

复合驱油藏非线性渗流试井模型的影响因素

梁光跃, 廖新维

中国石油大学(北京)石油天然气工程学院, 北京 102249

摘要 在基于变截面孔喉模型建立的黏弹性本构方程的基础上, 考虑黏弹性与流变参数的变化, 建立了碱-表面活性剂-聚合物(ASP)溶液不稳定渗流的试井模型, 并用有限差分方法求解, 得到了相应的有量纲与无量纲试井曲线。通过有量纲试井曲线, 分析了幂律指数、注入速度、稠度系数、渗透率、特征时间、孔隙因子等参数对复合驱油藏注入压力的影响; 通过无量纲试井曲线, 分析了这些参数对复合驱油藏试井曲线形态的影响。研究表明, 在进行复合驱油藏试井分析应用的过程中应适当考虑流变参数变化与黏弹性的影响; 而在流变参数变化不太剧烈、黏弹性不太大的情形下, 幂律试井模型具有很好的适用性。该试井模型的分析研究对复合驱渗流规律的探讨具有一定的借鉴意义。

关键词 复合驱; 试井模型; 黏弹性; 流变性; 理论曲线

中图分类号 TE353

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)07-0077-06

Influencing Factors of Nonlinear Flow Well Test Model in ASP Compounded Flooding Reservoir

LIANG Guangyao, LIAO Xinwei

Faculty of Petroleum and Natural Gas Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract The oil industry shows a great deal of interest in Alkali-Surfactant-Polymer (ASP) flooding in recovery operations. For its application, it is necessary to study the mechanisms of non-Newtonian flow through porous media. The present investigation shows that ASP solutions exhibit power-law and elastic properties within certain shear rates. The effect of viscoelasticity on the well test curve is studied from macroscopic perspective. Based on a varying cross-section throat model, the established viscous-elastic constitutive equation, with the consideration of the viscoelasticity and the variation of rheological parameters of ASP solutions, the seepage well test model of alkaline-surfactant-polymer solutions is established and solved by finite difference method, to obtain dimensional and dimensionless well test curves. From the dimensional typical curve, the effect of the parameters on the dimensional well test curve can be seen, such as the power-law exponent, injective rate, consistency coefficient, permeability, relaxation time, and tortuosity factor. The influence of these parameters can also be seen on the configuration of the well test curve in ASP reservoir. It is shown that it is necessary to consider the variation of rheological parameters and viscous-elasticity to some extent, in the application of the well test analysis method for ASP flooding reservoir. However, the power-law well test model is appropriate for ASP reservoir under the condition that rheological parameters change gently and with relatively small viscoelasticity. The research results of the well test model provide some food of thought for further investigation into ASP seepages.

Keywords ASP flooding; well test model; viscous-elastic; rheological properties; typical curve

收稿日期: 2009-11-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB221304); 教育部 2005 年度“新世纪优秀人才支持计划”项目

作者简介: 梁光跃, 硕士研究生, 研究方向为复合驱非线性渗流规律和试井分析, 电子信箱: guangyao1248292@sina.com; 廖新维(通信作者), 教授, 研究方向为油气田开发, 电子信箱: xinwei@cup.edu.cn

0 引言

大量的聚合物溶液流变性研究表明^[1-5],假塑性聚合物溶液以较高流速通过多孔介质时,出现胀流型的流变特性,这是由聚合物溶液的黏弹性引起的。从现有的资料统计,聚合物驱油藏试井分析的研究多集中于非牛顿幂律流体^[6-13]。这些研究既没有考虑流变参数在渗流方向上的变化,也没有考虑聚合物溶液在多孔介质中的弹性效应,因而不能真实地反映聚合物溶液在多孔介质中的渗流特性,其模型或结果很难直接用于复合驱油藏的试井分析。佟斯琴等^[14]引用德博拉数的概念描述聚合物溶液的弹性黏度,尹洪军等^[15]考虑了流变参数变化,曹仁义等^[16]将多孔介质简化为变截面孔喉模型,得到了黏弹性本构方程,分别得到了地层中的压力及井底压力变化曲线。但是,尚未有人对三元复合驱油藏的试井规律进行系统地分析研究。为了探讨在三元复合驱条件下油藏压力动态的变化规律,本文在基于变截面孔喉的黏弹性本构方程^[16]的基础上,建立了考虑黏弹性与流变参数变化的有量纲试井模型,分析了各因素对试井曲线的影响。

1 有量纲试井模型的建立与求解

1.1 基本假设

油藏等温、等厚、均质和各向同性;流体在地层中做平面径向流动,并满足广义达西定律;影响流体的压缩系数很小且为常数;忽略重力效应;碱-表面活性剂-聚合物(ASP)溶液在渗流过程中的剪切黏度服从幂律模型^[3-4],弹性黏度可以用变截面孔喉模型的弹性大小描述^[16];ASP溶液的流变参数沿程变化;考虑井筒储集与表皮效应的影响。

1.2 有效黏度

ASP溶液在多孔介质中流动时,存在剪切流动与弹性拉伸,前者表现为黏性黏度 μ_v ,后者表现为弹性黏度 μ_e ,有效黏度 μ_{eff} 为二者之和。ASP溶液在多孔介质中渗流时黏弹性本构模型为^[16]

$$\mu_{eff} = \mu_v + \mu_e = (1+w)\mu_v$$

$$w = \frac{12n}{3n+1} \alpha \dot{\gamma} \theta_t \left(1 - \frac{1}{\lambda_1^6}\right) - \frac{(B^4-1)^{1/2}}{(1+\beta)\alpha'} \left(1 - \frac{1}{\lambda_3^3}\right)$$

$$= \frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{1}{\lambda_1^3}\right) + 6\xi + \frac{1}{\alpha'} \left(1 - \frac{1}{\lambda_3^3}\right) \quad (1)$$

其中, w 为弹性黏度与黏性黏度之比; n 为幂律指数; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; θ_t 为特征时间, s ; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为变截面孔喉比; ξ 为孔隙因子; α, α' 为收敛或扩散系数; B 为胀大比; β 为待定系数。

1.3 流变参数变化

聚合物溶液在多孔介质中的流变性实验表明^[2],聚合物溶液的稠度系数 $H(r)$ 和幂律指数 $n(r)$ 沿渗流方向变化

$$\begin{cases} H(r) = H_w e^{\alpha(1-r/r_w)} \\ n(r) = n_w + \beta(1-r/r_w) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $H_w, n_w, H(r), n(r)$ 均为注入液在地层中任一点处流体的流变参数; r_w 为注入井半径;待定系数 α, β 可以表示为

$$\begin{cases} \alpha = \ln(H_p/H_w)/(1-L/r_w) \\ \beta = (n_p - n_w)/(1-L/r_w) \end{cases} \quad (3)$$

其中, H_p, n_p 分别为采出液的流变参数; L 为注入井与生产井的距离。

1.4 有量纲试井模型的建立

根据连续性方程和状态方程可以推得渗流控制方程

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{K}{\mu_{eff}} \frac{\partial p}{\partial r} \right] = \phi C_t \frac{\partial p}{\partial t} \quad (4)$$

其中, K 为渗透率, μm^2 ; ϕ 为孔隙度; C_t 为综合压缩系数, $(10^{-1} MPa)^{-1}$; p 为地层压力, $10^{-1} MPa$; t 为时间, s 。

初始条件

$$p(r, 0) = p_e \quad (5)$$

内边界条件

$$\begin{cases} q = \frac{C}{B} \cdot \frac{dp_{wf}}{dt} - \frac{2\pi h K}{\mu^*} \cdot \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_w} \\ p_{wf} = p(r_w, t) - S \cdot \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) \Big|_{r=r_w} \\ \left. \frac{K}{\mu^*} \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r=r_e} = \frac{q}{2\pi r_e h} \end{cases} \quad (6)$$

其中, μ^* 为特征黏度, p_{wf} 为井底流压, r_e 为外边界半径, cm ; r_w 为井半径, cm ; q 为流量, cm^3/s ; h 为地层有效厚度, cm ; C 为井筒储集系数, m^3/MPa ; B 为体积系数; S 为表皮系数。

外边界定压条件

$$p(r_e, t) = p_e \quad (7)$$

其中, r_e 为外边界半径, cm ; p_e 为边界压力。

1.5 有量纲试井模型的差分求解

由于在一维径向流的情况下,地层压力呈漏斗状,因而采用了不均匀的对数网格。引入变换: $x = \ln \frac{r}{r_w}$,并对方程在空间上采用中心差分格式、在时间上采用向后差分格式引入记号: $T_{i \pm \frac{1}{2}} = \left(\frac{K}{\mu_{eff}} \right)_{i \pm \frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{\Delta x_{i \pm \frac{1}{2}}}$,得到相应的渗流差分方程

$$a_i \cdot p_{i-1}^{n+1} + b_i \cdot p_i^{n+1} + c_i \cdot p_{i+1}^{n+1} = d_i; \quad i=1, 2, 3, \dots, N-1 \quad (8)$$

其中, $a_i = T_{i-\frac{1}{2}}$, $b_i = - \left[T_{i+\frac{1}{2}} + T_{i-\frac{1}{2}} + r_i^2 \cdot \phi C_t \cdot \frac{\Delta x_i}{\Delta t} \right]$, $c_i = T_{i+\frac{1}{2}}$, $d_i = -r_i^2 \cdot \phi C_t \cdot \frac{\Delta x_i}{\Delta t} \cdot p_i^n$ 。

根据式(6)差分得

$$a_0 \cdot p_0^{n+1} + b_0 \cdot p_1^{n+1} = d_0 \quad (9)$$

其中, $a_0 = \frac{B}{C} \cdot \frac{2\pi h K}{\mu^*} \cdot \Delta t - \Delta x - S$, $b_0 = \frac{B}{C} \cdot \frac{2\pi h K}{\mu^*} \cdot \Delta t + S$, $d_0 = S \cdot (p_1^n - p_0^n) - \Delta x \cdot p_0^n - \frac{qB}{C} \cdot \Delta x \cdot \Delta t$

对外边界定压条件差分得

$$a_N \cdot p_{N-2}^{n+1} + b_N \cdot p_{N-1}^{n+1} = d_{N-1} \quad (10)$$

其中, $d_{N-1} = d'_{N-1} - c_{N-1} \cdot p_{e0}$

式(9)可变形为三对角矩阵方程组

$$\begin{bmatrix} a_0 & b_0 & & & \\ a_1 & b_1 & c_1 & & \\ & a_2 & b_2 & c_2 & \\ & & \dots & \dots & \dots \\ & & & a_{N-2} & b_{N-2} & c_{N-2} \\ & & & & a_{N-1} & b_{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{wf} \\ p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_{N-2} \\ p_{N-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \\ \dots \\ d_{N-2} \\ d_{N-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

由于式(11)是非线性方程组,采用追赶法迭代求解。求解过程为:选定时间步长,将前一时刻的值代入,求得新时刻的解,循环迭代,记录下“不同时刻的井底压力值”和“压力稳定后的地层中任一点的压力值”,得到“有量纲试井曲线”,利用 stehfest 数值反演算法^[17-18],求取相应的“有量纲压力导数试井曲线”,形成压力与导数的组合图版。

2 注入条件下的典型曲线与影响因素分析

取贮藏参数: $n=0.65$, $H=30\text{MPa}\cdot\text{s}^n$, $p_e=10\text{MPa}$, $K=0.5\mu\text{m}^2$, 特征时间 $\theta_i=0.5\text{s}$, 孔隙因子 $\xi=0.125$, 孔喉比 $\lambda=8$, 胀大比 $B=1.2$, 待定系数 $\beta=1.4$, $C=0.01\text{m}^3/\text{MPa}$, $S=2$, $h=8\text{m}$, $\phi=0.25$, $C_i=5.0\times 10^{-4}\text{MPa}^{-1}$, $B=1.12$, $r_e=150\text{m}$, $r_w=0.1\text{m}$; 取注入参数 $q=120\text{m}^3/\text{d}$, $t\approx 115\text{d}$ 。

以定压边界为例, 为了对试井模型进行影响因素分析, 需要将“有量纲试井曲线”转化为“无量纲试井曲线”, 因此引入无因次量定义

$$\begin{cases} p_D = \frac{Kh}{1.842 \times 10^{-3} q B \mu^*} (p - p_i) \\ t_D = \frac{3.6 K t}{\phi \mu^* C_i r_w^2} \\ C_D = \frac{C}{2 \pi h \phi C_i r_w^2} \\ r_D = \frac{r}{r_w} \end{cases} \quad (12)$$

2.1 复合驱油藏试井曲线的影响因素分析

以复合驱油藏注入井为例, 考虑黏弹性的影响, 通过理论求解所得的有量纲试井曲线, 依次分析了幂律指数、注入速度、稠度系数、渗透率、特征时间、孔隙因子等参数对注入压力大小的影响; 结合无因次量定义将有量纲试井曲线转化为无量纲试井曲线, 进而分析了这些因素对复合驱油藏试井曲线形态的影响。

2.1.1 幂律指数对复合驱油藏试井曲线的影响

幂律指数反映溶液非牛顿性的强弱, 幂律指数越小, 非牛顿性越强。从图 1 可以看出, 井底压力随幂律指数的增大而增大。这是因为井底附近剪切速率较大, 满足剪切速率 $> 1\text{s}^{-1}$ 时, 幂律指数越大, 剪切速率越大, 从而剪切黏度 $\mu_e = H\dot{\gamma}^{n-1}$ 越大; 而幂律指数越大, 弹性越小, 弹性黏度比重越小。这两种影响的总体趋势为: 幂律指数越大, 近井地带有效黏度越大, 从而井底压力越大。从图 2 可以看出, 不同幂律指数对应的试井曲线的形态不同, 幂律指数越大, 径向流压力导数越趋向于水平。因而对于复合驱油藏的试井来说, 幂律指数的准确确定非常关键。

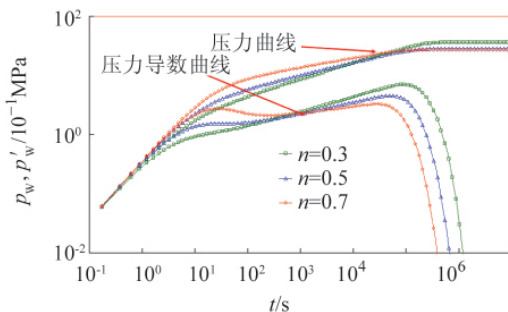


图 1 不同幂律指数下的复合驱有量纲试井曲线
Fig. 1 Comparison of ASP dimensional curve under different power-law indexes

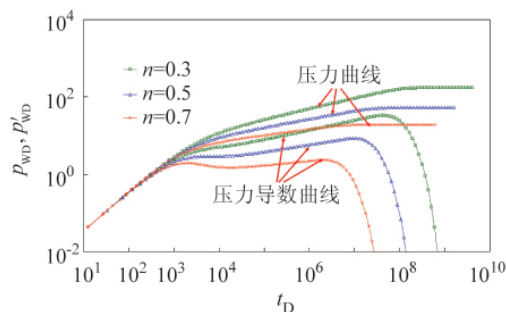


图 2 不同幂律指数下的复合驱无量纲试井曲线
Fig. 2 Comparison of ASP dimensionless curve under different power-law indexes

2.1.2 注入速度对复合驱油藏试井曲线的影响

从图 3 可以看出, 随着注入速度的增大, 有量纲试井曲线平行上移, 井底压力近似直线上升。这是因为随着注入速度的增大, 剪切速率增大, 有效黏度增大, 使得井底压力呈现近似直线上升。从图 4 可以看出, 不同注入速度对应的无量纲试井曲线形态相同、几乎重合, 因而注入速度的改变对复合驱油藏试井曲线形态的影响可以忽略。

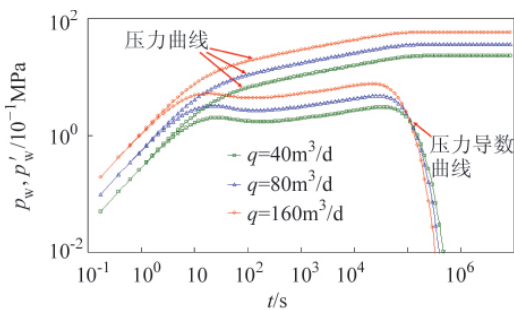


图 3 不同注入速度下的复合驱有量纲试井曲线
Fig. 3 Comparison of ASP dimensional curve under different injective speeds

2.1.3 稠度系数对复合驱油藏试井曲线的影响

稠度系数反应聚合物溶液的黏性程度。从图 5 可以看

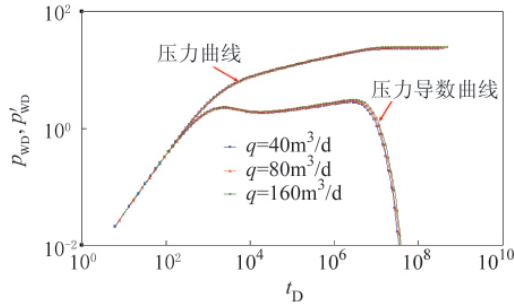


图 4 不同注入速度下的复合驱无量纲试井曲线
Fig. 4 Comparison of ASP dimensional curve under different injective speeds

出,随着稠度系数的增大,有量纲试井曲线平行上移,井底压力近似呈直线上升。这是因为:稠度系数越大,剪切黏度增大,有效黏度增大,渗流阻力增加使得井底压力上升。从图 6 可以看出,不同稠度系数的对应的无量纲试井曲线形态相似、几乎重合。这是因为:假定地层各处稠度系数一致且不变,而实际地层情况并非如此,往往各处稠度系数不一致,且随时间变化。

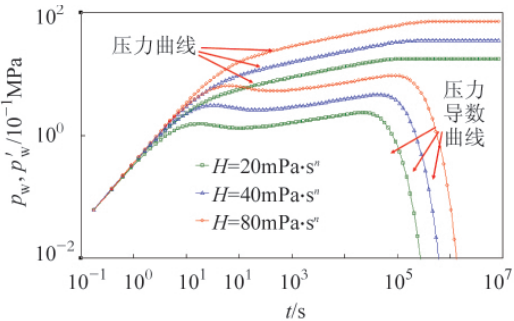


图 5 不同稠度系数下的复合驱有量纲试井曲线
Fig. 5 Comparison of ASP dimensional curve under different consistency indexes

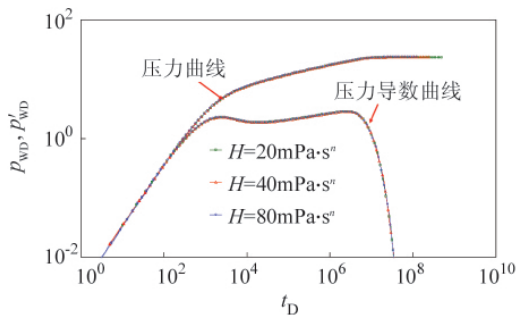


图 6 不同稠度系数下的复合驱无量纲试井曲线
Fig. 6 Comparison of ASP dimensional curve under different consistency indexes

2.1.4 渗透率对复合驱油藏试井曲线的影响

从图 7 可以看出,渗透率越大,有量纲试井曲线平行上

移,井底压力近似呈直线上升。这是因为:渗透率越小,渗流阻力越大,相应的井底压力上升。从图 8 可以看出,不同渗透率对应的无量纲试井曲线形态相同、几乎重合,因而在渗透率差异不太大的情形下,渗透率对复合驱油藏试井曲线形态的影响可以忽略。

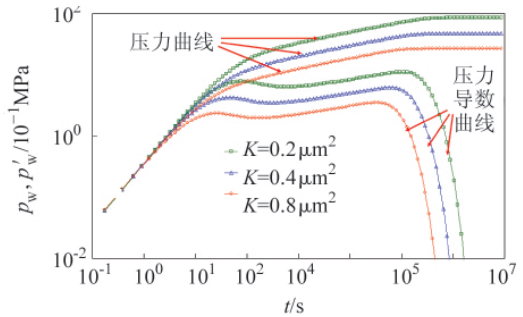


图 7 不同渗透率下的复合驱有量纲试井曲线
Fig. 7 Comparison of ASP dimensional curve under different permeability

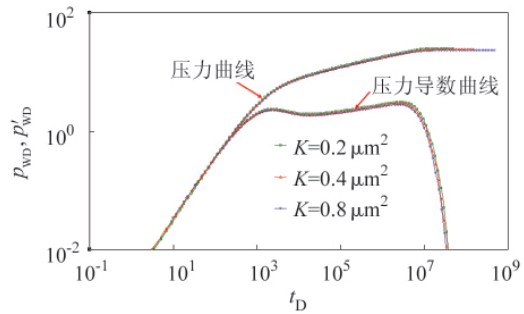


图 8 不同渗透率下的复合驱无量纲试井曲线
Fig. 8 Comparison of ASP dimensional curve under different permeability

2.1.5 特征时间对复合驱油藏试井曲线的影响

从图 9 中可以看出,随着复合驱溶液特征时间的增大,井底压力越大。这是因为:特征时间越大,聚合物溶液的弹性越强,弹性黏度越大,有效黏度越大,从而使得井底压力越大。从图 10 可以看出,不同特征时间下的无量纲试井曲线形

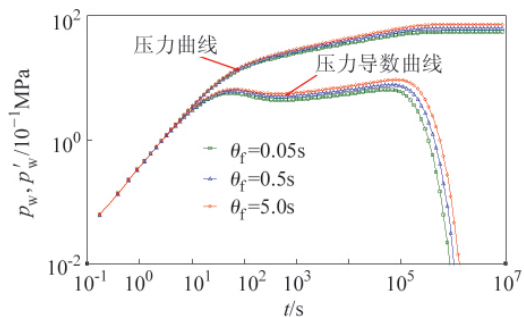


图 9 不同特征时间下的复合驱有量纲试井曲线
Fig. 9 Comparison of ASP dimensional curve with different relaxation time

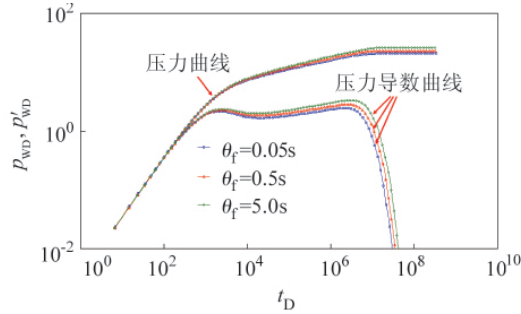


图 10 不同特征时间下的复合驱无量纲试井曲线
Fig. 10 Comparison of ASP dimensionless curve with different relaxation time

态近似,在特征时间变化不大的条件下影响可以忽略。

2.1.6 孔隙因子对复合驱油藏试井曲线的影响

从图 11 可以看出,孔隙因子越小,井底压力越大。这是因为:孔隙因子越小,聚合物溶液弹性发挥空间越大,渗流阻力增加,从而井底压力越大。从图 12 可以看出,不同孔隙因子下的无量纲试井曲线形态相似,在径向流阶段及其后期存在一定误差,但孔隙因子变化不大的条件下影响可以近似忽略。

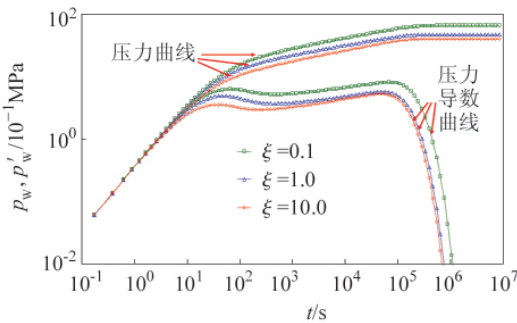


图 11 不同孔隙因子下的复合驱有量纲试井曲线
Fig. 11 Comparison of ASP dimensional curve with different porosity factors

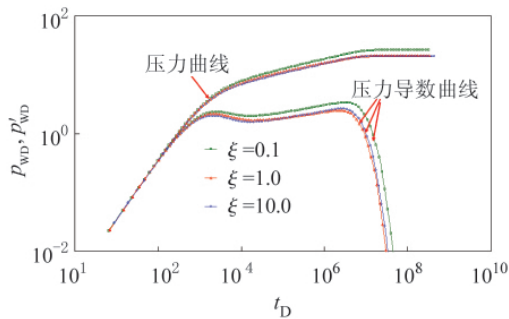


图 12 不同孔隙因子下的复合驱无量纲试井曲线
Fig. 12 Comparison of ASP dimensionless curve with different porosity factors

2.2 幂律模型在复合驱油藏试井中的适用性探讨

考虑流变参数: $H_w=28.40\text{mPa}\cdot\text{s}^n$, $H_p=19.66\text{mPa}\cdot\text{s}^n$, $n_w=0.76$,

$n_p=0.9898$, 绘制“ H 、 n 不变的黏弹性模型”、“ H 、 n 变化的黏弹性模型”无量纲试井对比曲线 (图 13); “ H 、 n 变化的幂律模型”、“ H 、 n 变化的黏弹性模型”无量纲试井对比曲线 (图 14)。

从图 13 中可以看出, 考虑流变参数变化的试井模型与

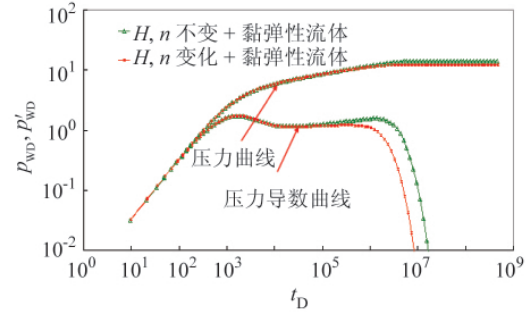


图 13 流变参数变化对复合驱油藏试井曲线的影响
Fig. 13 Comparison of ASP dimensionless curve with Consideration rheological parameter variation

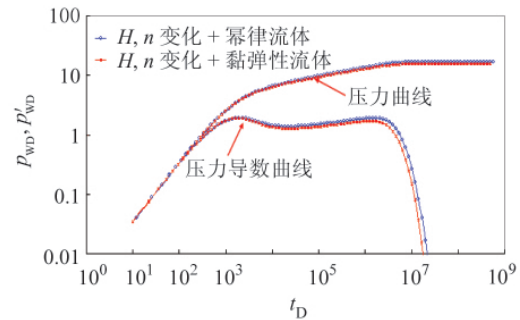


图 14 黏弹性对复合驱油藏试井曲线的影响
Fig. 14 Comparison of ASP dimensionless curve with Consideration of viscoelasticity

不考虑流变参数变化的试井模型在早期井筒储集与过渡段差别较小,但在径向流后期存在着较大误差,边界处误差达到 35%;从图 14 可以看出,考虑黏弹性的试井模型与不考虑黏弹性的试井模型在整个阶段存在误差,边界处误差达到 11.3%。因而,在进行复合驱驱油藏试井分析应用的过程中,应当适当考虑流变参数变化与黏弹性的影响,但在二者变化不大的条件下幂律流体试井模型具有很好的适用性。

3 结论

1) 在曹仁义等^[16]根据聚合物溶液特性和孔隙特征推导的黏弹性本构模型的基础上,建立了考虑黏弹性与流变参数变化的有量纲试井模型,用数值方法进行了求解,并绘制了多种因素影响下的有量纲与无量纲试井曲线。

2) 研究发现,黏弹性的存在是造成注入压力升高的原因之一。井底压力随着幂律指数、注入速度、稠度系数、特征时间的增大而升高,随着渗透率、孔隙因子的增大而降低。

3) 流变参数变化、黏弹性都会引起试井曲线的偏差。在

复合驱油藏试井分析应用的过程中应适当考虑流变参数变化与黏弹性的影响;但当二者变化不是很大的情况下,可以用幂律流体试井模型解释分析。

参考文献 (References)

- [1] Allen E, Boger D V. The influence of rheological properties on mobility control in polymer-augmented waterflooding [C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston: Society of Petroleum Engineers, 1988: 18097-MS.
- [2] 汪伟英. 孔隙介质中聚合物溶液的粘弹性及流变性[J]. 江汉石油学报, 1994, 16(4): 54-62.
Wang Weiyang. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 1994, 16(4): 54-62.
- [3] 陈铁龙, 董范, 尤冬青, 等. ASP 三元复合体系宏观流变特征研究[J]. 西南石油学院学报, 1998, 20(1): 53-55.
Chen Tielong, Dong Fan, You Dongqing, et al. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 1998, 20(1): 53-55.
- [4] 赵庆辉, 陈超, 岳湘安, 等. ASP 体系的参数在多孔介质中的流变特性[J]. 油气采收率技术, 2000, 7(2): 9-11.
Zhao Qinghui, Chen Chao, Yue Xiang'an, et al. *Oil & Gas Recovery Technology*, 2000, 7(2): 9-11.
- [5] 祝仰文, 张以根, 刘坤, 等. HPAM 溶液驱油过程中弹性作用的探讨[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(6): 64-67.
Zhu Yangwen, Zhang Yigen, Liu Kun, et al. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2002, 24(6): 64-67.
- [6] Ikoku C U, Ramey H J Jr. Transient flow of non-Newtonian power-law fluids in porous media[J]. *SPE Journal*, 1979, 19(3): 164-174.
- [7] Ikoku C U, Ramey H J Jr. Wellbore storage and skin effects during the transient flow of non-Newtonian power-law fluids in porous media[J]. *SPE Journal*, 1980, 20(1): 25-38.
- [8] Vongvuthipornchai S, Raghavan R. Well test analysis of data dominated by storage and skin: Non-Newtonian power-law fluids[J]. *SPE Formation Evaluation*, 1987, 2(4): 618-628.
- [9] 刘泽俊, 孙智, 宋考平. 有界地层非牛顿渗流试井解释模型[J]. 大庆石油地质与开发, 1996, 15(3): 63-66.
Liu Zejun, Sun Zhi, Song Kaoping. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 1996, 15(3): 63-66.
- [10] 宋考平, 王雷, 计秉玉. 非牛顿-牛顿复合油藏渗流试井解释方法[J]. 石油学报, 1996, 17(1): 82-85.
Song Kaoping, Wang Lei, Ji Bingyu. *Acta Petrolei Sinica*, 1996, 17(1): 82-85.
- [11] 杨二龙. 聚合物驱试井解释方法研究[D]. 大庆: 大庆石油学院石油工程学院, 2002.
Yang Erlong. A study of well test analysis for a reservoir with polymer flooding [D]. Daqing: Faculty of Petroleum, Daqing Petroleum Institute, 2002.
- [12] 徐建平, 刘聪, 王承毅, 等. 非牛顿流体注入动态分析方法研究文集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 10-69.
Xu Jianping, Liu Cong, Wang Chengyi, et al. Anthology of dynamic analysis method of injective non-Newtonian fluid[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 10-69.
- [13] 王海涛. 注聚渗流规律与试井分析研究[D]. 南充: 西南石油大学石油工程学院, 2006.
Wang Haitao. Research on seepage regular and well testing of injective polymer solution [D]. Nanchong: Faculty of Petroleum, Xinan Petroleum University, 2006.
- [14] 佟斯琴, 刘春梅, 刘秀明. 考虑粘弹效应的聚合物溶液地下流动压力动态[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(4): 29-31.
Tong Siqing, Liu Chunmei, Liu Xiuming. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2000, 19(4): 29-31.
- [15] 尹洪军, 吕彦平, 于开春, 等. 黏弹性聚合物溶液不稳定渗流模型[J]. 大庆石油学院学报, 2004, 28(2): 28-30.
Yin Hongjun, Lv Yanping, Yu Kaichun, et al. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2004, 28(2): 28-30.
- [16] 曹仁义, 程林松, 郝炳英, 等. 黏弹性聚合物溶液渗流数学模型[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(2): 107-109.
Cao Renyi, Cheng Linsong, Hao Bingying, et al. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2007, 22(2): 107-109.
- [17] Stehfest H. Numerical inversion of Laplace transform [J]. *Communication of the ACM*, 1970.
- [18] Stehfest H. Remark on numerical inversion of Laplace transforms [J]. *Communication of the ACM*, 1970, 13(10): 624-625.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



“第十六届全国波谱学学术年会”征文

由中国物理学会主办的“第十六届全国波谱学学术年会”将于2010年11月23-28日在海口市举行。

会议征文范围:核磁共振、电子顺磁共振、磁共振成像、核四极矩共振,以及磁共振相关领域的理论、方法、技术及其在物理学、化学、生物学和医学等方面应用的未公开发表过的研究工作。全文截稿日期:2010年5月30日。

会议网站:http://www.wipm.cas.cn/xwzx/tzgg/200912/t20091201_2679323.html。

联系方式:湖北省武汉市71010信箱中国科学院武汉物理与数学研究所(430071)毛诗珍;电话:027-87197126;电子邮箱:maosz@wipm.ac.cn。