

Newton-非 Newton 幂律流双区复合水平井 压力动态特征分析*

姬安召

(陇东学院 能源工程学院, 甘肃 庆阳 745100)

摘要: 聚合物驱油在提高原油采收率方面具有重要作用,水平井在薄层油田的开发过程中占有重要优势.根据聚合物驱油过程,基于点源函数基本理论,建立了 Newton-非 Newton 双区复合水平井试井解释数学模型.利用 Laplace 积分变换和 Fourier 有限余弦积分变换方法,获得了 Laplace 空间 Newton-非 Newton 双区复合水平井试井解释数学模型的解析解.通过 Stehfest 数值反演得到了典型无因次井底压力、压力导数特征曲线.研究表明:幂律指数越小,外区压力、压力导数曲线上翘越明显,且压力导数曲线呈斜率为 $(1 - m)/(3 - m)$ 的直线;当幂律指数为 1 时,该模型简化为水平井常规双区复合模型;水平井水平段长度越长,早期径向流阶段结束的时间越早;内外区流度比越大、内区半径越小,外区压力和压力导数曲线位置越高,且始终保持斜率为 $(1 - m)/(3 - m)$ 的直线.

关键词: 聚合物驱; 幂率指数; Laplace 积分变换; 点源函数; 水平井

中图分类号: TE312

文献标志码: A

DOI: 10.21656/1000-0887.390252

符号说明

C	井储系数, m^3/Pa	r_{in}	内区半径, m
L_{ref}	参考长度, m	L_h	水平井半长, m
h	有效地层厚度, m	ρ	无限小垂直距离, m
δ	无限小径向距离, m	p_1, p_2	内区、外区储层压力, Pa
p_i	原始储层压力, Pa	\bar{p}_{hd}	Laplace 空间水平井压力, Pa
q	生产井地下产量, m^3/s	\tilde{q}	瞬时流量, m^3/s
r	任意位置径向距离, m	t	生产时间, s
S	表皮系数, 无因次	x, y, z	三维空间中任意位置坐标, m
k_1, k_2	内区、外区储层渗透率, m^2	x_w, y_w, z_w	三维空间中任意计算位置坐标, m
C_{11}, C_{12}	内区、外区综合压缩系数, Pa^{-1}	μ_1, μ_2	内区、外区幂律流体黏度, $Pa \cdot s$
m	幂律指数, 无因次	ϕ_1, ϕ_2	内区、外区地层孔隙度, 无因次
μ_a	外区幂律流体视黏度, $Pa \cdot s$	M_{12}	内区、外区流体流度比, 无因次

* 收稿日期: 2018-09-25; 修订日期: 2019-03-15

基金项目: 甘肃省高等学校科研项目(2018A-097)

作者简介: 姬安召(1983—),男,讲师,硕士(E-mail: jianzhao_831024@163.com).

u	Laplace 变量	η_{12}	内区、外区储层导压系数比, 无因次
$I_0(x), I_1(x)$	分别为零阶和一阶的第一类修正 Bessel 函数		
$K_0(x), K_1(x)$	分别为零阶和一阶的第二类修正 Bessel 函数		
$K_\nu(x), I_\nu(x)$	分别为 ν 阶的第二类和第一类修正 Bessel 函数		
下标			
D	无因次变量	h	水平方向
v	垂直方向		
上标			
-	Laplace 空间参数	\sim	有限余弦 Fourier 变换变量

引 言

聚合物驱成为提高原油采收率的重要手段, 可将聚合物驱替过程抽象为 Newton-非 Newton 流体组成的双区复合模型^[1-2]。水平井与储层接触面积大, 单井产量高, 井筒附近流动阻力小, 因此, 水平井在复杂油气藏和薄层储层的开采中占有重要地位^[3-5], 研究 Newton-非 Newton 双区复合水平井试井解释模型对储层参数的求取和油气藏评价具有重要作用。在非 Newton 幂律流体试井模型研究方面, 国外学者 Ikoku 和 Ramey^[6]对多孔介质中的非 Newton 幂律流体不稳定渗流特征做了研究; Vongvuthiporncha 等^[7]在此基础上进一步考虑了井筒储集和表皮效应的影响, 求得了均质无限大地层 Laplace 空间的解析解。在聚合物驱油藏压力动态特征研究方面, 国内学者宋考平等^[8]建立了 Newton-非 Newton 复合油藏直井渗流数学模型, 采用 Laplace 变换解得 Newton 区、非 Newton 区的 Laplace 空间的解析解; 梁光跃等^[9]假定三元复合体系为非 Newton 幂律流体, 建立了考虑井筒储集与表皮效应直井渗流数学模型, 为三元复合驱油试井解释方法提供理论依据; 李元媛等^[10]在文献[9]的基础上建立了非 Newton 幂律流体模型, 采用分离变量法获得非正常非线性模型的解析解, 为非 Newton 幂律流体数学模型的求解提出了新方法; 郭辉等^[11]、程时清等^[12]建立了聚合物驱双区复合直井试井模型, 此模型为 Newton-非 Newton 流体复合模型, 由于模型的非线性较强, 因此采用有限差分法对模型进行求解; 姚军等^[13]建立了碱-聚合物复合驱油藏流线数值试井解释模型, 考虑了碱组分、聚合物组分的扩散情况, 给出了不同驱动方式、不同碱浓度对井底压力的影响; 帅媛媛等^[14]建立了聚合物驱水平井产能方程, 分析幂律指数对产能的影响。综上所述, 这些聚合物驱替试井解释模型都是基于直井展开的, 对于聚合物驱水平井压力动态特征没有展开深入的研究。在复合油藏水平井压力动态研究方面, 大部分研究都是建立双区渗流微分方程并采用 Laplace 变换进行求解, 利用点源函数的方法求解相对较少。Ozkan 等^[15]基于 Gringarten 等^[16]实空间点源函数的研究, 将其转化到 Laplace 空间, 为考虑井储和表皮影响时储层压力求解奠定了良好的基础。Chen 等^[17]、Zhao (赵玉龙) 等^[18]基于点源函数基本原理, 对双区复合油藏压裂井的试井解释模型进行了研究; 石国新等^[19]、王晓冬等^[20]建立了 Newton 流体复合油藏水平井试井模型, 并采用有限余弦 Fourier 积分变换法进行求解; 姜瑞忠等^[21]建立了水平井穿透内区的复合油藏 Newton 流体试井解释模型, 采用点源函数叠加方法进行求解; 吴明录等^[22]建立了稠油热采三区复合油藏水平井试井解释模型, 采用 Laplace 变换和有限余弦积分变换进行降维和齐次化处理, 为模型解析解的求解提出了新方法; 刘启国等^[23]对夹角断层多段压裂水平井模型提出了新的求解

方法.

本文基于前人提出的 Newton-非 Newton 双区复合直井以及水平井试井解释模型求解方法,根据点源函数基本理论,首先建立了 Newton-非 Newton 双区复合油藏物理模型,通过 Laplace 变换和有限余弦 Fourier 变换求解出点源函数基本解;然后对点源解积分获得 Newton-非 Newton 复合油藏水平井试井解释模型解析解;最后利用 Stehfest 数值反演^[24-25]获得实空间井底压力解,绘制了井底压力及压力导数典型特征曲线并进行了影响因素分析.

1 试井模型的建立与求解

1.1 物理模型描述

针对聚合物驱油过程,本文的物理模型可抽象为 Newton 流体-非 Newton 幂律流体组成的双区复合油藏(图 1).内区为 Newton 流体,外区为非 Newton 幂律流体,内区半径为 r_{in} .具体假设条件如下:

- 1) 井位于地层中心,储层为水平、均质、等厚地层.
- 2) 各区流体均为单相微可压缩液体,忽略重力和毛管力的影响.
- 3) 各区流体均符合等温渗流.
- 4) 水平井水平段半长为 L_h .
- 5) 内区与外区渗流界面不存在附加压力降.

6) 非 Newton 流体黏度服从 Ostwald-de Waele 幂律流体模型.根据文献[2],幂律流体的视黏度与特征黏度的比值可以用 Newton 区半径和幂律指数表示,即

$$\frac{\mu_a}{\mu_2} = \left(\frac{r_D}{r_{inD}} \right)^{1-m}. \quad (1)$$

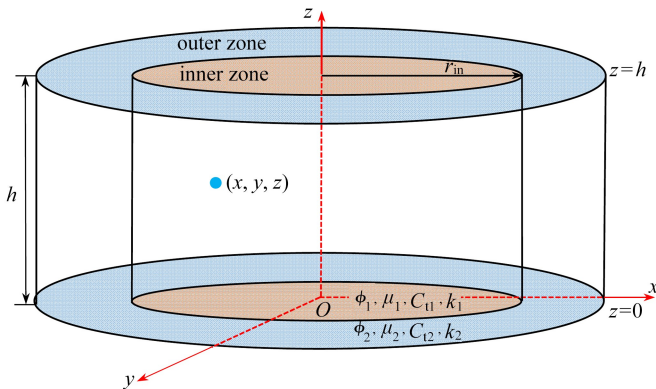


图 1 Newton-非 Newton 复合区点源物理模型示意图

Fig. 1 The physical model for the point source in the Newtonian-non-Newtonian composite reservoir

1.2 Newton-非 Newton 双区复合点源函数解

根据上述物理模型描述,三维空间无因次渗流微分方程如下:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial p_{D1}}{\partial r_D} \right) + \frac{\partial^2 p_{D1}}{\partial z_D^2} = \frac{\partial p_{D1}}{\partial t_D}, \quad 1 \leq r_D \leq r_{inD}, \quad (2)$$

其中

$$r_D = \sqrt{(x_D - x_{wD})^2 + (y_D - y_{wD})^2}.$$

外区无因次渗流微分方程如下:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D^m \frac{\partial p_{D2}}{\partial r_D} \right) + k_D \frac{\partial^2 p_{D2}}{\partial z_D^2} = r_{inD}^{m-1} \eta_{12} \frac{\partial p_{D2}}{\partial t_D}, \quad r_{inD} \leq r_D, \quad (3)$$

其中

$$\eta_{12} = \left(\frac{k_1}{\phi_1 \mu_1 C_{11}} \right) / \left(\frac{k_2}{\phi_2 \mu_2 C_{12}} \right).$$

在初始时刻,内外区压力相等且都为原始地层压力:

$$p_{D1}(r_D, z_D, t_D = 0) = p_{D2}(r_D, z_D, t_D = 0) = 0. \quad (4)$$

由于水平井位于上下封闭边界储层中,因此,上下边界封闭条件可以写为

$$\frac{\partial p_{D1}(r_D, z_D = 0, t_D)}{\partial z_D} = \frac{\partial p_{D2}(r_D, z_D = 0, t_D)}{\partial z_D} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial p_{D1}(r_D, z_D = h_D, t_D)}{\partial z_D} = \frac{\partial p_{D2}(r_D, z_D = h_D, t_D)}{\partial z_D} = 0. \quad (6)$$

侧向无限大外边界为

$$p_{D2}(r_D = +\infty, z_D, t_D) = 0, \quad (7)$$

内边界条件为

$$\lim_{\rho_D \rightarrow 0} \int_{z_{wD} - \rho_{D2}/2}^{z_{wD} + \rho_{D2}/2} \left[\lim_{\varepsilon_D \rightarrow 0} \left(r_D \frac{\partial p_{D1}}{\partial r_D} \right)_{r_D = \varepsilon_D} \right] dz_D = -\tilde{q}_D(t_D) \rho_D. \quad (8)$$

内区与外区界面处压力和速度相等:

$$p_{D1} \Big|_{r_D = r_{inD}} = p_{D2} \Big|_{r_D = r_{inD}}, \quad (9)$$

$$M_{12} \frac{\partial p_{D1}}{\partial r_D} \Big|_{r_D = r_{inD}} = \frac{\partial p_{D2}}{\partial r_D} \Big|_{r_D = r_{inD}}, \quad (10)$$

其中

$$M_{12} = \left(\frac{k_1}{\mu_1} \right) / \left(\frac{k_2}{\mu_2} \right).$$

式(1)~(10)中各参数的无因次定义如下:

$$r_D = \frac{r}{L_{ref}}, \quad r_{inD} = \frac{r_{in}}{L_{ref}}, \quad x_D = \frac{x}{L_{ref}}, \quad y_D = \frac{y}{L_{ref}}, \quad z_D = \frac{z}{L_{ref} \sqrt{k_{h1}/k_{v1}}},$$

$$x_{wD} = \frac{x_w}{L_{ref}}, \quad y_{wD} = \frac{y_w}{L_{ref}}, \quad z_{wD} = \frac{z_w}{L_{ref} \sqrt{k_{h1}/k_{v1}}}, \quad h_D = \frac{h}{L_{ref}}, \quad k_D = \left(\frac{k_{h1}}{k_{v1}} \right) / \left(\frac{k_{h2}}{k_{v2}} \right),$$

$$L_{hD} = \frac{L_h}{L_{ref}}, \quad p_{D1} = \frac{2\pi k_{h1} h}{q_{sc} \mu_1} (p_i - p_1), \quad p_{D2} = \frac{2\pi k_{h1} h}{q_{sc} \mu_1} (p_i - p_2),$$

$$t_D = \frac{k_{h1} t}{\phi_1 \mu_1 C_{11} L_{ref}^2}, \quad \tilde{q}_D = \frac{\tilde{q}(t) L_{ref}}{q}, \quad C_D = \frac{C}{2\pi \phi_1 C_{11} h L_{ref}^2}.$$

为了求解上述模型,分别对式(2)~(10)关于无因次时间 t_D 进行 Laplace 积分变换,得到 Laplace 空间渗流微分方程和边界条件,再对 z_D 进行有限余弦 Fourier 变换和逆变换,式(11)和

(12) 为有限余弦 Fourier 变换和逆变换:

$$\widehat{p}_{Di}(r_D, n, u) = \int_0^{h_D} \bar{p}_{Di}(r_D, z_D, u) \cos\left(\frac{n\pi z_D}{h_D}\right) dz_D, \quad i = 1, 2, \quad (11)$$

$$\bar{p}_{Di}(r_D, z_D, u) = \frac{1}{h_D} \left[\widehat{p}_{Di}(r_D, 0, u) + 2 \sum_{n=1}^{+\infty} \widehat{p}_{Di}(r_D, n, u) \cos\left(\frac{n\pi z_D}{h_D}\right) \right], \quad i = 1, 2. \quad (12)$$

得到 Laplace 变换和有限余弦 Fourier 变换之后的渗流微分方程及其边界条件如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{r_D} \frac{d}{dr_D} \left(r_D \frac{d\widehat{p}_{D1}}{dr_D} \right) = \left(u + \frac{n^2 \pi^2}{h_D^2} \right) \widehat{p}_{D1}, \\ \frac{1}{r_D} \frac{d}{dr_D} \left(r_D^m \frac{d\widehat{p}_{D2}}{dr_D} \right) = \left(u r_{\text{ind}}^{m-1} \eta_{12} + k_D \frac{n^2 \pi^2}{h_D^2} \right) \widehat{p}_{D1}, \\ \widehat{p}_{D2}(r_D = +\infty, n, u) = 0, \\ \widehat{p}_{D1} \Big|_{r_D=r_{\text{ind}}} = \widehat{p}_{D2} \Big|_{r_D=r_{\text{ind}}}, \\ M_{12} \frac{d\widehat{p}_{D1}}{dr_D} \Big|_{r_D=r_{\text{ind}}} = \frac{d\widehat{p}_{D2}}{dr_D} \Big|_{r_D=r_{\text{ind}}}, \\ \lim_{\delta_D \rightarrow 0} \left(r_D \frac{d\widehat{p}_{D1}}{dr_D} \right)_{r_D=\varepsilon_D} = -\bar{q}_D(s) h_D \cos\left(\frac{n\pi z_{wD}}{h_D}\right). \end{array} \right. \quad (13)$$

式(13)为内区与外区的渗流微分方程和外边界条件,其中内区的渗流微分方程为零阶 Bessel 方程,外区的渗流微分方程为 v 阶 Bessel 方程,这两个微分方程的通解为

$$\widehat{p}_{D1} = AK_0(\varepsilon_n r_D) + BI_0(\varepsilon_n r_D), \quad (14)$$

$$\widehat{p}_{D2} = Cr_D^{(1-m)/2} K_v\left(\frac{\hat{\varepsilon}_n}{\beta} r_D^\beta\right) + Dr_D^{(1-m)/2} I_v\left(\frac{\hat{\varepsilon}_n}{\beta} r_D^\beta\right). \quad (15)$$

根据 Bessel 函数的性质和外边界条件可知 $D = 0$.再根据内区与外区界面处的压力相等、速度相等和内边界条件得到系数 A, B, C 的具体表达式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \bar{q}_D, \\ B = \frac{M_{12} r_{\text{ind}}^{(1-m)/2} \sqrt{u} K_1(\varepsilon_n r_{\text{ind}}) K_v\left(\frac{\hat{\varepsilon}_n}{\beta} r_{\text{ind}}^\beta\right) - r_{\text{ind}}^{1-m} \hat{\varepsilon}_n K_0(\varepsilon_n r_{\text{ind}}) K_{v-1}\left(\frac{\hat{\varepsilon}_n}{\beta} r_{\text{ind}}^\beta\right)}{M_{12} \varepsilon_n I_1(\varepsilon_n r_{\text{ind}}) r_{\text{ind}}^{(1-m)/2} K_v\left(\frac{\hat{\varepsilon}_n}{\beta} r_{\text{ind}}^\beta\right) + I_0(\varepsilon_n r_{\text{ind}}) r_{\text{ind}}^{1-m} \hat{\varepsilon}_n K_{v-1}\left(\frac{\hat{\varepsilon}_n}{\beta} r_{\text{ind}}^\beta\right)} \bar{q}_D, \\ C = \frac{\eta_{12} M_{12} \bar{q}_D}{r_{\text{ind}} M_{12} \varepsilon_n I_1(\sqrt{u} r_{\text{ind}}) r_{\text{ind}}^{(1-m)/2} K_v\left(\frac{\hat{\varepsilon}_n}{\beta} r_{\text{ind}}^\beta\right) + I_0(\varepsilon_n r_{\text{ind}}) r_{\text{ind}}^{1-m} \hat{\varepsilon}_n K_{v-1}\left(\frac{\hat{\varepsilon}_n}{\beta} r_{\text{ind}}^\beta\right)}, \\ n = 0, 1, 2, 3, \dots, \end{array} \right. \quad (16)$$

式中

$$\varepsilon_n = \sqrt{\frac{(n\pi)^2}{h_D^2} + u}, \quad \hat{\varepsilon}_n = \sqrt{\frac{n^2 \pi^2}{h_D^2} k_D + \tilde{u}}, \quad \beta = \frac{3-m}{2}, \quad v = \frac{1-m}{3-m}, \quad \tilde{u} = u \eta_{12} r_{\text{ind}}^{m-1}.$$

将上面解出的系数 A, B 和 C 分别代入到式(14)和(15),并结合式(12)有限余弦 Fourier 逆变换得到 Laplace 空间双区复合油藏点源解,其解的形式如下:

$$\bar{p}_{D1} = \bar{q}_D \left[K_0(\varepsilon_0 r_D) + BI_0(\varepsilon_0 r_D) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (K_0(\varepsilon_n r_D) + BI_0(\varepsilon_n r_D)) \times \cos\left(\frac{n\pi z_D}{h_D}\right) \cos\left(\frac{n\pi z_{wD}}{h_D}\right) \right]. \quad (17)$$

1.3 Newton-非 Newton 双区复合水平井

在 Newton-非 Newton 渗流双区复合点源函数解的基础上,对点源函数在 x 方向从 $-L_{hd}$ 到 L_{hd} 积分得到 Newton-非 Newton 渗流双区复合的线源解(图 2)。

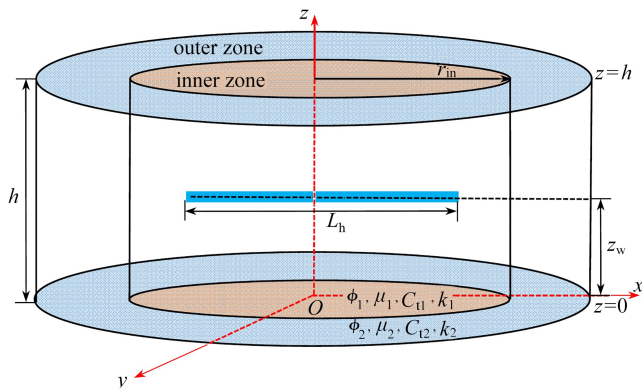


图 2 Newton-非 Newton 双区复合水平井物理模型示意图

Fig. 2 The physical model for the horizontal well in the Newtonian-non-Newtonian composite reservoir

取 $y_D = y_{wD}$ 得到水平线源解,对于单一水平井而言,总的产量等于水平井产量.因此,有以下关系表达式:

$$q = 2\tilde{q}L_h. \quad (18)$$

积分之后得到水平井压力为

$$\begin{aligned} \bar{p}_{hd} = & \frac{1}{2uL_{hd}} \left[\int_{-L_{hd}}^{L_{hd}} K_0(\varepsilon_0 \sqrt{(x_D - \alpha)^2}) d\alpha + B \int_{-L_{hd}}^{L_{hd}} I_0(\varepsilon_0 \sqrt{(x_D - \alpha)^2}) d\alpha + \right. \\ & 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(n\pi \frac{z_D}{h_D}\right) \cos\left(n\pi \frac{z_{wD}}{h_D}\right) \times \\ & \left. \int_{-L_{hd}}^{L_{hd}} [K_0(\varepsilon_n \sqrt{(x_D - \alpha)^2}) + I_0(\varepsilon_n \sqrt{(x_D - \alpha)^2})] d\alpha \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

上式中 x_D 取 0.732 代替井底压力解^[15],根据 Ozkan 等^[15]关于 Bessel 函数积分计算方法,结合试井分析中常用的 Duhamel 原理以及叠加原理,可求得 Laplace 空间中考虑井筒储集和表皮效应的无因次井底压力:

$$\bar{p}_{wD}(s) = \frac{u\bar{p}_{hd} + S}{u + C_D u^2 (u\bar{p}_{hd} + S)}. \quad (20)$$

2 典型特征曲线分析与影响因素分析

根据式(20),利用 Stehfest 数值反演^[24-25]得到实空间井底压力解.图 3 为 Newton-非 Newton 双区复合水平井井底压力与压力导数的特征曲线.根据井底压力导数曲线特征,Newton-非

Newton 渗流双区复合水平井井底压力特征曲线分为 7 个流动阶段:第①阶段为井储和表皮反应阶段,纯井储阶段井底压力和压力导数曲线重合且呈斜率为 1 的直线,井储和表皮共同作用阶段压力导数为一个明显的驼峰;第②阶段为早期径向流阶段,该阶段井底压力导数曲线呈值为 $1/(4L_{\text{hd}})$ 的水平线;第③阶段为储层流体沿井筒的线性流阶段,该阶段井底压力导数曲线呈斜率为 0.5 的直线;第④阶段为储层流体围绕水平井的椭圆流阶段,该阶段压力导数曲线呈斜率为 0.36 的直线;第⑤阶段为径向流阶段,该阶段压力导数曲线呈值为 0.5 的水平线;第⑥阶段为过渡段;第⑦阶段为非 Newton 幂率流体响应阶段,由于外区为幂率流体,流体黏度大,流体流动所消耗的压降大,因此,该阶段井底压力导数曲线上翘,且呈斜率为 $(1-m)/(3-m)$ 的直线,幂律指数 m 越小,直线斜率越大。

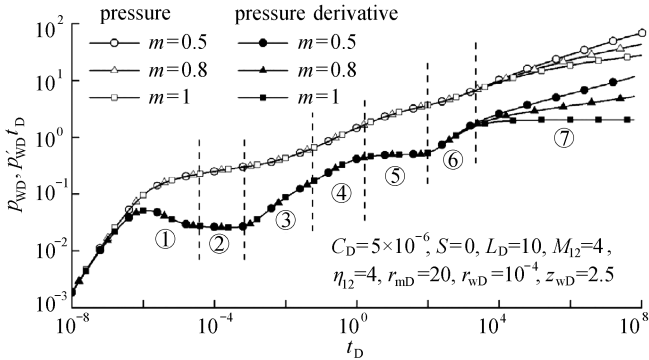


图 3 Newton-非 Newton 双区复合水平井特征曲线

Fig. 3 Wellbore pressure characteristic curves of the horizontal well in the Newtonian-non-Newtonian composite reservoir

图 4 为水平井水平段长度对井底压力与压力导数特征曲线的影响。水平段长度越长,水平段井筒附近流体从储层流入井筒所消耗的压降越小,井底压力曲线的幅度越低,井底压力导数曲线上所表现出的特征为水平段长度越长,早期径向流阶段结束的时间越早,线性流持续时间越长,早期径向流阶段压力导数曲线幅度越低。

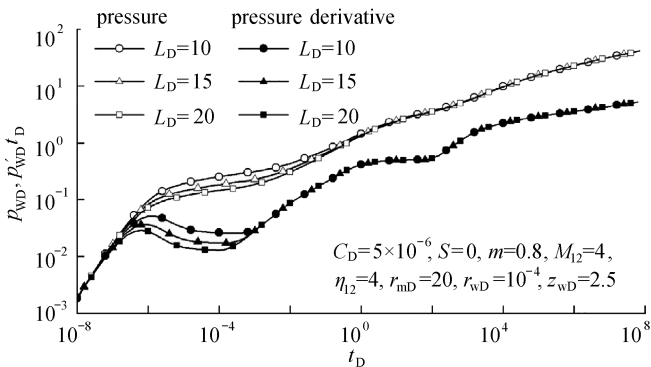


图 4 水平井水平段长度对特征曲线的影响

Fig. 4 Characteristic curves for different horizontal section lengths of horizontal wells

图 5 为水平井纵向位置对特征曲线的影响。在上下边界封闭,侧向无限大外边界条件下,水平井偏离储层纵向位移越大,早期径向流阶段结束的时间越早。在纵向上,当压力波传播到上(下)封闭边界时,由于直线边界的影响,早期径向流阶段井底压力导数曲线从 $1/(4L_{\text{hd}})$ 水

平线过渡到 $1/(2L_{hd})$ 的水平线.水平井越靠近上(下)边界,井底压力导数曲线 $1/(2L_{hd})$ 水平线特征越明显.

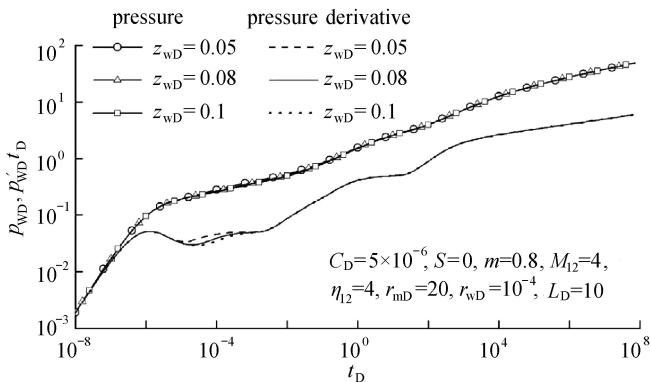
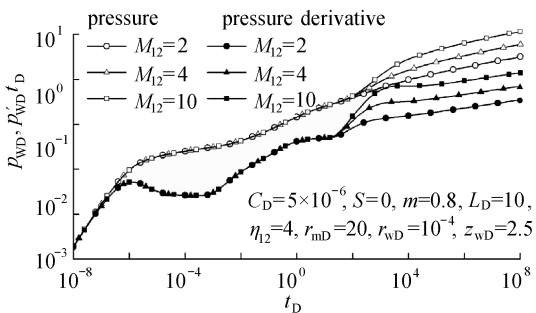


图 5 水平井纵向位置对特征曲线的影响

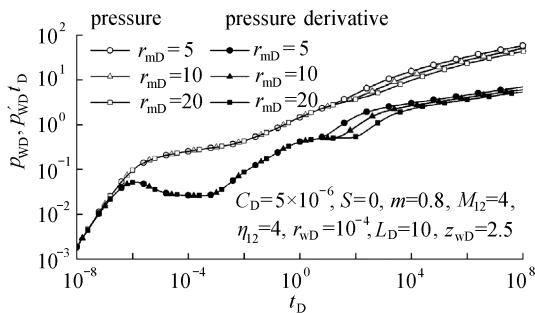
Fig. 5 Characteristic curves for different vertical positions of the horizontal well

图 6 为内外区流度比与内区半径大小对井底压力与压力导数特征曲线的影响.流度比 M_{12} 越小,说明内区流体比外区流体流度小,由于计算的压力为井底压力,所以外区流体流入井筒所消耗的压差更大.因此,内外区流度比越小,外区径向流阶段无因次井底压力导数曲线越低且呈斜率为 $(1 - m)/(3 - m)$ 的直线(图 6(a)).内区半径的大小主要影响内区径向流阶段持续时间和外区径向流阶段的开始时间.由于外区幂率流体黏度与内区半径呈反比,因此,内区半径越小,内区径向流阶段持续时间越短,井底压力导数曲线值呈 0.5 水平线持续的时间越短,外区井底压力和压力导数曲线幅度越高(图 6(b)).



(a) 内外区流度比

(a) The flow ratio of inner to outer zones



(b) 内区半径

(b) The radius of the inner zone

图 6 内区-外区流度比和内区半径对特征曲线的影响

Fig. 6 The characteristic curves for different flow ratios of inner to outer zones and radii of the inner zone

3 模型验证

为了验证本文模型,借助 Saphir 试井解释软件,建立双区复合水平井几何模型.采用 Saphir 试井解释软件建立模型基本参数为:表皮系数 $S = 0$, 井储系数 $C_D = 0$, 储层的厚度 $h = 10$ m, 内区半径 $r_{inD} = 800$ m, 内外区的流度比 $M_{12} = 4$, 内外区的导压系数比 $\eta_{12} = 4$, 井径 $r_w = 0.1$ m, 水平井水平段在纵向上位于储层的中部,即 $z_w = 5$ m.

为了方便对比,取幂律指数 $m = 1$, 本文模型简化为水平井常规双区复合模型.图 7 中本文

计算井底压力与压力导数曲线时参数的取值与 Saphir 试井解释软件中模型建立时参数取值一致。通过图 7 可知,采用本文模型计算的结果与 Saphir 试井解释软件计算的结果基本一致,但在早期,由于井储阶段经历的时间很短,所以理论曲线可以反映出历时很短的井储阶段,而用 Saphir 试井解释软件很难计算出历时很短的井储阶段。

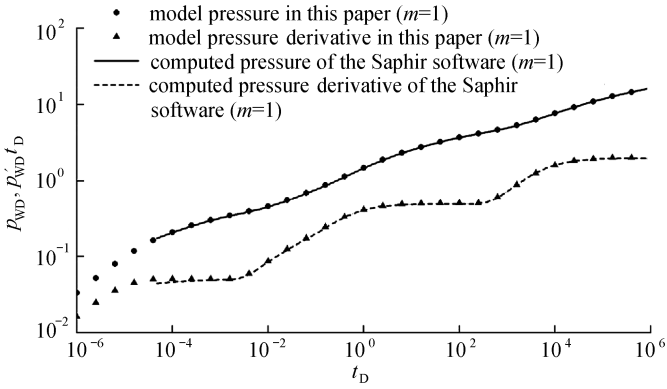


图 7 本文模型与 Saphir 软件模型结果对比

Fig. 7 Comparison of the results between the proposed model and the Saphir software model

4 结 论

1) 基于点源函数基本理论建立 Newton-非 Newton 渗流双区复合油藏水平井试井模型,通过 Laplace 变换获得 Laplace 空间解析解。与常规双区复合油藏水平井井底压力与压力导数曲线相比,Newton-非 Newton 渗流双区复合油藏井底压力主要影响晚期井底压力和压力导数曲线变化。

2) 幂律指数 m 主要影响晚期曲线变化,外区径向流阶段井底压力导数曲线呈斜率为 $(1 - m)/(3 - m)$ 的直线,幂律指数越小,直线的斜率越大。

3) 内外区流度比越大,外区径向流阶段井底压力导数曲线幅度越高;内区半径越小,内区径向流持续的时间越短。

4) 根据 Newton-非 Newton 幂律流双区复合水平井数学模型以及求解方法,结合符合上述模型实际现场数据,可对储层的参数进行解释,为 Newton-非 Newton 幂律流双区复合水平井的试井解释提供理论指导。

致谢 本文作者衷心感谢陇东学院青年基金(XYZK1807)对本文的资助。

参考文献 (References):

- [1] 王正茂, 廖广志. 中国陆上油田聚合物驱油技术适应性评价方法研究[J]. 石油学报, 2007, **28**(3): 80-84. (WANG Zhengmao, LIAO Guangzhi. Evaluation method for adaptability of polymer flooding technology in the onshore oilfield of China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, **28**(3): 80-84. (in Chinese))
- [2] 张继红, 郭鑫. 聚合物与葡北油田储层孔隙结构适应性研究[J]. 岩性油气藏, 2016, **28**(4): 101-105. (ZHANG Jihong, GUO Xin. Adaptability of polymer to reservoir pore structure in Pubei Oilfield[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, **28**(4): 101-105. (in Chinese))
- [3] 赵静. 吉林油田低渗油藏水平井开发技术[J]. 石油勘探与开发, 2011, **38**(5): 594-599. (ZHAO

- Jing. Development techniques of horizontal wells in low permeability reservoirs, Jilin Oilfield [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, **38**(5): 594-599.(in Chinese)
- [4] 李传亮, 朱苏阳, 柴改建, 等. 直井与水平井的产能对比[J]. 岩性油气藏, 2018, **30**(2): 1-5. (LI Chuanliang, ZHU Suyang, CHAI Gaijian, et al. Comparison of productivity of vertical wells with horizontal wells[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, **30**(2): 1-5.(in Chinese))
- [5] 李传亮, 朱苏阳. 水平井的表皮因子[J]. 岩性油气藏, 2014, **26**(4): 16-21.(LI Chuanliang, ZHU Suyang. Skin factor of horizontal wells[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2014, **26**(4): 16-21.(in Chinese))
- [6] IKOKU C U, RAMEY 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*, 1980, **20**(1): 25-38.
- [7] VONGVUTHIPORNCHA S, RAGHAVAN R. Well test analysis of data dominated by storage and skin: non-Newtonian power-law fluids[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 1987, **2**(4): 618-628.
- [8] 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): 82-86.(SONG Kaoping, WANG Lei, JI Bingyu. Well test analysis of a compound reservoir with non-Newtonian and Newtonian fluid flow[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1996, **17**(1): 82-86.(in Chinese))
- [9] 梁光跃, 廖新维, 万光芬, 等. 非牛顿幂律流体试井模型的有效半径解及其曲线特征[J]. 科技导报, 2010, **28**(13): 58-61.(LIANG Guangyue, LIAO Xinwei, WAN Guangfen, et al. Effective wellbore radius and typical curve characteristics of well test analysis of non-Newtonian power-law fluids[J]. *Science and Technology Review*, 2010, **28**(13): 58-61.(in Chinese))
- [10] 李元媛, 蔡睿贤. 非牛顿幂律流体试井模型的一种简明解析解[J]. 科技导报, 2010, **28**(18): 32-35.(LI Yuanyuan, CAI Ruixian. A concise analytical solutions of well test analysis: non-Newtonian power-law fluids[J]. *Science and Technology Review*, 2010, **28**(18): 32-35.(in Chinese))
- [11] 郭辉, 程时清, 于海洋, 等. 聚合物驱复合模型试井分析方法[J]. 断块油气田, 2014, **21**(4): 504-508.(GUO Hui, CHENG Shiqing, YU Haiyang, et al. Well test analysis method of composite model by polymer flooding[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2014, **21**(4): 504-508.(in Chinese))
- [12] 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 reservoirs with polymer flooding[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2012, **40**(4): 110-113.(in Chinese))
- [13] 姚军, 吴明录, 胡航. 碱-聚合物复合驱油藏流线数值试井解释模型及其应用[J]. 石油学报, 2008, **29**(6): 894-898, 902.(YAO Jun, WU Minglu, HU Hang. Streamline numerical well-testing interpretation model for alkaline-polymer combination flooding reservoirs and its application[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, **29**(6): 894-898, 902.(in Chinese))
- [14] 帅媛媛, 王晓冬, 孙挺, 等. 非牛顿幂律流体水平井产能分析方法[J]. 岩性油气藏, 2007, **19**(3): 123-125.(SHUAI Yuanyuan, WANG Xiaodong, SUN Ting, et al. Productivity analysis of horizontal well with non-Newtonian power law fluid[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, **19**(3): 123-125.(in Chinese))
- [15] OZKAN E, RAGHAVAN R. New solutions for well-test-analysis problems, part 1: analytical considerations[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 1991, **6**(3): 359-368.

- [16] GRINGARTEN A C, RAMEY J R. The use of source and Green's functions in solving unsteady-flow problems in reservoirs[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1973, **13**(5): 285-296.
- [17] CHEN C C, RAGHAZAN R. Modeling a fractured well in a composite reservoir[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 1995, **10**(4): 241-246.
- [18] ZHAO Y L, ZHANG L H, LIU Y H, et al. Transient pressure analysis of fractured well in bizonal gas reservoirs[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **524**: 89-99.
- [19] 石国新, 聂仁仕, 路建国, 等. 2 区复合油藏水平井试井模型与实例解释[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, **34**(5): 99-106.(SHI Guoxin, NIE Renshi, LU Jianguo, et al. Well test model of horizontal well in 2-zoned composite reservoir and example interpretation[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2012, **34**(5): 99-106. (in Chinese))
- [20] 王晓冬, 刘慈群. 复合油藏中水平井压力分析[J]. 石油学报, 1997, **18**(2): 72-77.(WANG Xiaodong, LIU Ciqun. Pressure analysis for horizontal wells in composite reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1997, **18**(2): 72-77. (in Chinese))
- [21] 姜瑞忠, 孙召勃, 王世朝, 等. 穿透内区的复合油藏水平井压力分析新方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, **34**(2): 81-85.(JIANG Ruizhong, SUN Zhaobo, WANG Shichao, et al. A new pressure analysis method for the horizontal well penetrating beyond the inner region in the composite oil reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2015, **34**(2): 81-85. (in Chinese))
- [22] 吴明录, 赵高龙, 姚军, 等. 稠油热采三区复合油藏水平井试井解释模型及压力响应特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, **35**(6): 117-122.(WU Minglu, ZHAO Gaolong, YAO Jun, et al. Well test interpreting model and pressure response characteristics of the horizontal well in thermally recovered three-block composite heavy oil reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2016, **35**(6): 117-122. (in Chinese))
- [23] 刘启国, 徐有杰, 刘义成, 等. 夹角断层多段压裂水平井试井求解新方法[J]. 应用数学和力学, 2018, **39**(5): 558-567.(LIU Qiguo, XU Youjie, LIU Yicheng, et al. A new well test analysis method for multi-stage fractured horizontal wells with angle faults[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, **39**(5): 558-567. (in Chinese))
- [24] ZAKIAN V. Numerical inversion of Laplace transform[J]. *Electronics Letters*, 1969, **5**(6): 120-121.
- [25] OZKAN E, RAGHAVAN R. New solutions for well-test-analysis problems, part 2: computational considerations and applications[J]. *Society of Petroleum Engineers*, 1991, **6**(3): 369-378.

Transient Pressure Analysis of Bi-Zone Composite Horizontal Wells With Non-Newtonian and Newtonian Power-Law Fluid Flow

JI Anzhao

(School of Energy Engineering, Longdong University,
Qingyang, Gansu 745100, P.R.China)

Abstract: Polymer flooding plays an important role in enhancing oil recovery and the horizontal well has great advantages in the development of thin reservoirs. Based on the physical process of polymer flooding, a well-test mathematic model for horizontal wells in Newtonian-non-Newtonian bi-zone composite reservoirs was established with the basic theory for point source functions. The analytical solution of the well-test model for horizontal wells was obtained through the Laplace integral transform and the Fourier finite cosine integral transform. The well-test curves of the pressure and the pressure derivative were got with the Stehfest numerical inversion algorithm. The results show that, the smaller the power law index is, the steeper the curves of the pressure and the pressure derivative will be in the outer zone, like a line with a slope of $(1 - m)/(3 - m)$. When the power law index is 1, the model can be reduced to the traditional model for horizontal wells in bi-zone reservoirs. The longer the horizontal section of the horizontal well is, the earlier the radial flow stage will end. The larger the flow ratio is and the smaller the inner radius is, the higher the positions of the pressure and the pressure derivative curves will be in the outer zone, where the pressure derivative curve keeps as a line with a slope of $(1 - m)/(3 - m)$.

Key words: polymer flooding; power law index; Laplace integral transform; point source function; horizontal well

引用本文/Cite this paper:

姬安召. Newton-非 Newton 幂律流双区复合水平井压力动态特征分析[J]. 应用数学和力学, 2019, **40**(5): 562-573.

JI Anzhao. Transient pressure analysis of bi-zone composite horizontal wells with non-Newtonian and Newtonian power-law fluid flow[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2019, **40**(5): 562-573.