  $\Omega$ 为注入端到出口端油水渗流阻力,  $(mPa \cdot s)/(\mu m^2 \cdot m)$  或  $MPa/(m^3 \cdot d)$ ;  $S_w$ 为任一时刻含水饱和度,小数;  $K$ 为储层渗透率,  $10^{-3} \mu m^2$ ;  $k_{ro}$ 为对应含水饱和度  $S_w$  的油相相对渗透率,小数;  $k_{rw}$ 为对应含水饱和度  $S_w$  的水相相对渗透率,小数;  $\mu_o$ 为地层原油黏度,  $mPa \cdot s$ ;  $\mu_w$ 为地层水黏度,  $mPa \cdot s$ ;  $A$ 为油层渗流截面,  $m^2$ ;  $L$ 为注入端到出口端的距离,  $m$ ;  $x$ 为对应含水饱和度  $S_w$  的移动距离,  $m$ ;  $x_f$ 为前缘含水饱和度移动距离,  $m$ 。

根据 Buckley-Leverett 渗流理论,得到前缘饱和度移动方程:

$$x = \frac{f'_w(S_w)}{A\Phi} \int_0^t q_t dt \quad (5)$$

当前缘含水饱和度为  $S_{wf}$  时,得到前缘饱和度移动距离:

$$x_f = \frac{f'_w(S_{wf})}{A\Phi} \int_0^t q_t dt \quad (6)$$

将式(5)和(6)联立:

$$x = \frac{x_f}{f'_w(S_{wf})} f'_w(S_w) \quad (7)$$

将式(7)求导:

$$dx = \frac{x_f}{f'_w(S_{wf})} df'_w(S_w) \quad (8)$$

将式(8)代入式(4)得

$$\Omega = \int_{S_{wc}}^{S_{wf}} \frac{x_f}{KA \left[ \frac{k_{ro}(S_w)}{\mu_o} + \frac{k_{rw}(S_w)}{\mu_w} \right]} df'_w(S_w) + \frac{L - x_f}{KA \left[ \frac{k_{ro}(S_{wi})}{\mu_o} \right]} \quad (9)$$

式(9)中,  $S_{wf}$  为前缘含水饱和度,小数;  $S_{wc}$  为束缚水饱和度,小数。

根据油水分流量方程得到任一含水饱和度为  $S_w$  的截面含水率:

$$f_w(S_w) = \frac{\frac{k_{rw}(S_w)}{\mu_w}}{\frac{k_{ro}(S_w)}{\mu_o} + \frac{k_{rw}(S_w)}{\mu_w}} \quad (10)$$

对式(10)进行变形得

$$\frac{k_{ro}(S_w)}{\mu_o} + \frac{k_{rw}(S_w)}{\mu_w} = \frac{k_{rw}(S_w)}{f_w(S_w)} \quad (11)$$

将式(11)代入式(9)得

$$\Omega = \int_0^{f'_w(S_{wf})} \frac{x_f}{KA \left[ \frac{k_{ro}(S_w)}{\mu_w} \right]} df'_w(S_w) + \frac{L - x_f}{KA \left[ \frac{k_{ro}(S_{wi})}{\mu_o} \right]} \quad (12)$$

笔者在前人研究基础上,结合油田开发实践认识,发现水驱油藏层间渗流阻力差异不但影响产出端各层产出量<sup>[12-18]</sup>,而且影响注入端各层注入量<sup>[19-20]</sup>,因此某一时刻(或某一时间段)注入端层间

干扰可以通过该时刻(或某一时间段)的渗流阻力值反映出来,即注入端各层注入量根据各层渗流阻力比值进行劈分,第  $i$  层吸水量系数为:

$$\delta_i = \frac{\frac{1}{\Omega_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\Omega_i}} \quad (13)$$

式(13)中,  $n$  为纵向上油层总数。

已知油层物性、流体性质与相渗曲线等参数,利用式(12)可计算任一含水率导数值对应的注入端到出口端的渗流阻力值,而含水率导数与累积注入量(累积注入孔隙体积倍数)为倒数关系,从而得到渗流阻力随着累积注入量的变化关系,然后利用式(13)计算第  $i$  小层吸水量系数。

下面以渤海 QHD 油田为例分析水驱过程中各层渗流阻力、吸水量系数变化特征。该油田纵向上 3 个小层,各层渗透率均为  $3\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度均为 35%,油层厚度均为 10 m,各小层地层原油黏度分别为 60, 90, 120 mPa·s,地层水黏度均为 0.5 mPa·s,各层采用相同相渗数据(见图 2);注采井距为 360 m,油层宽度为 200 m。

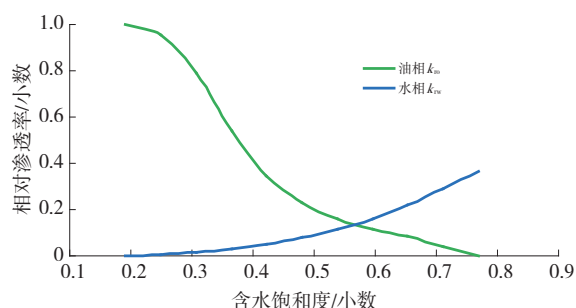


图2 油水相渗曲线

如图3、图4所示,各层渗流阻力、吸水量系数随着注入PV不断增大而动态变化,在不同含水期呈现出不同的变化特征:(1)初期各层含水饱和度均为原始状况,渗流阻力主要由流体性质决定,低黏层渗流阻力最小,吸水量系数最大,中黏层次之,高黏层渗流阻力最大,吸水量系数最小,低、中、高黏层渗流阻力分别为 54, 93, 146 MPa/(m<sup>3</sup>·d),吸水量系数分别为 0.50, 0.30, 0.20。(2)随着注入PV不断增加,含水率逐渐上升,进入低中含水期,各层渗流阻力逐渐下降,但由于各层水驱推进速度差异,导致各层渗流阻力下降速度差异大,低黏层下降最快,中黏层次之,高黏层最慢。相应地低黏层吸水量系

数逐渐上升,而中黏层、高黏层吸水量系数逐渐下降,多层合采层间干扰作用逐渐增强,各层吸水量差异增大,当含水率为80%(注入0.2 PV)时低、中、高黏层渗流阻力分别为11,58,143 MPa/(m<sup>3</sup>·d),吸水量系数分别为0.65,0.20,0.15。(3)进入高含水期,各层渗流阻力差异随着含水率上升而加大,低黏层渗流阻力随着含水率上升而迅速下降,吸水量系数随着含水率上升而迅速增加,而中黏层、高黏层吸水量系数呈急剧下降的趋势,层间干扰作用更明显,各层吸水量差异更大,当含水率为95%(注入1 PV)时,低、中、高黏层渗流阻力分别为1,13,107 MPa/(m<sup>3</sup>·d),吸水量系数分别为0.88,0.10,0.02。

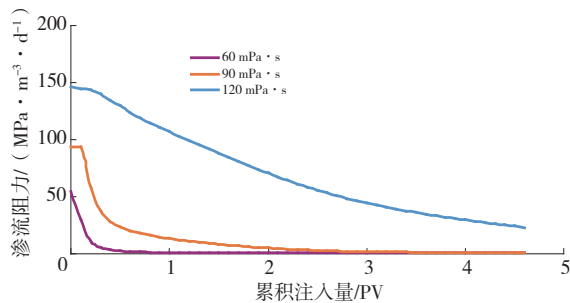


图3 各层渗流阻力随累积注入量增大而变化曲线

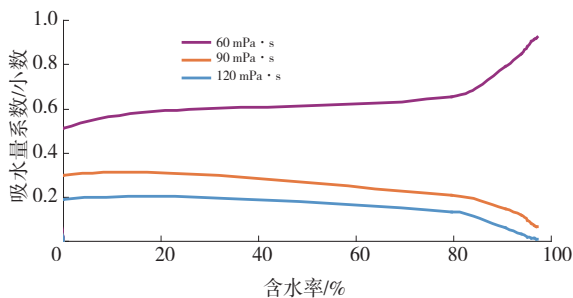


图4 各层吸水量系数随含水率增大而变化曲线

通过统计分析QHD油田多层合注合采条件下的吸水剖面、产液剖面、油水井开关层措施等资料,发现对于高孔高渗油层来说,吸水量系数与地层原油黏度相关性最大,吸水量系数随着地层原油黏度增加而下降(见图5)。地层原油黏度40~120 mPa·s时,吸水量系数平均值为0.50;地层原油黏度120~180 mPa·s时,吸水量系数平均值为0.35;地层原油黏度180~260 mPa·s时,吸水量系数平均值为0.25。总体来说,油田实际生产数据与图4规律性吻合较好,说明本文吸水量系数计算方法具有较高的准确性和实用性。

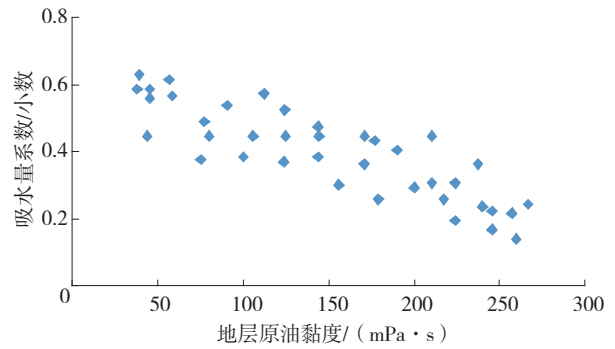


图5 QHD油田吸水量系数与地层原油黏度关系

## 1.2 水驱采收率计算

随着水驱前缘饱和度不断向前移动,油水两相区逐渐增加,根据Welge方程得到油水两相区即注入水波及区平均含水饱和度<sup>[25]</sup>:

$$\bar{S}_w = \frac{\int_0^{x_f} S_w dx}{x_f} \quad (14)$$

将式(8)代入式(14)得

$$\bar{S}_w = \frac{\int_0^{f'_w(S_{wf})} S_w df'_w(S_{wf})}{f'_w(S_{wf})} \quad (15)$$

对式(15)积分可得

$$\bar{S}_w = S_{wf} + \frac{1 - f_w(S_w)}{f'_w(S_{wf})} \quad (16)$$

根据式(16)得到两相区平均含水饱和度之后,进一步得到两相区驱油效率:

$$E_D = \frac{\bar{S}_w - S_{wc}}{1 - S_{wc}} \quad (17)$$

设水驱体积波及系数为 $E_v$ ,如果忽略注入水与地层水体积系数差异,则油水两相区水的总体积等于水驱波及区水的体积与未波及区水的体积之和<sup>[26-27]</sup>:

$$Ax_f \phi \bar{S}_w = Ax_f \phi E_v S_{wf} + Ax_f \phi S_{wc} (1 - E_v) \quad (18)$$

式(18)中, $\phi$ 为油层孔隙度。

整理式(18)得到水驱体积波及系数:

$$E_v = \frac{\bar{S}_w - S_{wc}}{S_{wf} - S_{wc}} \quad (19)$$

根据式(17)与(19)得到两相区水驱采收率:

$$R = \frac{\bar{S}_w - S_{wc}}{1 - S_{wc}} \frac{\bar{S}_w - S_{wc}}{S_{wf} - S_{wc}} \quad (20)$$

由于纯油区水驱采收率为0,当水驱前缘饱和度移动距离 $x_f < L$ 时,水驱采收率为:

$$R = \frac{\bar{S}_w - S_{wc}}{1 - S_{wc}} \frac{\bar{S}_w - S_{wc}}{S_{wf} - S_{wc}} \frac{x_f}{L} \quad (21)$$

在已知油层渗透率、流体性质、相对渗透率曲



线等参数条件下,利用式(16)可计算任一前缘含水饱和度 $S_{wf}$ 对应的平均含水饱和度 $\bar{S}_w$ 值,而该前缘含水饱和度对应的含水率导数 $f'_w(S_{wf})$ 与累积注入量(累积注入孔隙体积倍数PV)为倒数关系,从而得到水驱采收率随着累积注入量的变化关系。

## 2 实例计算

### 2.1 计算流程

考虑层间渗流阻力干扰的多层油藏水驱采收率具体计算流程如下:①收集整理各层渗透率 $K$ 、孔隙度 $\phi$ 、地层原油黏度 $\mu_o$ 、地层水黏度 $\mu_w$ 、相渗曲线( $S_w, k_{ro}, k_{rw}$ )等油藏参数,确定注采井距 $L$ 、渗流截面积 $A$ 、日注水量及时间步长;②利用式(12)计算各小层渗流阻力值 $\Omega$ ;③利用式(13)计算第 $i$ 小层吸水量系数 $\delta_i$ ,并根据日注水量与时间步长计算各层阶段注水量及累积注水量;④利用式(6)计算水驱前缘饱和度移动距离 $x_f$ ,利用式(15)计算该阶段的前缘含水饱和度 $S_{wf}$ 与平均含水饱和度 $\bar{S}_w$ 值;⑤利用式(21)计算该阶段的水驱采收率 $R$ ;⑦重复步骤②~⑥,直至达到含水率上限。下面以1.1中的QHD油田地质油藏参数进行实例计算与分析。

### 2.2 各层含水率动态变化特征

随着注入PV不断增加,各层渗流阻力、吸水量系数差异逐渐加大,低黏层吸水量系数最大,因此含水饱和度的上升速度最快,中黏层次之,高黏层吸水量系数最小,含水饱和度的上升速度最慢,如图6、图7所示。多层合采层间干扰本质上是由层间渗流阻力差异引起的,由于各层流体性质差异大导致各层渗流阻力差异大,引起注水开发过程中各层吸水不均,注入水通常沿着渗流阻力较小的层(低黏层或高渗层)突进,容易形成单层水窜;而渗流阻力较大的层(高黏层或低渗层)往往吸水较少,水驱储量动用程度低。

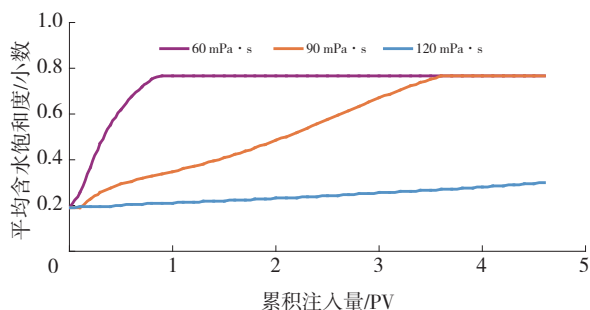


图6 各层平均含水饱和度与累积注入量关系曲线

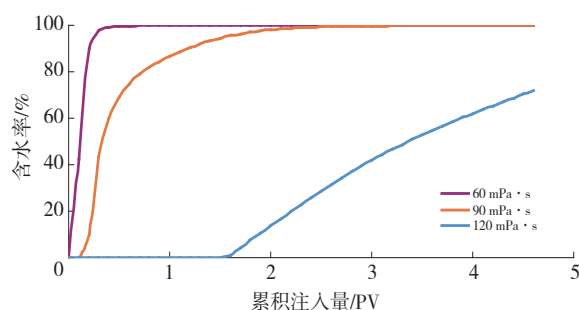


图7 各层含水率与累积注入量关系曲线

### 2.3 各层水驱采收率对比分析

多层合采层间渗流阻力干扰不但影响注水井各层吸水不均,而且影响生产井各层产出不均。水驱采收率计算结果表明,由于各层流体性质差异导致层间矛盾在初期就表现出来,并且层间干扰作用随着含水率上升而加剧,各层水驱波及系数、采收率随着注入量增加逐渐上升,但上升速度差异较大,低黏层上升速度最快,水驱波及系数、采收率最高,水驱采收率达66%,中黏层次之,而高黏层上升速度最慢,水驱波及系数、采收率最低,水驱采收率仅5%(见图8、图9)。这是由于多层油藏合采过程中层间干扰程度随着累积注入量增加而加剧,高渗层对低渗层注入及产出的干扰程度最大,即高渗层抑制低渗层注入及产出能力,导致低水驱波及系数、采收率最低;而高渗层对中渗层的干扰程度表现一般,因此中渗层水驱波及系数、采收率与三层综合水驱波及系数、采收率变化趋势一致。

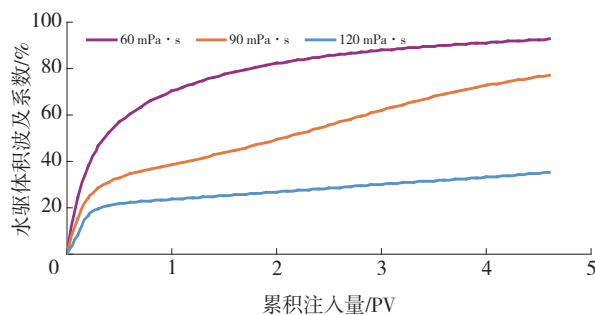


图8 各层水驱波及系数与累积注入量关系曲线

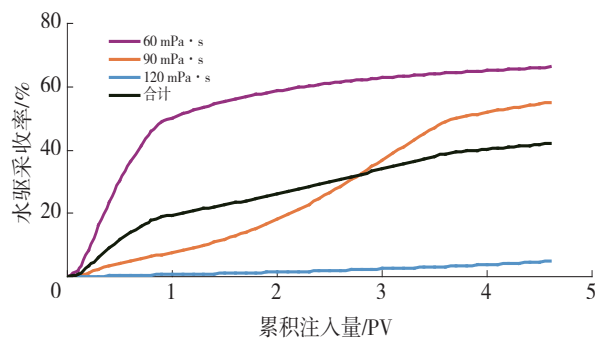


图9 各层水驱采收率与累积注入量关系曲线

进一步研究多层油藏不同渗透率级差、黏度级差下水驱采收率。以最高渗透率 $3\,000\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$ 为基准渗透率,级差为2,3,4,5的三层合采油藏水驱采收率计算结果见图10,可以看出,水驱采收率随着渗透率级差增加而减少,并且级差越大,层间干扰越严重,因此水驱采收率减少幅度越大。

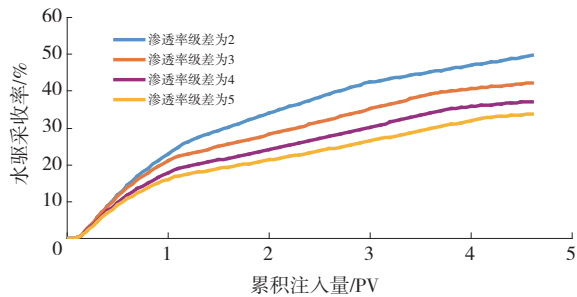


图10 不同渗透率级差下水驱采收率与累积注入量关系曲线

以最低地层原油黏度 $60\,\text{mPa}\cdot\text{s}$ 为基准黏度,级差为2,3,4,5的三层合采油藏水驱采收率计算结果见图11,可以看出,水驱采收率随着黏度级差增加而减少,并且级差越大,层间干扰越严重,因此水驱采收率减少幅度越大。但是同样级差条件下,不同地层原油黏度的油层合采水驱采收率比不同渗透率的

油层合采的小,可见流体性质差异比渗透率差异导致层间干扰程度更严重,对水驱采收率影响更大。

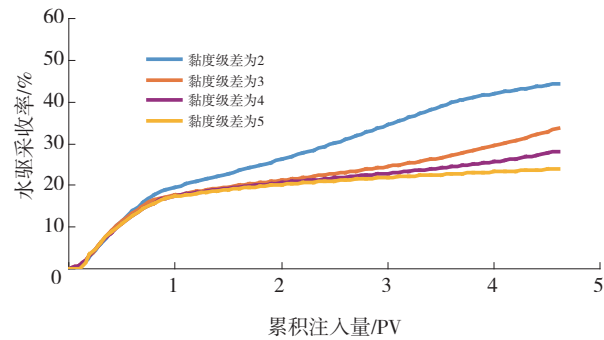


图11 不同黏度级差下水驱采收率与累积注入量关系曲线

### 3 油田应用

QHD是渤海第一个上亿吨级的大型河流相稠油油田,油田构造幅度低,油水关系复杂,渗透率平均 $3\,000\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$ ,地层原油黏度 $78\sim 260\,\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。该油田2001年10月投产,初期采用一套开发层系,反九点井网,注采井距 $360\,\text{m}$ 。2010年进入高含水期,油田层间矛盾愈加严重,导致含水上升快、产量递减大。

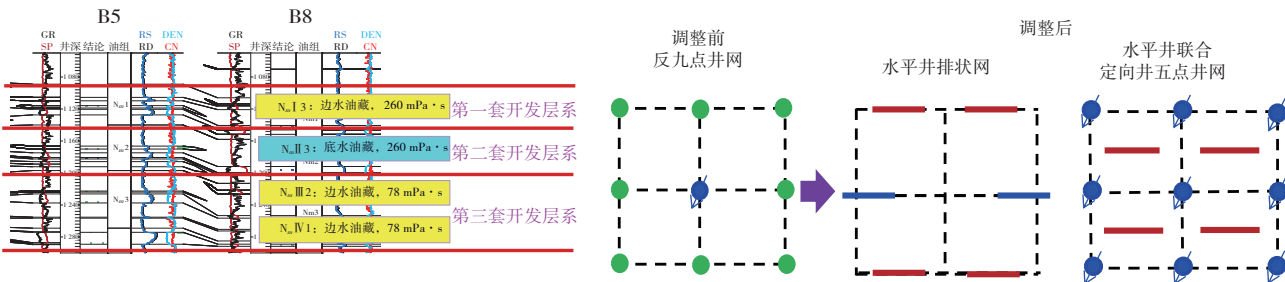


图12 QHD开发层系与注采井网调整示意

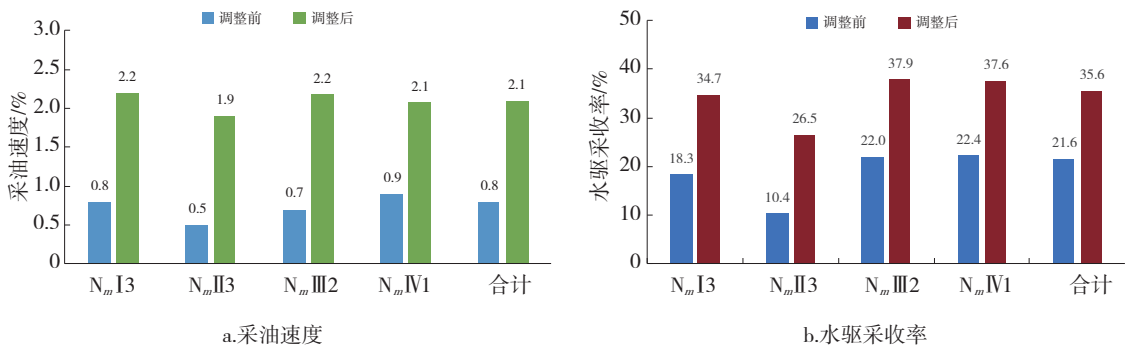


图13 QHD油田开发调整效果

根据各层油藏类型、流体性质差异大的特征,首次在海上油田采取大规模水平井联合定向井分层系开发模式<sup>[28]</sup>:①根据各油层油藏类型和流体性质差异重新划分开发层系,将边水油藏与底水油藏

分开,将地层原油黏度为 $260\,\text{mPa}\cdot\text{s}$ 和 $78\,\text{mPa}\cdot\text{s}$ 的油层分开,由原来一套开发层系调整为三套开发层系,定向井在N<sub>m</sub>I 3、N<sub>m</sub>II 3砂体全部关层,只生产N<sub>m</sub>III 2、N<sub>m</sub>IV 1砂体;②利用水平井分单砂体开发

NmI3、NmII3砂体,水平段长度260 m,采用排状井网,注采井距220 m;③主要利用老定向井开发NmIII2、NmIV1砂体,原反九点井网调整为五点井网,注采井距由360 m调整为220 m,如图12所示。

2014年至今先后实施了184口水平井、28口定向井,初期平均单井产油量65 m<sup>3</sup>/d,是老井的3倍;初期含水率22%,而老井含水率86%。通过开发调整,油田综合含水由88%下降到79%,各主力层采油速度由0.5%~0.8%提高至1.9%~2.2%,各层水驱采收率由10.4%~22.4%提高至26.5%~37.9%,极大改善了油田开发效果(见图13)。

## 4 认识与结论

(1)联合Buckley-Leverett水驱理论和Welge水驱方程,推导了考虑层间渗流阻力干扰的多层合采油藏水驱采收率预测方法,并利用数模方法和现场数据验证该方法的准确性和实用性。结果表明,本文方法与数值模拟方法预测的合注合采下吸水量系数吻合性很好,能够定量描述水驱过程中各层渗流阻力变化规律及其对注采两端的干扰程度。

(2)实例应用结果揭示了多层非均质油藏各层水驱开发动态变化特征,层间渗流阻力干扰对各层含水率、水驱波及系数和水驱采收率的影响贯穿开发全过程,并且干扰影响程度随着含水率上升而增大,随着各层渗透率级差、黏度级差增大而增大。

(3)针对各层之间油藏类型、流体性质差异导致的层间矛盾,首次在海上采取大规模水平井联合定向井分层系开发模式,由一套层系调整为三套开发层系,由定向井反九点井网调整为水平井联合定向井五点井网或水平井排状井网,通过实施开发调整,各油层采油速度和水驱采收率明显提高。

### 参考文献:

- [1] 王德民.分层开采理论研究[M].北京:石油工业出版社,1985.
- [2] 韩大匡,万仁涛,佚名,等.多层砂岩油藏开发模式[M].北京:石油工业出版社,1999:132-145.
- [3] 杨通佑,罗迪强,李福境.我国注水砂岩油田开发层系合理划分问题的探讨[J].石油学报,1982,23(3):31-40.
- [4] 于会利,汪卫国,荣娜,等.胜坨油田不同含水期层间干扰规律[J].油气地质与采收率,2006,13(4):71-73.
- [5] 李波,罗宪波,刘英,等.判断层间非均质性的新方法[J].中国海上油气,2007,19(2):93-95.
- [6] 许建红,钱俪丹,库尔班.储层非均质对油田开发效果的影响[J].断块油气田,2007,14(5):29-31.
- [7] 周琦,姜汉桥,陈民锋.严重非均质油藏开发层系组合界限研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(1):84-86.
- [8] 于春生,李闽,乔国安,等.纵向非均质油藏水驱油实验研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(1):84-86.
- [9] 黄世军,康博韬,程林松,等.海上普通稠油油藏多层合采层间干扰定量表征与定向井产能预测[J].石油勘探与开发,2015,42(4):488-495.
- [10] 缪飞飞,黄凯,胡勇,等.渤海油田层间干扰物理模拟研究及应用[J].特种油气藏,2019,26(1):136-140.
- [11] 王成胜,阚亮,田津杰,等.层系组合开发对驱油效果影响的实验研究[J].非常规油气,2020,7(5):58-66.
- [12] 许家峰,张金庆,程林松,等.多层合采砂岩稠油油藏层间干扰动态表征及应用[J].中国海上油气,2016,28(4):48-54.
- [13] 张浩,李廷礼,贾晓飞,等.海上稠油油田层间干扰变化研究[J].断块油气田,2015,22(5):656-659.
- [14] 周文胜,李倩茹,耿站立,等.合采井层间干扰现象数学模拟研究[J].西南石油大学(自然科学版),2017,39(6):109-116.
- [15] 李文红,任超群,林瑞敏,等.一种新的水驱油藏多层合采井产量动态劈分方法[J].中国海上油气,2019,31(4):89-95.
- [16] 付强,薛国庆,任超群,等.多层合采井产量劈分新方法在W油田的应用[J].断块油气田,2019,26(4):512-515.
- [17] 陈建华,晏庆辉,骆逸婷,等.基于历史生产数据的多层合采井产量劈分新方法[J].中国海上油气,2022,34(1):110-116.
- [18] 张继成,何晓茹,周文胜,等.大段合采油井层间干扰主控因素研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2015,37(4):101-106.
- [19] 李明军,杨志兴,马勇新.两相渗流阻力法在转注井吸水能力研究中的应用[J].断块油气田,2012,19(6):740-742.
- [20] 支继强,王海栋,刘义坤,等.多层合采注入液劈分机理研究[J].数学的实践与认识,2020,50(3):173-179.
- [21] 冯其红,王波,王相,等.多层非均质油藏开发指标预测方法[J].特种油气藏,2014,21(4):85-88.
- [22] 陈元千.对纳扎洛夫确定可采储量经验公式的理论推导及应用[J].石油勘探与开发,1995,22(3):63-68.
- [23] 李阳,陆相高含水油藏提高水驱采收率实践[J].石油学报,2009,30(3):396-399.

(下转第214页)

际值的相对误差在8%以内(见表4),说明在S油田依据不同含水上升模式拟合的产量及含水公式具有油田内普遍适应性,同时为后期新部署水平井的产能预测提供了计算依据。

表4 新投产水平井实际生产数据与新方法预测数据对比

井名	井区采 出程度/ %	含水上生 模式	实际			新方法预测			相对误差/ %
			初期日 产油/m <sup>3</sup>	初期含水/ %	累产油/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	初期日 产油/m <sup>3</sup>	初期含水/ %	累产油/ 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	
A1H	35.2	直线型	45	88.0	2.1	43.1	88.2	1.8	-4
A2H	37.9	直线型	41	87.5	2.3	38.2	89.7	1.4	-7
A3H	43.2	直线型	41	89.0	0.2	44.0	87.6	0.3	7
A4H	42.9	直线型	39	89.3	0.2	37.5	90.1	0.2	-4

5 结论

(1)基于S油田90口水平井的实际开发数据,在确定含水上升规律的基础上,利用多元回归法拟合出初期产能、初期含水以及产量递减公式,可为后期新调整水平井的产能预测提供依据,为油田的精准挖潜提供技术支持。

(2)通过实际水平井生产数据与新方法计算数据对比,证明此方法预测准确度高。

参考文献:

[1] 郇益华,张迎春,杨宝泉,等.复杂断块油田跨断层水平井产能预测及分段长度优化方法——以西非A深水油田为例[J].石油学报,2021,42(7):948-961.

[2] 贾晓飞,雷光伦,孙召勃,等.三维各向异性油藏水平

井产能新公式[J].油气地质与采收率,2019,26(2):113-119.

[3] 李进,龚宁,徐刚,等.渤海油田水平井出水规律特征及影响因素[J].断块油气田,2019,26(1):80-83.

[4] 李波,罗宪波,刘英,等.海上稠油油田合理单井产能预测新方法[J].中国海上油气,2008,20(4):243-245.

[5] 王大为,李小平.水平井产能分析理论研究进展[J].岩性油气藏,2011,23(2):118-123.

[6] 代丽.不同类型油藏水平井递减规律研究[J].化工管理,2015(26):79-80.

[7] 成亚斌,李凡华,李健.水平井递减规律分析[J].内蒙古石油化工,2009,35(4):118-120.

[8] 崔传智.水平井产能预测的方法研究[D].北京:中国地质大学,2005.

(编辑 谢 葵)

(上接第210页)

[24] 王增林,张贵才,靳彦欣,等.水驱油田采收率与注入孔隙体积的定量关系[J].中国石油大学学报(自然科学版),2021,45(1):94-100.

[25] 张金庆.水驱油理论研究及油藏工程方法改进[M].北京:中国石化出版社,2019:7-16

[26] 陈民锋,吕迎红,杨清荣.利用相对渗透率资料研究油藏水驱状况[J].断块油气田,1998,5(5):26-29.

[27] 刘晨,张金庆,李文忠,等.基于近似理论水驱曲线的油藏水驱体积波及系数动态计算方法[J].油气地质与采收率,2020,27(5):113-118.

[28] 苏彦春,李廷礼.海上砂岩油田高含水期开发调整实践[J].中国海上油气,2016,28(3):83-90.

(编辑 谢 葵)