

聚合物驱双层窜流油藏模型与试井曲线

曾杨^{1,2}, 张健^{1,2}, 康晓东^{1,2}, 谢晓庆^{1,2}, 唐恩高^{1,2}, 程时清³

- 1.海洋石油高效开发国家重点实验室 北京 100028
- 2.中海油研究总院有限责任公司 北京 100028
- 3.中国石油大学石油工程教育部重点实验室 北京 102249

通讯作者:Email:zengyang@cnooc.com.cn
项目支持:国家科技重大专项“海上油田化学驱油技术”(2016ZX05025-003)、中海油研究总院有限公司综合科研“海上多层稠油油藏化学驱交替注入技术研究”(YXKY-2014-ZY-03)
引用:曾杨,张健,康晓东,等. 聚合物驱双层窜流油藏模型与试井曲线[J]. 油气井测试,2018,27(6):1-7.
Cite: ZENG Yang, ZHANG Jian, KANG Xiaodong, et al. Model of polymer flooding double-layer crossflow reservoir and well testing curve [J]. Well Testing, 2018,27(6):1-7.

摘要 针对多层聚合驱井模型实际压力导数测试曲线呈现明显“凹子”而目前无法解释的情况。通过考虑聚合物渗透率下降及不可及孔隙体积的影响,运用数学物理方法、渗流力学理论,基于严格的数学推导,建立了聚合物驱双层窜流油藏试井解释模型,绘制压力和压力导数双对数典型曲线图版。分析表明:典型曲线存在5个流动阶段,低渗透层向高渗透层的窜流作用段出现明显的“凹子”,径向流阶段的曲线末端由于聚合物非牛顿流体的影响,有小幅度上翘;窜流系数决定“凹子”出现的早晚,地层流动系数比决定“凹子”的深浅,弹性储容比影响“凹子”的深度和宽度,聚合物的初始浓度影响窜流时间的早晚及径向流阶段曲线末端上翘幅度。实例应用证明该模型符合实测曲线规律,能够准确解释各层参数,判断聚合物驱效果。
关键词 聚合物驱; 双层油藏; 试井解释; 图版; 压力动态; 曲线拟合; 窜流
中图分类号:TE353 文献标识码:A DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.06.001

Model of polymer flooding double-layer crossflow reservoir and well testing curve

ZENG Yang^{1,2}, ZHANG Jian^{1,2}, KANG Xiaodong^{1,2}, XIE Xiaoqing^{1,2}, TANG Engao^{1,2}, CHENG Shiqing³

- 1. CNOOC State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing 100028, China
- 2. CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China
- 3. Key Laboratory for Petroleum Engineering of Ministry of Education, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

Abstract: In view of the fact that the multi-layer polymer flooding model cannot interpret the obvious “valley” of the actual pressure derivative test curve of polymer flooding wel and by considering the influence of polymer on permeability decrease and inaccessible volume, the well test interpretation model of polymer flooding double-layer crossflow reservoir was established. The typical curve plate of the pressure and its derivative was obtained. Five flow stages are shown in the curve, in which there is a “valley” in crossflow stage from low-permeability layer to high-permeability layer. The end of the curve in the radial flow stage shows a small buildup due to the influence of the non-Newtonian property of polymer solution. The crossflow coefficient determines the appearance time of the “valley”. The formation flow coefficient ratio determines the depth of the “valley”. The elastic storage ratio affects the depth and width of the “valley”. The initial concentration of the polymer affects the appearance time of crossflow and the buildup amplitude of the end of the curve in the radial flow stage. The case study proves that the model is in line with the measured curve, an accurately interpret the parameters of each layer, and evaluate the effect of polymer flooding.
Keywords: polymer flooding; double-layer reservoir; well test interpretation; plate; pressure dynamics; curve fitting; crossflow

60年代初,Lefkovits H.C.等^[1]最早提出水驱多层油藏的试井分析方法。Kucuk F.等^[2-3]通过分层流量和井底压力的关系求得压力解。Tariq M.等^[4]得出了多层无窜流油藏井底压力实空间解。Ehlig-Economides A.等^[5]在 Kucuk F.的基础上明确分层流量对多层油藏试井解释的重要性。贾永禄^[6]分析了存在窜流的双层油气藏试井解释模型。霍进等^[7]提出了多层窜流油气藏模型,随着计算机技术

的发展,目前试井技术在水驱多层油藏已经成熟^[8-13]。

聚合物驱油藏的试井解释问题和已经相对成熟的水驱油藏试井解释方法有着很大的区别,其主要原因归结于注入流体的流变性,水为牛顿流体,黏度不发生变化,但是聚合物溶液由于受非牛顿流体的影响,不仅有剪切和黏弹作用,而且还有其他物理化学效应。因此,聚合物溶液的流变性极其复杂,进而导致了聚合物驱试井解释和水驱油藏试井解释的不同^[14-15]。由于聚合物驱技术在世界各大油田中的广泛应用,相应的试井技术在复合油藏,以及双层油藏有了一定进展。Ikoku C.U.等^[16]最先提出均质油藏中非牛顿流体流动规律。Lund O.等^[17]得出了非牛顿流体在复合油藏中渗流的压力响应特征。Chi I.等^[18]研究了考虑井筒储集和表皮效应的非牛顿流体井底压力的真实空间解。岳世俊等^[19]提出了考虑扩散和对流的聚合物驱试井解释模型。郭辉等^[20]对聚合物双层油藏试井分析方法进行了研究。YU Haiyang 等^[21]研究了海上聚驱复合油藏的试井典型曲线。程时清等^[22]建立了聚驱双层复合油藏的试井模型及压力响应特征曲线。

目前国内外的试井典型曲线图版几乎未考虑地层岩石和聚合物的相互作用,不仅包括不可及孔隙体积的影响,还有渗透率下降系数等问题,导致现有的试井解释模型不能反映聚合物在地层中的流动特征。并且大庆、辽河、渤海的注聚油藏不仅含有两个含油砂层,许多油藏层间还存在窜流,但由于多层油藏模型建立和求解非常复杂,目前为止,没有学者对聚合物驱双层窜流油藏试井解释模型进行研究,使得大庆、辽河、渤海许多油田测试数据难以解释。因此,本文以程时清等的研究方法为基础,以聚合物剪切、扩散和对流为基础,通过考虑不可及孔隙体积和渗透率下降系数的影响,改进聚合物驱基础模型^[23],建立了聚合物驱双层窜流油藏试井模型,利用离散差分方法进行迭代求解,绘制了聚合物驱双层窜流油藏试井曲线拟合图版,分析了图版的影响因素,并用实例说明了新模型的实际效用。

1 试井数学模型

在多层油藏中,当不同油层的压力值不同时,并且层与层之间的隔层具有一定的渗透性,流体可

以从压力高的油层向压力低的油层发生流动,形成层间窜流。聚合物驱双层窜流油藏渗流物理模型如图 1 所示,考虑井位于地层中心,注入量为 q 由地面向地层注入聚合物溶液,层与层之间为拟稳态窜流。假设条件如下:①各油层聚合物和水混溶,聚合物溶液性质相同,各油层岩石特性、储层厚度及渗透率不同;②流动服从达西定律,忽略毛管力和重力的影响;③流体微可压缩,流动过程为等温渗流;④各层井储,表皮恒定。根据上述假设条件,建立试井解释数学模型。

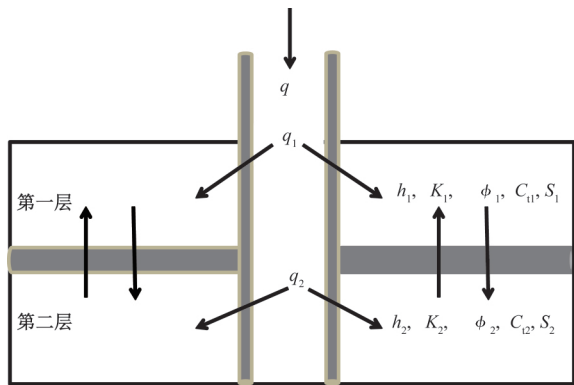


图 1 双层窜流油藏物理模型

Fig.1 Physical model of double-layer crossflow reservoir

(1) 渗流方程

$$\frac{K_1 h_1}{\mu_p} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_1}{\partial r} \right) + a \frac{K_2 h_2}{\mu_p} (p_2 - p_1) = \phi_1 C_{1i} h_1 \frac{\partial p_1}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{K_2 h_2}{\mu_p} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p_2}{\partial r} \right) - a \frac{K_2 h_2}{\mu_p} (p_2 - p_1) = \phi_2 C_{2i} h_2 \frac{\partial p_2}{\partial t} \quad (2)$$

(2) 初始条件

$$p_1(r, 0) = p_2(r, 0) = p_{oj} \quad (j = 1, 2) \quad (3)$$

$$p_1(r_w, t) = p_2(r_w, t) = p_w(t) \quad (4)$$

(3) 内边界条件

$$qB = C \frac{dp_w}{dt} - \left(\frac{K_1 h_1}{\mu_p} r \frac{\partial p_1}{\partial r} + \frac{K_2 h_2}{\mu_p} r \frac{\partial p_2}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_w} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} p_w(t) &= \left(p_1 - S_1 r \frac{\partial p_1}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_w} \\ &= \left(p_2 - S_2 r \frac{\partial p_2}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_w} \end{aligned} \quad (6)$$

(4) 外边界条件

$$p_1(\infty, t) = p_2(\infty, t) = p_o \quad (7)$$

定义无因次变量:

$$p_{wDj} = \frac{\sum_{j=1}^2 (Kh)_j}{1.842 \times 10^{-3} q \mu_p B} (p_j - p_{oj}) \quad (j = 1, 2) \quad (8)$$

$$t_D = \frac{3.6 \sum_{j=1}^2 (Kh)_j}{\sum_{j=1}^2 (\phi C_l h)_j \mu_p r_w^2} t \quad (9)$$

$$C_D = \frac{C}{2\pi r_w^2 \sum_{j=1}^2 (\phi C_l h)_j} \quad (10)$$

$$\chi = \frac{K_1 h_1}{K_1 h_1 + K_2 h_2} \quad (11)$$

$$\omega = \frac{\phi_1 C_{l1} h_1}{\phi_1 C_{l1} h_1 + \phi_2 C_{l2} h_2} \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{a r_w^2 K_2 h_2}{K_1 h_1 + K_2 h_2} \quad (13)$$

式中: p 为压力, MPa; K 为渗透率, mD; h 为厚度, m; C_l 为综合压缩系数, MPa^{-1} ; ϕ 为孔隙度, 小数; a 为上下两层流量交换系数, 无量纲; r_w 为井半径, m; μ_p 为聚合物溶液初始黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; C 为井筒储集系数, m^3/MPa ; q 为注入量, m^3/d ; B 为体积系数, 无量纲; S 为表皮系数, 无量纲; p_w 为井底流压, MPa; p_0 为原始地层压力, MPa; p_{wD} 为无量纲压力; t_D 为无量纲时间; C_D 为无量纲井筒储集系数; χ 为地层系数比; ω 为储容比; λ 为窜流系数; 下标 1、2 分别表示一层、二层。

2 数学模型求解

通过有限差分方法对上述聚合物驱双层窜流油藏非线性数学模型进行数值求解, 分别对渗流微分方程、初始条件和边界条件进行空间和时间的差分离散化, 得到井底压力数值解, 具体如下:

第一层油层渗流扩散方程:

$$\begin{aligned} & \frac{(K_1)_{i+1}^{n+1} + (K_1)_{i+1}^{n+1}}{2} \Delta t \times p_{li+1}^{n+1} - T p_{li}^{n+1} + \\ & \frac{(K_1)_{i+1}^{n+1} + (K_1)_{i+1}^{n+1}}{2} \Delta t \times p_{li-1}^{n+1} = \\ & \frac{a \Delta x^2 r_i^2 \Delta t h_2}{h_1} \times \frac{(K_2)_i^{n+1} + (K_2)_{i+1}^{n+1}}{2} p_{2i}^n - \\ & \Delta x^2 r_i^2 \phi_1 C_{l1} \times \frac{(\mu_1)_i^{n+1} + (\mu_1)_{i-1}^{n+1}}{2} p_{li}^n \end{aligned} \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} T = 2 \frac{(K_1)_i^{n+1} + (K_1)_{i+1}^{n+1}}{2} \Delta t + \frac{a \Delta x^2 r_i^2 \Delta t h_2}{h_1} \times \\ \frac{(K_2)_i^{n+1} + (K_2)_{i+1}^{n+1}}{2} + \Delta x^2 r_i^2 \phi_1 C_{l1} \frac{(\mu_1)_i^{n+1} + (\mu_1)_{i-1}^{n+1}}{2} \end{aligned} \quad (15)$$

第二层油层渗流扩散方程:

$$\begin{aligned} & \frac{(K_2)_i^{n+1} + (K_2)_{i+1}^{n+1}}{2} \Delta t \times p_{2i+1}^{n+1} - M p_{2i}^{n+1} + \\ & \frac{(K_2)_i^{n+1} + (K_2)_{i+1}^{n+1}}{2} \Delta t \times p_{2i-1}^{n+1} = \\ & \frac{a \Delta x^2 r_i^2 \Delta t h_2}{h_1} \times \frac{(K_1)_i^{n+1} + (K_1)_{i+1}^{n+1}}{2} p_{li}^n - \\ & \Delta x^2 r_i^2 \phi_2 C_{l2} \times \frac{(\mu_2)_i^{n+1} + (\mu_2)_{i-1}^{n+1}}{2} p_{2i}^n \end{aligned} \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} M = 2 \frac{(K_2)_i^{n+1} + (K_2)_{i+1}^{n+1}}{2} \Delta t + \frac{a \Delta x^2 r_i^2 \Delta t h_1}{h_1} \times \\ \frac{(K_1)_i^{n+1} + (K_1)_{i+1}^{n+1}}{2} + \Delta x^2 r_i^2 \phi_2 C_{l2} \frac{(\mu_p)_i^{n+1} + (\mu_p)_{i-1}^{n+1}}{2} \end{aligned} \quad (17)$$

第一层内边界:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{2\pi (K_1)_0^{n+1} h_1}{(\mu_p)_0^{n+1}} \times \Delta t_n + C S_1 \right) p_{11}^{n+1} - \\ & \left(C S_1 + C \Delta x + \frac{2\pi (K_1)_0^{n+1} h_1}{(\mu_p)_0^{n+1}} \Delta t_n \right) p_{10}^{n+1} - \\ & \frac{2\pi (K_2)_0^{n+1} h_2}{(\mu_p)_0^{n+1}} \Delta t_n (p_{20}^{n+1} - p_{21}^{n+1}) = \\ & - Q B \Delta t_n \Delta x - C \Delta x \times p_{10}^n - C S_1 (p_{10}^n - p_{11}^n) \end{aligned} \quad (18)$$

第二层内边界:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{2\pi (K_2)_0^{n+1} h_2}{(\mu_p)_0^{n+1}} \times \Delta t_n + C S_2 \right) p_{21}^{n+1} - \\ & \left(C S_2 + C \Delta x + \frac{2\pi (K_2)_0^{n+1} h_2}{(\mu_p)_0^{n+1}} \Delta t_n \right) p_{20}^{n+1} - \\ & \frac{2\pi (K_1)_0^{n+1} h_1}{(\mu_p)_0^{n+1}} \Delta t_n (p_{10}^{n+1} - p_{11}^{n+1}) = \\ & - Q B \Delta t_n \Delta x - C \Delta x \times p_{20}^n - C S_2 (p_{20}^n - p_{21}^n) \end{aligned} \quad (19)$$

外边界:

$$p_N^n = p_i \quad (20)$$

联立式 (14) ~ (20), 通过计算机编程, 得到油层压力分布, 即

$$p(r_i, t_n) = p_i^n \quad (i = 1, 2, \dots, N; n = 1, 2, \dots, K) \quad (21)$$

将式 (6) 离散变形, 可得:

$$p_{wf}^n = p_0^n - S \frac{p_1^n - p_0^n}{\Delta x} \quad (22)$$

由式(22)得到井底流压表达式,即

$$p_{wf}(t_n) = p_{wf}^n \quad (n = 1, 2, \dots, K) \quad (23)$$

式中: Δx 为空间网格大小, m ; Δt 为时间步长, h ; N 为空间网格数; K 为时间步。

通过数值迭代方法,求解上述差分方程组,得到井底流压,根据无量纲定义,得到无量纲压力变化情况。

根据无量纲结果,绘制聚合物驱双层窜流油藏试井解释典型曲线图版(图 2)。可以看出,聚合物驱双层窜流油藏试井模型井底压力曲线可分为 5 个阶段:第 I 段是纯井筒储集阶段,压力和压力导数重合,反映的是井储阶段的压力响应特征;第 II 段是纯井储阶段到内区径向流的过渡阶段,描述纯井筒储集阶段到内区径向流阶段的压力响应特征;第 III 段是层 1 和层 2 的流体流动达到中期径向流阶段,表示层 1 和层 2 的流动达到径向流动;第 IV 段是低渗透层向高渗透层的窜流作用段,反映高低渗透层间的压力差;第 V 段是总系统达到径向流阶段,曲线末端由于聚合物非牛顿流体的影响,有小幅向上翘,与朱常玉等^[24-25]利用双层模型得到的六段流动段和曾杨等^[26]的三区复合模型得到的七个流动段不同。

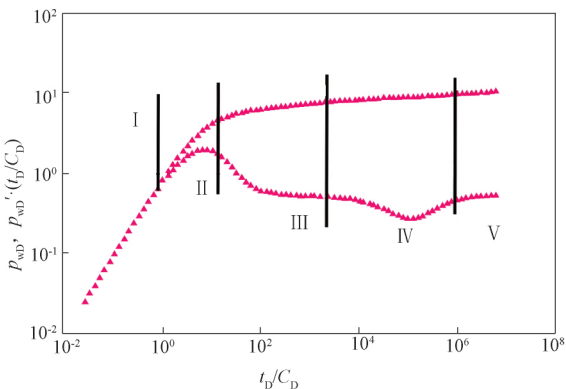


图 2 存在窜流的双层油藏聚合物驱典型曲线
Fig.2 Typical curve of polymer flooding double-layer reservoir in presence of crossflow

图 3 为窜流系数对压力曲线的影响。对于多层油藏,当两层存在较大的压力差,这个压力差能够克服两层之间的流体流动的垂向流动阻力,就能够发生窜流,窜流系数不同时,存在窜流多层油藏聚合物驱油藏典型曲线存在明显的不同。窜流系数 λ 决定“凹子”出现的早晚,窜流系数越小,“凹子”出现越晚,这是由于随着窜流系数减小,流动所需要的压力差就越大,因此窜流发生的时间就越晚,窜流完成后,表现出整个系统的径向流阶段^[27-28]。

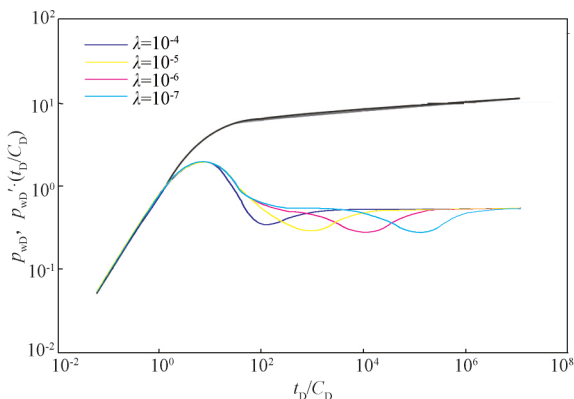


图 3 窜流系数对典型曲线的影响
Fig.3 Effect of crossflow coefficient on typical curve

图 4 为地层流动系数比对典型曲线的影响。地层流动系数比定义为第一层的流动系数与第一层、第二层流动系数的和之比。地层流动系数比不同时,存在窜流双层油藏聚合物驱油藏典型曲线存在明显的不同,地层流动系数比决定“凹子”的深浅,其值越小,“凹子”越浅,这是由于随着地层流动系数比的减小,高渗透层的流动性越差,流体从低渗透层向高渗透率层窜流的压力损失就越大,压力导数曲线的位置越靠上,“凹子”越浅,相反,“凹子”越深。流体由第一层向窜流完成后,两层油藏达到各自的径向流,表现出整个系统的径向流阶段。

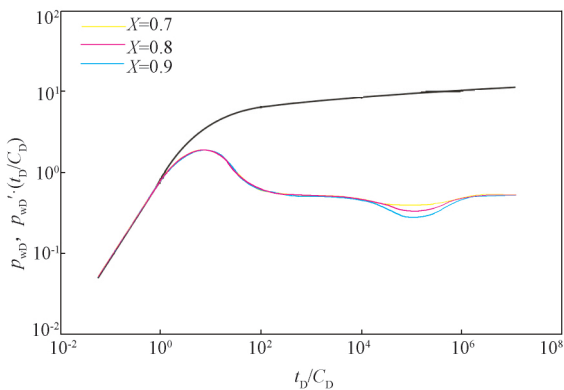


图 4 地层系数比对典型曲线的影响
Fig.4 Effect of formation coefficient ratio on typical curve

图 5 为弹性储容比对典型曲线的影响。弹性储容比不同时,存在窜流多层油藏聚合物驱油藏典型曲线存在明显的不同,弹性储容比 ω 影响“凹子”的深度和宽度,弹性储容比越大,“凹子”越窄越浅,弹性储容比越小,“凹子”越宽越深,这是由于随着弹性储容比减小,流动所需要的压力差越小,发生窜流的时间越早,并且由于高渗透层的储集能力越大,压降就越小,相应的压力及压力导数曲线位置越靠下;窜流完成后,表现出整个系统的径向流阶段。

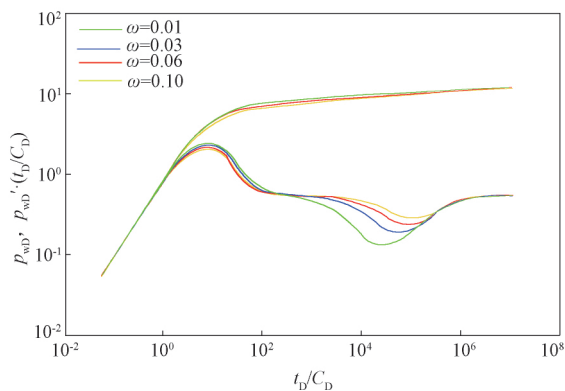


图 5 弹性储容比对典型曲线的影响

Fig.5 Effect of elastic storage ratio on typical curve

图 6 为聚合物初始浓度对压力曲线的影响。聚合物的初始浓度越大,相应的聚合物黏度也就越大,流体的流动性越差,流体从低渗透层向高渗透层流动所需要的压力差就越大。因此窜流发生的时间就越晚,发生窜流的时间就越晚,最后由于聚合物溶液黏弹效应的影响,整个系统径向流阶段曲线末端上翘的幅度也越大,显示出来类似幂律流体的典型曲线特征。

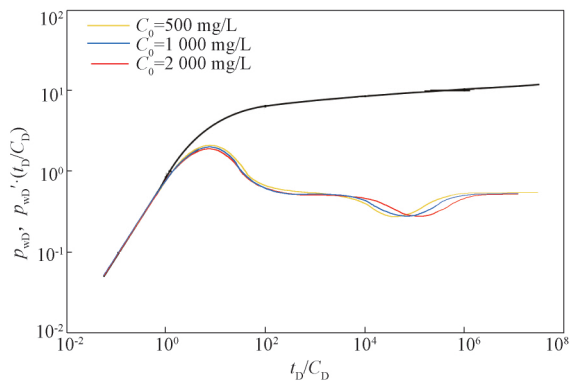


图 6 聚合物初始浓度对典型曲线的影响

Fig.6 Effect of initial polymer concentration on typical curve

3 实例分析

渤海油田某注聚井进行压力降落测试,该井注聚开始时间为 2013 年 3 月 1 日,聚合物注入浓度为 1 500 mg/L,该井所在两层都注入聚合物;2013 年 6 月 8 日 15:00 停注进行压力测试,测试时间 72 h,测试完成后 2013 年 6 月 11 日 15:00 恢复注入。注入井的注入量为 120 m³/d,原油体积系数 1.18,孔隙度 0.25,水的黏度 0.5 mPa·s,一、二层油藏厚度分别为 10 m、8 m,井半径 0.1 m,一、二层综合压缩系数为 0.004 MPa⁻¹、0.036 MPa⁻¹。

绘制实测压力数据双对数图,用现有比较接近

实测曲线特征的郭辉等^[20]聚驱双层油藏模型进行拟合,如图 7 所示,可以看出拟合效果不好,实测数据出现明显凹子并且凹子较深,因此采用文中提出的模型进行拟合,拟合曲线如图 8 所示,拟合效果较好。

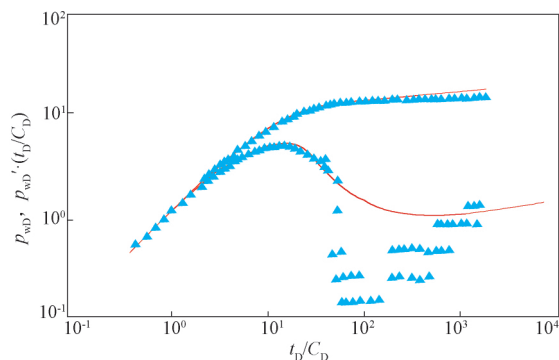


图 7 实例井测试数据与文献图版拟合曲线

Fig.7 Case study well test data fitting curve with the plates of reference paper

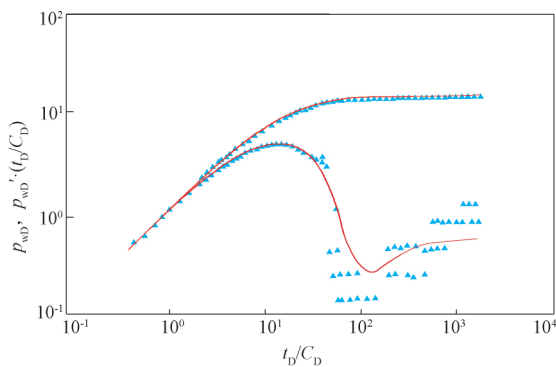


图 8 实例井测试数据与本文图版拟合曲线

Fig.8 Case study well test data fitting curve with the plates of reference paper

根据实测曲线与理论典型曲线拟合图,得出拟合参数原始地层压力 $p_i = 16.17$ MPa,一层渗透率 $K_1 = 0.0003$ mD、二层渗透率 $K_2 = 0.55$,一层表皮系数 $S_1 = 9.54$ 、二层表皮系数 $S_2 = 16.26$,井筒储集系数 $C = 0.54$ m³/MPa。

结果表明,实际油藏存在窜流,本文模型解释结果符合油田地质特征。且通过将解释得到的各层渗透率与聚驱前的测井渗透率比较可知,聚驱对该区低渗层影响较大,随着聚合物注入中后期,低渗层渗透率下降较多,吸液量减少,高渗层吸液量增加,出现了剖面返转,与该区剖面测试结果一致。

4 结论

(1) 基于聚合物基础参数模型,建立了聚合物

驱双层窜流油藏试井模型,通过差分离散求得了模型的数值解,绘制了模型的典型曲线图版,对聚合物驱多层油藏的试井解释研究具有一定的借鉴意义。

(2)典型曲线的主要影响因素有窜流系数、地层系数比、弹性储容比、聚合物浓度,窜流系数决定“凹子”出现的早晚,地层流动系数比决定“凹子”的深浅,弹性储容比 ω 影响“凹子”的深度和宽度,聚合物的初始浓度影响窜流时间的早晚及径向流阶段曲线末端上翘幅度。

(3)提出的聚合物驱双层窜流油藏模型的试井曲线中压力导数曲线后期出现明显凹子,符合实测曲线规律;对实际压力测试数据进行试井解释,其结果证实了聚合物驱双层窜流油藏模型及解释方法的可靠性,具有良好的应用前景。

致谢:感谢国家科技重大专项“海上油田化学驱油技术”(2016ZX05025-003)和中国海洋石油集团有限公司综合科研项目“海上多层稠油油藏化学驱交替注入技术研究”(YXKY-2014-ZY-03)联合资助。

参考文献

- [1] LEFKOVITS H C, HAZEBROEK P, ALLEN E E, et al. A study of the behavior of bounded reservoirs composed of stratified layers [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1961, 1(1): 43-58.
- [2] KUCUK F, KARAKAS M, AYESTARAN L. Well testing and analysis techniques for layered reservoirs [J]. SPE Formation Evaluation, 1986, 4(1): 342-354.
- [3] KUCUK F, SHAH P C, AYESTARAN L. Application of multilayer testing and analysis: a field case [C]. SPE 15419, 1986.
- [4] TARIQ M, RAMEY J H. Drawdown behavior of a well with storage and skin effect communicating with layers of different radii and other characteristics [C]. SPE 7453, 1987.
- [5] EHLIG-ECONOMIDES A, JOSEPH J. A new test for determination of individual layer properties in a multilayered reservoir [C]. SPE 14167, 1987.
- [6] 贾永禄.具有窜流的双层油气藏井底压力动态模型[J]. 天然气工业, 1997, 17(1): 52-54.
JIA Yonglu. Oil and gas reservoirs model for two layers channeling and dynamic monitor down hole pressure [J]. Natural Gas Industry, 1997, 17(1): 52-54.
- [7] 霍进, 贾永禄, 王海涛, 等. 多层窜流油气藏模型及井底压力动态[J]. 油气井测试, 2006, 15(2): 1-4.
HUO Jin, JIA Yonglu, WANG Haitao, et al. Oil and gas reservoirs model for multilayer channeling and dynamic monitor down hole pressure [J]. Well Testing, 2006, 15(2): 1-4.
- [8] 李传亮. 两种双重介质的对比与分析[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(4): 128-131.
LI Chuanliang. Two types of dual porosity media [J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(4): 128-131.
- [9] 刘洪, 任路, 胡治华. 缝洞型油藏钻遇溶洞油井的压力曲线特征[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(2): 124-128.
LIU Hong, REN Lu, HU Zhihua. Pressure curve characteristics for wells drilled in cave of fracture-cavity carbonate reservoirs [J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(2): 124-128.
- [10] 贾永禄, 孙高飞, 聂仁仕, 等. 四重介质油藏渗流模型与试井曲线[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(1): 123-127.
JIA Yonglu, SUN Gaofei, NIE Renshi, et al. Flow model and well test curves for quadruple-media reservoirs [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(1): 123-127.
- [11] 闫正, 郭康良, 李彦平, 等. 海上干扰试井数值模拟设计及方案优化[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(2): 98-102.
YAN Zheng, GUO Kangliang, LI Yanping, et al. Interference well test with numerical simulation design and program optimization at sea [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(2): 98-102.
- [12] 史英, 颜菲, 李小波. 考虑应力敏感疏松砂岩气藏试井分析[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(3): 114-117.
SHI Ying, YAN Fei, LI Xiaobo. Well test analysis of unconsolidated sandstone gas reservoir in consideration of stress sensitivity [J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(3): 114-117.
- [13] 董晓芳. 基于数值试井的聚驱前缘与大通道识别应用案例分析[J]. 油气井测试, 2018, 27(3): 66-71.
DONG Xiaofang. Case study for identification of polymer flooding front and large channel based on numerical well testing [J]. Well Testing, 2018, 27(3): 66-71.
- [14] 徐建平, 王连泽, 张宝海. 双渗透聚合物驱油藏不稳定压力动态[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 236-239.
XU Jianping, WANG Lianze, ZHANG Baohai. Transient pressures in a polymer-flooding reservoir with double permeability [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(2): 236-239.
- [15] 曾杨, 康晓东, 谢晓庆, 等. 存在部分连通断层的条带状油藏试井解释新模型[J]. 陕西科技大学学报, 2017, 35(6): 104-108.
ZENG Yang, KANG Xiaodong, XIE Xiaoqing, et al. Transient pressure behavior analysis in a banded reservoir with partially communicating faults [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2017, 35(6): 104-108.
- [16] IKOKU C U, RAMEY H J. Transient flow of non-newtonian power law fluids in porous media [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1979, 19(3): 164-174.
- [17] LUND O, IKOKU C U. Pressure transient behavior of non-

- Newtonian/ Newtonian fluid composite reservoirs [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1981, 21(2): 271-280.
- [18] IKOKU C U, RAMEY Jr H J. Wellbore storage and skin effects during the transient flow of non-Newtonian power-law fluids in porous media [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1980, 20(1): 25-38.
- [19] 岳世俊, 程时清, 周游. 考虑扩散和对流的聚合物驱压力响应特征[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(1): 16-19.
YUE Shijun, CHENG Shiqing, ZHOU You. Type curve of pressure in polymer flooding reservoir considering dispersion and convection [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(1): 16-19.
- [20] 郭辉, 程时清, 于海洋, 等. 聚合物驱双层油藏试井分析方法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(18): 35-39.
GUO Hui, CHENG Shiqing, YU Haiyang, et al. Well test analysis method of two layers reservoir with polymer flooding [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(18): 35-39.
- [21] YU Haiyang, GUO Hui, CHENG Shiqing, et al. Numerical well testing interpretation method of composite model and applications in offshore reservoirs by polymer flooding [J]. Asian Journal of Chemistry, 2014, 26(17): 5783-5788.
- [22] 程时清, 聂向荣. 聚合物驱复合油藏试井模型与典型曲线[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 110-113.
CHENG Shiqing, NIE Xiangrong. Well test model and type curves of composite reservoir with polymer flooding [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(4): 110-113.
- [23] 陈国, 赵刚, 马远乐. 黏弹性聚合物驱油的数学模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(6): 882-885.
CHEN Guo, ZHAO Gang, MA Yuanle. Mathematical model of enhanced oil recovery for viscous-elastic polymer flooding [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(2): 236-239.
- [24] 朱常玉, 程时清, 唐恩高, 等. 聚合物驱双层窜流复合模型试井分析方法[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2016, 34(4): 110-114, 124.
ZHU Changyu, CHENG Shiqing, TANG Engao, et al. Pressure transient analysis of crossflow double-layer composite model by polymer flooding [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2016, 34(4): 110-114, 124.
- [25] 朱常玉, 程时清, 唐恩高, 等. 聚驱后水驱的试井解释方法[J]. 油气井测试, 2017, 26(3): 15-18.
ZHU Changyu, CHENG Shiqing, TANG Engao, et al. Well testing analysis method of water flooding reservoirs after polymer flooding [J]. Well Testing, 2017, 26(3): 15-18.
- [26] 曾杨, 康晓东, 唐恩高, 等. 三层油藏水驱后转聚驱的试井解释方法[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(5): 146-153.
ZENG Yang, KANG Xiaodong, TANG Engao, et al. Well test analysis method for polymer flooding after water flooding in triple-layer reservoir [J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(5): 146-153.
- [27] 杨超, 李相方, 李彦兰, 等. 多层双孔介质储层水平井压力求解方法[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(3): 436-443.
YANG Chao, LI Xiangfang, LI Yanlan, et al. The computation method for horizontal well pressure in multilayered dual porosity reservoir [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(3): 436-443.
- [28] 廉培庆, 程林松, 李琳琳, 等. 裂缝性油藏弹性储容比和窜流系数变化规律研究[J]. 工程力学, 2011, 28(9): 240-244.
LIAN Peiqing, CHENG Linsong, LI Linlin, et al. The variation law of storativity ratio and interporosity transfer coefficient in fractured reservoirs [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(9): 240-244.

编辑 穆立婷

第一作者简介:曾杨,女,1987年出生,硕士,2012年毕业于西南石油大学油气田开发专业,现从事油气田开发及提高采收率相关工作。电话:010-84524033,13910215314; Email: zengyang@cnooc.com.cn。通信地址:北京太阳宫南街6号院中国海油大厦B708,邮政编码:100028。