

考虑径向流的多层油藏开发指标计算方法

孙 强,王记俊,杨 磊,敖 璐,司少华

(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459)

摘要:海上多层非均质油藏初期多采用五点井网合注合采的方式开发,高含水期层间矛盾突出,开发指标预测难度大。针对这一问题,基于Buckley—Leverett水驱油理论,建立了考虑平面径向流的多层油藏水驱油模型,通过该模型可对各开发指标进行计算。研究表明:通过数值模型验证,该模型可近似反映五点井网下各油层的水驱开发动态,且与数值模拟相比,该方法计算速度更快;多层非均质油藏水驱过程中随着高渗层见水,各油层间渗流阻力的差异增大,加剧了层间矛盾,可通过采取分注分采等措施改善油藏开发效果。该研究成果对海上油田的后续高效开发与调整具有指导作用。

关键词:多层油藏;层间矛盾;径向流;开发指标;渗流阻力

中图分类号:TE341 **文献标志码:**A

Calculation method of development index of multilayer reservoir considering radial flow

SUN Qiang, WANG Jijun, YANG Lei, AO Lu, SI Shaohua

(Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: The five-point well pattern combined injection and production is commonly employed for development in the early stages of offshore multi-layer heterogeneous reservoirs, and the interlayer contradiction is prominent in the high water cut stage, making it difficult to predict the development index. In order to solve this problem, a multi-layer reservoir waterflooding model with the plane radial flow is established, from which the development indexes can be calculated, based on Buckley—Leverett theory. The results show that: through numerical model verification, the model can approximately reflect the water drive development performance of each reservoir under the five-point well pattern, and the calculation speed of this method is faster than that of numerical simulation; with the water breakthrough of the high permeability layer in multi-layer heterogeneous reservoirs, the difference in seepage resistance between each oil layer increases, intensifying the contradiction between layers, and the development effect of oil reservoirs can be improved by measures such as separate injection and production, etc. The research results will serve as a guide for the effective development and adjustment of offshore oilfields in the future.

Key words: multilayer reservoir; interlayer contradiction; radial flow; development index; seepage resistance

海上油藏多采用五点井网注水开发,为节约生产成本,纵向上多采用一套开发层系,层间物性差异大,高含水期层间矛盾突出。准确预测各油层的开发指标,对指导海上多层油藏开发及调整具有重要意义。目前,从油藏工程角度对考虑径向流的多层油藏开发指标预测方面的研究还比较少。Osman等^[1-2]基于活塞式水驱油理论研究了纵向非均质油藏的水驱开发动态,但活塞式水驱油理论与实际偏差较大;张顺康等^[3-12]分别通过建立一维的多层油藏水驱油模型,建立了多层油藏合采条件下开发指标的预测方法,但所建立的一维模型只能反映单向水驱下油藏的开发动态,无法考虑面积井网对渗流

的影响;计秉玉等^[13-19]通过建立流管模型,对面积井网下含水上升规律及开发指标预测进行了研究,但流管法计算过程较为繁琐。本文在前人研究的基础上,以Buckley—Leverett理论作为基础,从平面径向流角度建立了多层油藏水驱油模型,对各油层的产液量、产油量等开发指标进行预测,并与数值

收稿日期:2021-03-16;改回日期:2021-05-08。

第一作者简介:孙强(1988—),硕士,油藏工程师,现主要从事油田开发方面的工作。E-mail: sunqiang19@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”(2016ZX05058001)。

模拟结果进行了对比,计算方法简便,结果预测准确,适用性广。

1 模型建立

在考虑层间非均质性的基础上,将五点井网各油层的渗流区域等效为渗流圆,建立多层油藏水驱油模型,利用径向流油水两相驱油理论计算各油层水驱开发指标,进而得到整个井组的开发指标。

1.1 假设条件

- ①边界为供给边界,恒定注入,且注采平衡;
- ②储层为刚性多孔介质,流体不可压缩;
- ③层间存在稳定隔层,不考虑层间窜流;
- ④非活塞式水驱油,存在油水两相区;
- ⑤不考虑毛管力和重力对水驱的影响。

1.2 方法原理

根据 Buckley—Leverett 理论,油层见水前的等饱和度面移动方程^[20]可表示为:

$$r_e^2 - r^2 = \frac{f'_w(s_w)}{\pi\phi h} \int_0^t Q_i dt \quad r_w \leq r \leq r_i \quad (1)$$

式中, r 为驱替距离, m; r_i 为水驱前缘位置, m; r_w 为井筒半径, m; r_e 为原始含油边缘半径, m; h 为油层厚度, m; ϕ 为油层孔隙度; $f'_w(s_w)$ 为驱替距离处饱和度对应的分流导数。

对于五点井网,可等效为渗流圆进行计算求解;原始含油边缘可以根据面积等效方法求解,即五点井网注采单元面积与等效渗流圆的面积相等^[21],则原始含油边缘半径为:

$$r_e = \sqrt{A/\pi} = 0.798d \quad (2)$$

式中, A 为五点井网注采单元面积, m^2 ; d 为注采井距, m。

油层产液量为:

$$Q_i = \frac{\Delta p}{R} \quad (3)$$

式中, Q_i 为日产液量, m^3/d ; Δp 为驱替压差, MPa; R 为油层渗流阻力, $mPa \cdot s / (10^{-3} \mu m^2 \cdot m)$ 。

油层见水前渗流阻力为:

$$R = \left[\int_{r_i}^{r_e} \frac{1}{\left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right) r} dr + \mu_o \ln \frac{r_i}{r_w} \right] / (2\pi K h) \quad (4)$$

式中, K 为油层渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; K_{ro} 为油相相对渗透率; K_{rw} 为水相相对渗透率; μ_o 为原油黏度, $mPa \cdot s$; μ_w 为水黏度, $mPa \cdot s$ 。

由于平面径向流条件下近井地带压降很大,因

此渗流阻力变化很大,计算渗流阻力时需将不等距的径向坐标 r 转换成等距离的 x 坐标^[22],即令 $\Delta x = \ln(\frac{r_e}{r_i})/n$, 则 $r = r_i e^{i\Delta x} = r_i e^x$ 。则式(3)可以转换为以下求和公式求解:

$$R = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta x}{\left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right) r} + \mu_o \ln \frac{r_i}{r_w} \right) / (2\pi K h) \quad (5)$$

油层见水后渗流阻力为:

$$R = \int_{r_w}^{r_e} \frac{1}{\left(\frac{K_{ro}}{\mu_o} + \frac{K_{rw}}{\mu_w} \right) r} dr / (2\pi K h) \quad (6)$$

油层见水后,根据等饱和度面移动方程可得

$$f'_w(s_{we}) = \frac{(r_o^2 - r_w^2)\pi\phi h}{\int_0^t Q_i dt} \quad (7)$$

式中, $f'_w(s_{we})$ 为出口端含水饱和度对应的分流导数。

由式(7)可得出出口端含水饱和度导数,通过插值可求得出出口端含水饱和度,进而求得含水率与日产油:

$$Q_o = Q_i f_w(s_{we}) \quad (8)$$

式中, Q_o 为日产油量, m^3/d 。

注采平衡条件下,分注分采时各层注水量或产液量为给定已知量,不随各油层渗流阻力变化而变化;合注合采时各层注采压差相同,随着水驱前缘向前推进,各层渗流阻力发生变化,由此可根据各层渗流阻力劈分得到各层产液量:

$$Q_i = Q_t \frac{1/R_i}{\sum_{i=1}^n 1/R_i} \quad (9)$$

式中, Q_i 为第 i 油层日产液量, m^3/d ; R_i 为第 i 油层渗流阻力, $mPa \cdot s / (10^{-3} \mu m^2 \cdot m)$ 。

其中,初始时刻各层渗流阻力为:

$$R_i^0 = \mu_o \ln \frac{r_e}{r_w} / (2\pi K_i h_i) \quad (10)$$

式中, K_i 为第 i 油层渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; h_i 为第 i 油层厚度, m。

1.3 模型求解

采用以下计算步骤可对合采时多层水驱油模型进行求解:

(1)根据公式(10)计算初始时刻各油层的渗流阻力。

(2)合采条件下,根据各层初始渗流阻力和式

(9)计算初始时刻各油层的产液量。

(3)由式(1)可得下一时刻各层水驱前缘位置。

(4)根据水驱前缘位置判断各层是否见水,结合式(4)、(5)可以计算下一时刻各层渗流阻力。

(5)根据各层渗流阻力和式(9)计算下一时刻各层瞬时产液量和累积产液量。

(6)根据式(7)和式(8)计算得到见水后该油层含水率和产油量。

(7)若 $T < T_{\max}$, 返回第(3)步继续进行迭代计算, 否则终止计算。

分采条件下, 各层产液量为已知量, 各时间步通过式(1)计算各层水驱前缘位置, 判断油层是否见水; 见水后则根据式(7)和(8)计算得到各时间步各油层出口端含水率和产油量。

上述方法主要是针对五点井网中生产井对应四口注水井工作制度相同时的水驱开发指标进行预测; 当对应四口注水井工作制度不同即注水量不同时, 可将生产井与每口注水井间的渗流区域视为扇形区域, 即四分之一的渗流圆; 求得每个扇形区域开发指标, 最后叠加计算各油层及整个井组的开发指标。

2 算例分析

以渤海B油田某注采单元为例, 该油田采用五点井网注水开发, 结合油田实际地质油藏参数建立多层油藏水驱油模型。模型采用定液量方式生产, 注水井注水量均相同, 保持注采平衡, 油井产液量为 $160 \text{ m}^3/\text{d}$; 注采井距为 300 m , 纵向上共三个主力油层, 各油层厚度均为 5 m , 孔隙度均为 0.3 , 油藏条件下油相黏度为 $30 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 水相黏度为 $0.7 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 残余油饱和度为 0.2 , 束缚水饱和度为 0.25 ; 各油层渗透率分别为 $3\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $1\,800 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。利用上述模型, 对各油层产液量、产油量等动态指标进行了计算。

2.1 可靠性验证

为验证所建立的多层油藏模型计算的准确性, 首先建立了五点井网数值机理模型, 模型中各地质油藏参数与上述多层油藏模型一致, 并将多层模型计算的结果与数值模拟结果进行了对比, 如图1和图2所示。图中实线表示上述多层水驱模型计算的结果, 虚线表示数值模拟计算的结果。对比发现两种模型计算得到的各层日产液和日产油变化趋势基本相同, 证明了该模型计算的可靠性。

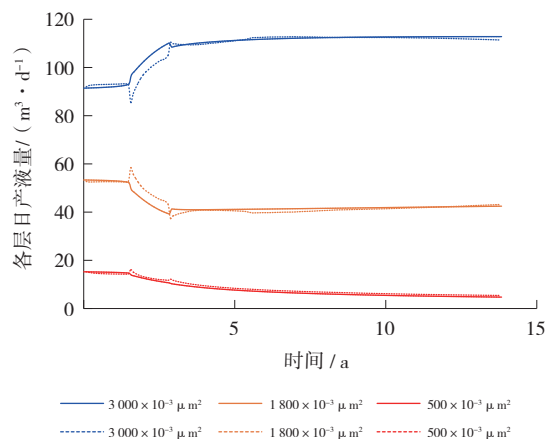


图1 各油层日产液量变化

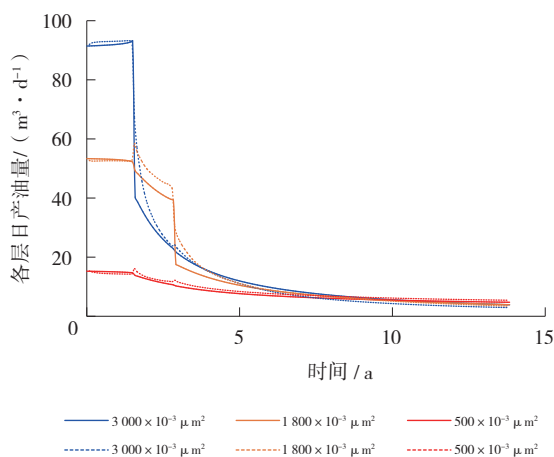


图2 各油层日产油量变化

2.2 指标分析

根据上述方法, 对于正方形五点井网, 渗流过程简化为平面径向流, 根据径向流等饱和度面移动方程式(1)进行求解, 可确定各注采井连线上的含油饱和度, 通过插值可得到整个油藏的含油饱和度分布; 由此输出了相同时刻各油层的含油饱和度场, 如图3所示。由于各油层物性存在差异, 各油层初始时刻渗流阻力不同, 导致吸水能力不同。渗透率高的油层渗流阻力小, 吸水多, 水驱前缘推进速度快; 渗透率低的油层渗流阻力大, 吸水少, 水驱前缘推进速度慢, 如图3所示。当油水黏度比相对较大时, 随着水驱前缘不断向前推进, 油水两相区不断扩大, 纯油区逐渐缩小, 各层渗流阻力逐渐降低; 径向流条件下, 近井地带渗流阻力较高, 能量消耗大, 当水驱前缘推进至油井位置时, 即见水时刻, 渗流阻力会迅速下降, 如图4所示。渗透率高的油层见水后各油层间渗流阻力差异会进一步增大, 导致渗透率低的油层产液和产油能力进一步降低, 层间矛盾加剧。多层合采油藏中高含水期可通过采取调剖调驱、分注分采等措施, 提高差油层的吸水能

力,减缓层间矛盾,改善油田注水开发效果。通过模型模拟对比了合采与分采的开发效果,当井组含

水率达到80%时通过实施分注分采,井组采收率提高6%,有效改善了水驱效果(见图5)。

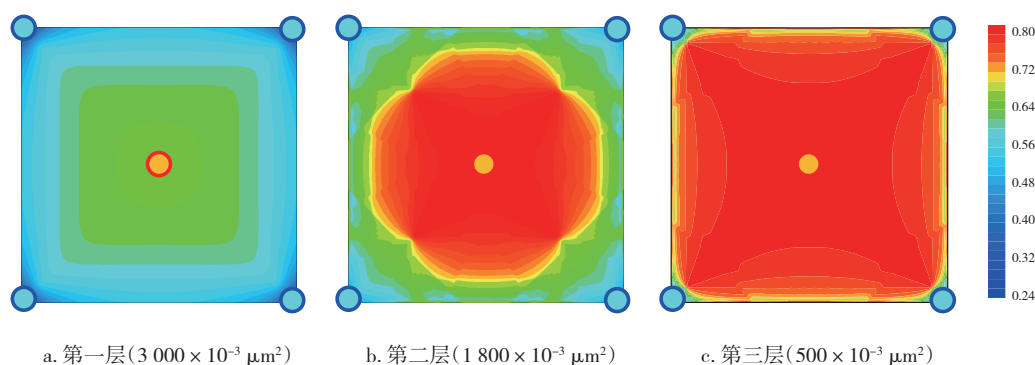


图3 生产时间2a各油层含油饱和度

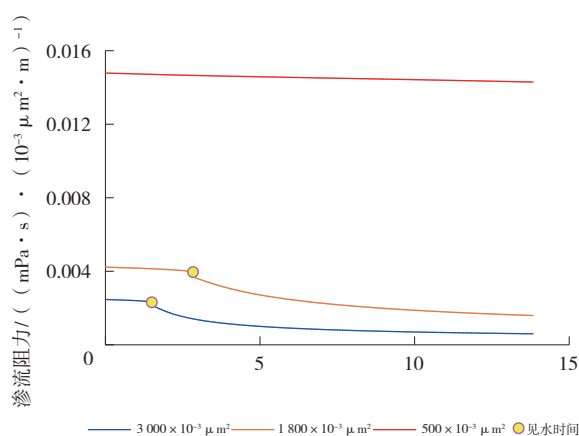


图4 各油层渗流阻力变化

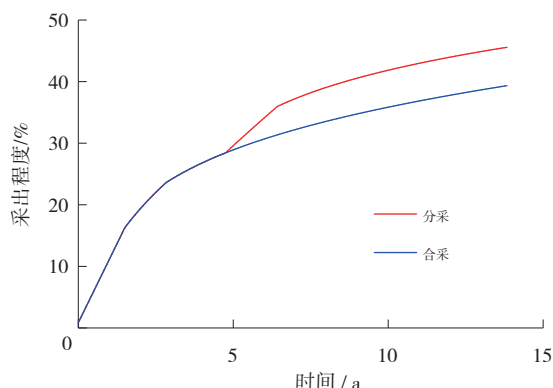


图5 合采与分采采出程度对比

3 结论

(1)基于Buckley—Leverett理论,从平面径向流角度出发,建立了多层油藏水驱油模型;该模型可对五点井网下不同时刻各油层的产液(油)量、渗流阻力等开发指标进行预测。

(2)水驱过程中各油层间渗流阻力的动态差异导致各层水驱动态存在差异,层间矛盾突出;可通过分注分采方式开发,缓解层间矛盾,改善油田开

发效果。

参考文献:

- [1] OSMAN M E, TIAB D. Waterflooding performance and pressure analysis of heterogeneous reservoirs [C]//Middle East Technical Conference and Exhibition, Bahrain, 1981;SPE-9656-MS.
- [2] DYES A B, CAUDLE B H, ERICKSON R A. Oil production after breakthrough has influenced by mobility ratio [J]. Journal of Petroleum Technology, 1954, 6 (4) : 27-32.
- [3] 张顺康,刘炳官,钟思瑛,等.多层油藏水驱开发理论模型[J].新疆石油地质,2009,30(6):734-737.
- [4] 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):85-88,154-155.
- [5] 周英芳,方艳君,王晓冬,等.多层油藏非活塞式水驱驱替效率研究[J].油气地质与采收率,2009,16(1):86-89,93,117.
- [6] 安伟煜.特高含水期多层非均质油藏层间干扰因素分析[J].东北石油大学学报,2012,36(5):76-82.
- [7] 李留仁,胡永乐.非均质多层低渗透油藏合理注采井距的确定[J].新疆石油地质,2010,31(3):266-268.
- [8] 周英芳,刘志军,茆春锦,等.多层油藏水驱驱替效率计算新方法[J].特种油气藏,2008,15(3):72-75.
- [9] 王记俊,周海燕,张弛,等.基于卡层门限的纵向均衡驱替研究[J].天然气与石油,2018,36(4):54-57.
- [10] 赵丽莎,李莉,吴忠宝,等.多层非均质油藏定压驱替效率计算方法[J].特种油气藏,2017,24(1):101-105.
- [11] 崔传智,盛倩,姜亦栋,等.高含水期多层油藏注水层段划分方法[J].断块油气田,2016,23(3):363-366.
- [12] 陈红伟,冯其红,张先敏,等.多层非均质油藏注水开发指标预测方法[J].断块油气田,2018,25(4):473-476.
- [13] 计秉玉,李莉,王春艳.低渗透油藏非达西渗流面积井

- 网产油量计算方法[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 256-261.
- [14] 郭粉转, 唐海, 吕栋梁, 等. 渗流启动压力梯度对低渗透油田五点井网面积波及效率影响[J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34(3): 65-68, 125-126.
- [15] 武兵厂, 姚军, 吕爱民. 水平井与垂直井联合井网波及系数研究[J]. 石油学报, 2006, 27(4): 85-88.
- [16] 吕栋梁, 唐海, 郭粉转, 等. 低渗透油田反九点井网面积波及效率影响研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(1): 147-153.
- [17] 何聪鸽, 范子菲, 方思东, 等. 特低渗透各向异性油藏平面波及系数计算方法[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 77-83.
- [18] 周瀛, 唐海, 吕栋梁, 等. 排状交错水平井井网面积波及效率研究[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(5): 124-128.
- [19] 孙强, 石洪福, 王记俊, 等. 窄条带状普通稠油油藏平面波及系数计算方法[J]. 特种油气藏, 2018, 25(6): 126-130.
- [20] 程林松. 高等渗流力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 287-299.
- [21] 李传亮, 邓鹏, 朱苏阳, 等. 渗流圆的等效原则[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(6): 717-721.
- [22] 李淑霞, 谷建伟. 油藏数值模拟基础[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2009: 147-148.

(编辑 谢 葵)

(上接第63页)

4 结束语

(1) 研究表明“相控选井、曲线标准化、精细反演初始模型建立”是提高小断层发育区岩性油藏储层预测精度的重要地质基础。

(2) SP 储层参数模拟反演相对常规波阻抗反演可提高薄砂体地震反演分辨率, 为薄砂体地震描述提供地质基础。

(3) 通过“地震相分析、砂体地震响应特征正演模拟、精细储层预测”等综合研究, 提高了隐蔽性岩性油藏描述精度并取得较好应用效果; 也证明地震精细描述技术在隐蔽油藏滚动开发中具有较好应用价值。

参考文献:

[1] 郭伟, 李小刚, 刘尚军, 等. 焉耆盆地博湖坳陷三工河

组下段地震相—沉积相分析[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(2): 11-15.

- [2] 张喜林, 朱筱敏, 杨俊生. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组地震相研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2005, 20(3): 44-47.
- [3] 刘万金, 贾云花, 陈汉明, 等. 煤田波阻抗反演中的测井曲线预处理[J]. 煤矿安全, 2012, 43(5): 43-46.
- [4] 龚幸林, 戴晓峰, 刘文岭, 等. 开发期高精度三维初始模型建立与测井约束反演[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2007, 29(1): 92-95.
- [5] 杜伟维, 金兆军, 邸永香. 地震波形指示反演及特征参数模拟在薄储层预测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(1): 56-61.
- [6] 冉令. 一种基于地震波形指示的反演方法研究[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2016, 30(3): 3-5.

(编辑 谢 葵)