

# 四重介质稠油幂律流体试井模型研究

徐有杰,刘启国,齐生芝,刘贵红,刘丹

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500)

**摘要:**针对溶蚀缝比较发育的碳酸盐岩稠油油藏来讲,其溶蚀缝和裂缝具有不同的渗流机理,常规稠油试井模型不能满足四重介质稠油油藏试井解释的需求。因此,基于裂缝、溶蚀缝、溶蚀孔和基质组成的四重介质稠油油藏,将稠油视为幂律流体,依据渗流力学基本原理建立四重介质试井解释数学模型,利用 Laplace 变换和 Stehfest 数值反演的方法进行求解,进而绘制三种不同外边界条件下的试井分析理论曲线。研究表明:四重介质稠油油藏压力导数曲线径向流阶段将出现宽度与深度不同的3个“凹子”,并且在径向流阶段压力导数双对数曲线呈斜率为 $(1-n)/(3-n)$ 的直线;幂率指数越小,径向流阶段压力导数曲线斜率越大;弹性储容比越小,“凹子”就越深越宽;窜流系数越大,“凹子”出现的时间就越早。决定四重介质油藏试井曲线特征的参数较多,曲线对参数的变化比较敏感。该模型可以指导四重介质稠油油藏试井资料的解释与研究。

**关键词:**稠油;幂律流体;碳酸盐岩;试井解释;四重介质

中图分类号:TE331.1

文献标识码:A

## Research on well test model of power law fluid in quadruple media heavy oil reservoir

Xu Youjie, Liu Qiguo, Qi Shengzhi, Liu Guihong and Liu Dan

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

**Abstract:** In the case of the carbonate heavy oil reservoir with the well developed dissolution fracture, the percolation mechanism of dissolution fracture is different from that of fracture. The conventional well test models can not meet the needs of the well test analysis. In the heavy oil reservoir with quadruple media. According to the basic principle of the seepage flow mechanics, the quadruple-media well test mathematical model based on the fracture, dissolution fracture, dissolution pore and matrix is established in heavy oil treating as the power-law fluid. By means of the Laplace transformation and Stehfest numerical inversion, we obtained the real space solution, and drew the well test curves of three different boundary conditions. The results show that three concaves with different depths and widths occur in the pressure derivative curves of the quadruple-media reservoir and the slope of pressure derivative double-log curve is  $(1-n)/(3-n)$  in the stage of radial flow. The smaller the power-law index is, the greater the slope of pressure-derivative curve of radial flow will be. The smaller the storativity ratio is, the wider the concave will be, furthermore, the greater the interporosity flow coefficient is, the earlier the concaves will appear. Compared to the triple-media, the change of the pressure-derivative curve affected by many parameters is more sensitive in the heavy oil reservoir with quadruple-media. The model is used to guide the interpretation and study of the well test data.

**Key words:** heavy oil, power law fluid, carbonate rock, well test analysis, quadruple-media

针对碳酸盐岩油藏而言,由于受成岩后生作用的影响,地层中不仅存在着天然裂缝,还存在一些发育的溶蚀缝和溶蚀孔<sup>[1]</sup>。试井分析作为油气藏动态监测和地层参数求取的重要手段,国内外许多学者对碳酸盐岩油藏试井解释模型已经有了一定的研究

并进行了实际应用。针对均质油藏,国外学者 Ikoku 和 Ramey<sup>[2-3]</sup>、Odeh<sup>[4]</sup>以及 Vongvuthipornchai<sup>[5]</sup>等人对于幂律流体在地层中的渗流进行了大量的研究并建立了相应的试井解释数学模型,通过对该试井模型曲线进行敏感性分析进而进行了实际应用;国内学者

收稿日期:2017-04-28。

第一作者简介:徐有杰(1990—),男,在读硕士研究生,油气田开发及试井分析研究。

王雅茹<sup>[6]</sup>、杨学文<sup>[7]</sup>、杜殿发<sup>[8]</sup>等人也对幂律流体的试井解释做了大量的研究。针对双重介质以及双区复合油藏,我国学者栾志安<sup>[9,10]</sup>、宋考平<sup>[11,12]</sup>等人对幂律流体的试井解释模型进行了进一步研究。国外学者Nie<sup>[13]</sup>和我国学者赵玉龙<sup>[14]</sup>等人对三重介质油藏非牛顿幂律型流体做了大量的研究;贾永禄<sup>[15]</sup>等人建立了四重介质油藏试井解释模型并进行了敏感性分析。

针对我国部分地区碳酸盐岩稠油油藏中溶蚀缝发育并且分布规律复杂,以往的研究都是基于复合油藏的不断延伸,没有考虑溶蚀缝对试井曲线的影响。因此,本文在前人研究的基础上,以四重介质为研究对象,将稠油视为非牛顿幂律流体,黏度服从Ostwald-De Waele 幂律流体模型<sup>[16,17]</sup>,建立了四重介质非牛顿幂律流体试井解释数学模型,利用Laplace变换和Stehfest<sup>[18,19]</sup>数值反演算法绘制了三种不同外边界条件下的理论图版并进行了敏感性分析。该模型适用于稠油油藏的试井解释,为更清楚地认识碳酸盐岩稠油油藏特征提供了理论指导和科学依据。

## 1 试井数学模型建立与求解

### 1.1 试井数学模型的建立

地层由天然裂缝、溶蚀缝、溶蚀孔和基质组成,其中天然裂缝向井筒供液,溶蚀缝、溶蚀孔和基质内的流体向裂缝发生窜流,模型示意图如图1所示。其假设条件如下:

- (a) 油层为水平、等厚地层,渗流符合达西定律,等温渗流;
- (b) 地层流体和地层岩石微可压缩,并且为单相流体;
- (c) 忽略重力和毛细力的影响;
- (d) 投产前地层各处压力为原始地层压力;
- (e) 流体黏度服从Ostwald-De Waele 幂律流体模型,根据文献[6]得到幂律流体的视黏度和特征黏度与无因次半径和幂率指数的关系可以用式(1)表示:

$$\frac{\mu_a}{\mu} = r_D^{1-n} \quad (1)$$

基于上述假设条件,建立考虑井筒储存效应和表皮效应影响的四重介质稠油油藏试井解释数学模型,通过无因次化处理和拉普拉斯变换得到渗流微

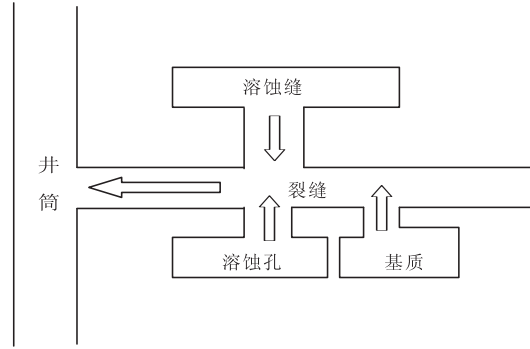


图1 四重介质渗流示意图

Fig. 1 Seepage schematic diagram of quadruple-media reservoir

分方程和边界条件如下:

1) 渗流微分方程

裂缝渗流微分方程:

$$\nabla^2(r_D^n \bar{p}_m) + [\lambda_{vf}(\bar{p}_{vD} - \bar{p}_m) + \lambda_{vt}(\bar{p}_{tD} - \bar{p}_m) + \lambda_{mf}(\bar{p}_{mD} - \bar{p}_m)] = \omega_f z \bar{p}_m \quad (2)$$

溶蚀孔渗流微分方程:

$$-\lambda_{vf}(\bar{p}_{vD} - \bar{p}_m) = \omega_v z \bar{p}_{vD} \quad (3)$$

溶蚀缝渗流微分方程:

$$-\lambda_{vt}(\bar{p}_{tD} - \bar{p}_m) = \omega_t z \bar{p}_{tD} \quad (4)$$

基质渗流微分方程:

$$-\lambda_{mf}(\bar{p}_{mD} - \bar{p}_m) = \omega_m z \bar{p}_{mD} \quad (5)$$

2) 内边界条件

井筒条件:

$$C_D z \bar{p}_{wD} - \left( r_D \frac{\partial \bar{p}_m}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} = \frac{1}{z} \quad (6)$$

表皮条件:

$$\bar{p}_{wD} = \bar{p}_m - S r_D \left. \frac{\partial \bar{p}_m}{\partial r_D} \right|_{r_D=1} \quad (7)$$

3) 外边界条件

无限大外边界:

$$\lim_{r_D \rightarrow \infty} \bar{p}_m = 0 \quad (8)$$

圆形封闭外边界:

$$\left( \frac{\partial \bar{p}_m}{\partial r_D} \right)_{r_D=r_{eD}} = 0 \quad (9)$$

圆形定压外边界:

$$\bar{p}_m \Big|_{r_D=r_{eD}} = 0 \quad (10)$$

无因次变量定义:

$$p_{jD} = \frac{K_f h}{1.842 \times 10^{-3} Q \mu B} (p_i - p_j) \quad (j = f, v, t, m)$$

$$t_{jD} = \frac{K_f t}{\mu r_w^2 (\phi C_t)_{(m+f+t+v)}} \quad C_D = \frac{C}{2\pi h \phi C_t r_w^2}$$

1.2 模型求解

联立式(2)~(5)可得无因次的综合渗流微分方程为:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left( r_D^n \frac{\partial \bar{p}_D}{\partial r_D} \right) = f(z) \bar{p}_D \quad (11)$$

其中:

$$f(z) = \lambda_{vf} \frac{\omega_v z}{\omega_v z + \lambda_{vf}} + \lambda_{if} \frac{\omega_i z}{\omega_i z + \lambda_{if}} + \lambda_{mf} \frac{\omega_m z}{\omega_m z + \lambda_{mf}} + z \omega_f$$

方程(11)的通解为:

$$\bar{p}_D = r_D^{\frac{1-n}{2}} \left[ A_1 I_\nu \left( \frac{\sqrt{f(z)}}{\beta} r_D^\beta \right) + A_2 K_\nu \left( \frac{\sqrt{f(z)}}{\beta} r_D^\beta \right) \right] \quad (12)$$

联立内、外边界条件写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/z \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中:

$$a_{11} = \alpha I_\nu \left( \frac{\sqrt{f(z)}}{\beta} \right) + K_\nu \left( \frac{\sqrt{f(z)}}{\beta} \right) + \sqrt{f(z)} S \left[ K_{\nu-1} \left( \frac{\sqrt{f(z)}}{\beta} \right) - \alpha I_{\nu-1} \left( \frac{\sqrt{f(z)}}{\beta} \right) \right]$$

$$a_{21} = \sqrt{f(z)} \left[ K_{\nu-1} \left( \frac{\sqrt{f(z)}}{\beta} \right) - \alpha I_{\nu-1} \left( \frac{\sqrt{f(z)}}{\beta} \right) \right]$$

$$a_{12} = -1 \quad a_{22} = C_D z$$

1) 无穷大边界

$$\alpha = 0$$

2) 圆形封闭外边界

$$\alpha = \frac{K_{\nu-1} \left( \frac{\sqrt{f(z)}}{\beta} r_{eb}^\beta \right)}{I_{\nu-1} \left( \frac{\sqrt{f(z)}}{\beta} r_{eb}^\beta \right)}$$

3) 圆形定压外边界

$$\alpha = \frac{-K_\nu \left( \frac{\sqrt{f(z)}}{\beta} r_{eb}^\beta \right)}{I_\nu \left( \frac{\sqrt{f(z)}}{\beta} r_{eb}^\beta \right)}$$

2 特征曲线及敏感性分析

对于不同的边界,利用克莱姆法则求解矩阵方程(13),可得拉氏空间无因次井底压力;利用Stehfest

数值反演方法,可以得到三种不同外边界条件下的无因次压力和压力导数与无因次时间的双对数关系曲线图<sup>[20,21]</sup>。

2.1 理论曲线特征分析

图2为碳酸盐岩四重介质稠油油藏井底压力响应典型特征曲线。该理论曲线可以划分为九个流动阶段:A阶段为纯井储效应阶段,其压力及压力导数曲线重合并呈斜率为1的直线;B阶段为井储和表皮效应影响阶段,压力导数上表现为明显的“驼峰”;C阶段为裂缝径向流阶段;D阶段为基质向裂缝窜流阶段,压力导数曲线呈明显“凹子”形状;E阶段为溶蚀缝径向流阶段;F阶段为溶蚀缝向裂缝窜流阶段;G阶段为溶蚀孔径向流阶段;H阶段为溶蚀孔流体向裂缝窜流阶段。在介质径向流阶段压力导数曲线呈(1-n)/(3-n)斜率直线,但是由于参数之间的相互影响,介质径向流阶段压力导数曲线的(1-n)/(3-n)斜率直线表现不是很明显。I、J、K阶段为外边界反映阶段,其中I为无穷大外边界,其压力导数曲线特征为斜率为(1-n)/(3-n)的直线;J为圆形封闭外边界,压力导数曲线特征为斜率为1的直线;K为圆形定压外边界,压力导数曲线特征为“下掉”的曲线。

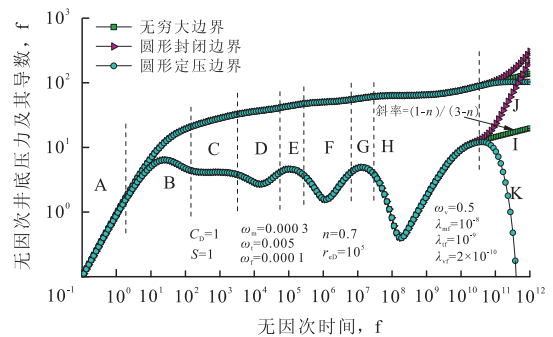


图2 四重介质稠油油藏试井模型井底压力响应典型特征曲线

Fig. 2 Pressure response curves of bottom hole in quadruple-media heavy oil reservoir

2.2 幂律指数的影响

幂律流体是工程上经常碰到的流体,相对于牛顿流体,非牛顿幂律流体流动困难,压力波传播速度慢,压力和压力导数曲线上翘。幂律指数n越小,流体的视黏度越大,流体流动越困难,双对数坐标中介质径向流阶段压力导数曲线斜率越大,反之亦然。因此,实际稠油试井解释中根据直线的斜率可以计

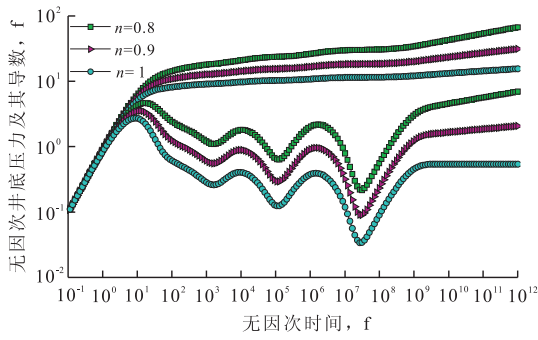


图3 幂律指数影响曲线

Fig. 3 Well test curves affected by power law index

算出幂律指数的大小(图3)。

### 2.3 窜流系数的影响

窜流系数是指基质、溶蚀缝和溶蚀孔中的流体向裂缝发生窜流能力大小的物理量。窜流系数影响压力导数曲线“凹子”出现时间的早晚,窜流系数越大,“凹子”出现的时间越早;基质向裂缝的窜流系数主要影响第一个“凹子”出现的时间早晚,窜流系数越大,第一个“凹子”出现的时间越早(图4);溶蚀缝向裂缝的窜流系数主要影响第二个“凹子”出现时间

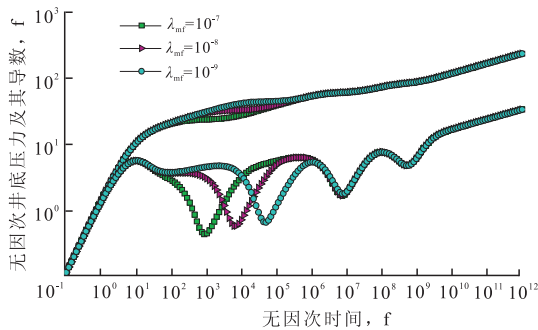


图4 基质窜流系数影响曲线

Fig. 4 Well test curves affected by interporosity flow parameter of matrix

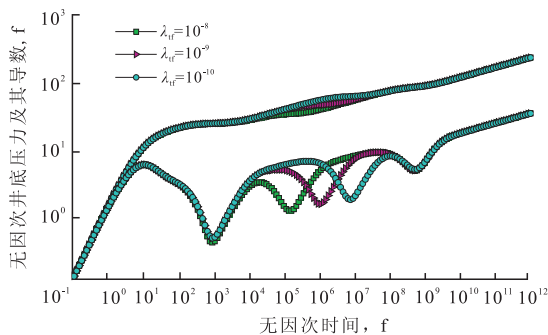


图5 溶蚀缝窜流系数影响曲线

Fig. 5 Well test curves affected by interporosity flow parameter of dissolution fracture

的早晚,窜流系数越大,第二个“凹子”出现的时间越早(图5);溶蚀孔向裂缝的窜流系数主要影响第三个“凹子”出现时间的早晚,窜流系数越大,第三个“凹子”出现的时间越早(图6)。只有当介质与介质之间的窜流系数取到合理的值时它们才不会相互影响,如果某一介质的窜流系数太大或太小都会影响压力导数曲线某些“凹子”的形态变化(图6)。

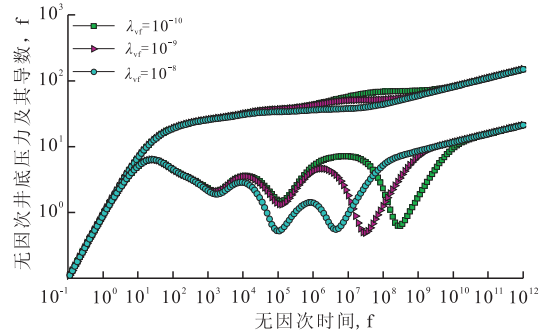


图6 溶蚀孔窜流系数影响曲线

Fig. 6 Well test curves affected by interporosity flow parameter of dissolution pore

### 2.4 弹性储容比的影响

弹性储容比是描述基质、溶蚀缝和溶蚀孔的弹性储存能力大小的物理量。弹性储容比越大,说明它们的弹性储集性能越好,在压力导数曲线上表现为“凹子”越浅、越窄。基质弹性储容比越大,第一个“凹子”就越浅、越窄;溶蚀缝的弹性储容比越大,第二个“凹子”就越浅、越窄,而第三个“凹子”却越浅、越窄(图7);溶蚀孔的弹性储容比越大,第三个“凹子”就越浅、越窄(图8)。由于溶蚀缝、溶蚀孔、基质都与裂缝连通,所以每一介质弹性储容比的变化不仅会影响其本身“凹子”的宽度与深度,还会影响另一介质“凹子”的宽度与深度,总体来说,介质弹性储

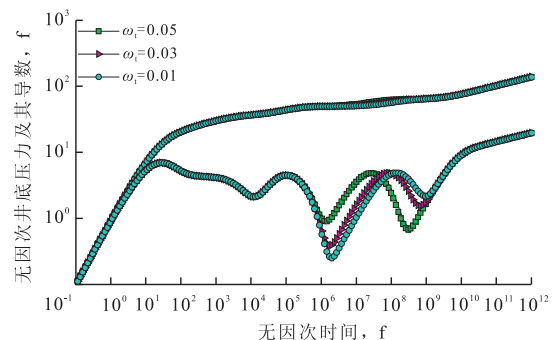


图7 溶蚀缝弹性储容比影响曲线

Fig. 7 Well test curves affected by storativity ratio of dissolution fracture

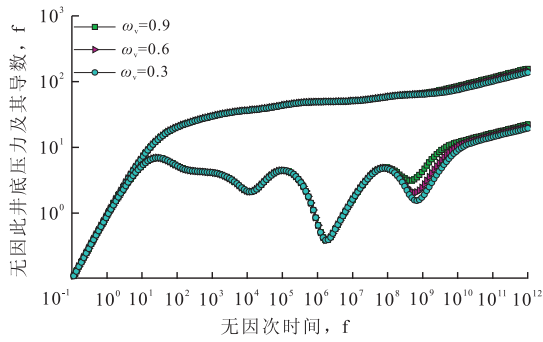


图8 溶蚀孔弹性储容比影响曲线

Fig. 8 Well test curves affected by storativity ratio of dissolution pore

容比越大,“凹子”的宽度越窄,深度越浅,相邻后一个“凹子”的宽度反而越宽,深度越深。

### 3 结论

1) 建立并求解了碳酸盐岩四重介质稠油幂律流体试井模型,其压力导数曲线在双对数坐标中呈现出三个宽度与深度不同的“凹子”,介质径向流阶段压力导数曲线呈斜率为 $(1-n)/(3-n)$ 的直线。

2) 幂律指数越小,介质径向流阶段压力导数曲线斜率越大。

3) 弹性储容比越大,“凹子”就越浅、越窄;窜流系数越大,“凹子”出现的时间越早;四重介质物性参数的变化对压力导数曲线的影响比三重介质敏感。

4) 影响四重介质碳酸盐岩稠油油藏试井曲线的物性参数比较多,一个参数的变化会影响压力导数曲线多个特征的变化,只有各个参数取的十分恰当,其每个阶段的曲线特征才会更好地表现出来。

#### 符号说明

$B$ 为体积系数,  $m^3/(\text{标})m^3$ ;  $C$ 为井储系数,  $m^3/\text{MPa}$ ;  $Q$ 为地面储量,  $m^3/d$ ;  $h$ 为储层厚度,  $m$ ;  $S$ 为表皮系数, 无因次;  $r_e$ 为外边界半径,  $m$ ;  $r_w$ 为井筒半径,  $m$ ;  $r$ 为储层某处到井筒中心线的距离,  $m$ ;  $n$ 为幂律指数, 无因次;  $p_i$ 为原始地层压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_w$ 为井底压力,  $\text{MPa}$ ;  $K_f$ 为介质渗透率,  $10^{-3}\mu\text{m}^2$ ;  $C_{ij}$ 为介质压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $p_j$ 为介质储层压力( $j=f, v, t, m$ );  $f$ 为裂缝,  $v$ 为溶蚀孔,  $t$ 为溶蚀缝,  $m$ 为基质),  $\text{MPa}$ ;  $\varphi_j$ 为介质孔隙度, 无因次;  $\mu_e$ 为幂律流体视黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $\mu^*$ 为幂律流体表观黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $r_{eD}$ 为无因次外边界半径;  $r_{wD}$ 为无因次井筒半径;  $C_{Dj}$ 为无因次井储系数;  $p_{wD}$ 为无因次井底压力;  $p_{jD}$ 为无因次储层压力( $j=f, v, t, m$ );  $f$ 为裂缝,  $v$ 为溶蚀孔,  $t$ 为溶蚀缝,  $m$ 为基质);  $K_0(x), I_0(x)$ 分别为  $V$  阶的第二类和第一类修正贝塞尔函数; 窜流系数:  $\lambda_{ij} = \alpha_j \frac{K_j}{K_f} r_w^2$ , ( $i=f, v, t, m$ ), 无因次; 弹性储容比:  $\omega_j = (\varphi C_{ij}) / (\varphi C_{i(m+f+v+t)})$ , ( $j=f, v, t, m$ ), 无因次; 下标  $D$  表示无因次。

#### 参考文献

- [1] 曾桃. 缝洞型碳酸盐岩油藏渗流理论及不稳定试井分析方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2006: 63-64.
- [2] 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.
- [3] Ikoku C U, Ramey Jr H J. Transient flow of non-Newtonian power-law fluids in porous media[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1979, 19(3): 164-174.
- [4] Odeh A S, Yang H T. Flow of non-Newtonian power-law fluids through porous media[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1979, 19(3): 155-163.
- [5] Vongvuthipornchai S, Raghavan R. Well test analysis of data dominated by storage and skin: non-Newtonian power-law fluids[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1987, 2(4): 618-628.
- [6] 王雅茹, 王晓冬, 石在虹, 等. 在封闭地层中非牛顿幂律流体压降特征分析[J]. 水动力学研究与进展, 2009, 24(1): 36-42.
- [7] 杨学文, 郭建国. 稠油油藏试井技术理论研究及应用[J]. 新疆石油学院学报, 2002, 14(4): 36-39.
- [8] 杜殿发, 李冬冬, 石达友, 等. 稠油油藏试井理论研究[J]. 计算物理, 2011, 28(3): 385-395.
- [9] 栾志安. 稠油油田试井分析方法[J]. 石油学报, 1988, 9(2): 70-79.
- [10] 栾志安. 双重介质非牛顿液不稳定渗流解析解[J]. 石油学报, 1981, 2(4): 79-83.
- [11] 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.
- [12] 宋考平, 祝俊峰, 刘泽俊, 等. 多区复合油藏非牛顿幂律流体试井解释[J]. 石油学报, 1997, 18(2): 78-83.
- [13] Nie R, Meng Y, Jia Y, et al. Unsteady inter-porosity flow modeling for a multiple media reservoirs[J]. Acta Geophysica, 2012, 60(1): 232-259.
- [14] 赵玉龙, 张烈辉, 青胜兰. 三重介质油藏非牛顿幂律流体试井模型与典型曲线分析[J]. 水动力学研究与进展, 2010, 25(2): 254-260.
- [15] 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.
- [16] Gogarty W B. Mobility control with polymer solutions[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1967, 7(2): 161-173.
- [17] Mungan N. Shear viscosity of ionic polyacrylamide solution[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1972, 12(6): 469-473.
- [18] Stehfest H. Numerical inversion of Laplace transform[J]. Communication of the ACM, 1970, 13(1): 47-49.
- [19] 何家欢, 张苏, 刘生国, 等. 关于 Laplace 数值反演 Stehfest 算法适用性的一点思考[J]. 油气井测试, 2015, 24(4): 18-20.
- [20] 孔祥言. 高等渗流力学第2版[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 96.
- [21] 李晓平, 张烈辉, 刘启国. 试井分析方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 6-27.

(编辑 杨友胜)