

聚合物驱有限导流压裂井压力动态特征分析

徐有杰¹, 刘启国¹, 王庆², 刘文涛³

1. 西南石油大学石油与天然气工程学院 四川成都 610500

2. 中国石油西南油气田分公司通信与信息技术中心 四川成都 610041

3. 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院 新疆克拉玛依 834000

通讯作者: Email: xuyoujie920309@163.com

项目支持: 国家科技重大专项“低渗-致密油藏高效提高采收率新技术”(2017ZX05009-004)、国家科技重大专项“深层碳酸盐岩气藏高效开发技术”(2016ZX05015-003)

引用: 徐有杰, 刘启国, 王庆, 等. 聚合物驱有限导流压裂井压力动态特征分析[J]. 油气井测试, 2019, 28(1): 7-13.

Cite: XU Youjie, LIU Qiguo, WANG Qing, et al. Pressure behaviors of polymer flooding finite-conductivity fracturing wells [J]. Well Testing, 2019, 28(1): 7-13.

摘要 为了分析聚合物驱油藏压力动态特征, 根据聚合物驱油过程, 建立牛顿-非牛顿双区复合直井压裂井试井解释数学模型。基于点源函数基本理论, 利用 Laplace 积分变换和有限余弦傅立叶变换求得无限导流压裂井拉氏空间解析解, 结合裂缝导流能力函数求得牛顿-非牛顿双区复合油藏有限导流垂直裂缝井试井解释数学模型的解析解, 通过 Stehfest 数值反演计算并绘制典型无因次井底压力、压力导数特征曲线。研究表明, 幂律指数对井底压力变化具有一定的影响, 幂律指数小, 非牛顿区压力、压力导数曲线上翘越明显, 且呈斜率为 $(1-m)/(3-m)$ 的直线; 导流能力越大, 双线性流阶段特征越不明显; 牛顿-非牛顿区流度比越大、牛顿区半径越小, 非牛顿区压力和压力导数曲线位置越高。该模型对聚合物驱试井资料解释和聚驱效果评价具有重要作用。

关键词 聚合物驱; 压裂井; 试井; 压力动态特征; 有限导流; 导流能力; 点源函数; 特征曲线**中图分类号**: TE331.1 **文献标识码**: A **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.01.002

Pressure behaviors of polymer flooding finite-conductivity fracturing wells

XU Youjie¹, LIU Qiguo¹, WANG Qing², LIU Wentao³

1. School of Oil & Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

2. Communication and Information Technology Center, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan 610041, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Yumen Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: In order to analyze the pressure behaviors of polymer flooding reservoir, a mathematical well testing interpretation model of Newton-non-Newtonian composite fracturing vertical well was established based on polymer flooding process. According to the basic theory of point source function, the Laplace space analytic solution of finite-conductivity fracturing wells was obtained by using Laplace integral transformation and finite cosine Fourier transform; on this basis, the analytic solution of the mathematical well testing interpretation model of the finite-conductivity fracturing vertical wells in Newton-non-Newtonian composite reservoir was derived by combining the fracture conductivity function. Finally, the typical dimensionless bottomhole pressure and pressure derivative characteristic curves were calculated and plotted by Stehfest numerical inversion. The results show that the power law exponent has a certain influence on the change of the bottomhole pressure. The smaller the power law exponent, the more obvious the upper warp of the non-Newtonian pressure and pressure derivative curves, and the curves are straight lines with a slope of $(1-n)/(3-n)$. The greater the conductivity, the less obvious the characteristics in the bilinear flow stage. The higher the mobility ratio in the Newton-Non-Newtonian zone and the smaller the radius of Newton zone, the higher the position on the non-Newtonian pressure and pressure derivative curves. The model plays an important role in the interpretation of polymer flooding testing data and the effect evaluation of polymer flooding.

Keywords: polymer flooding; fracturing well; well testing; pressure behaviors; finite-conductivity; conductivity; point source function; characteristic curve

聚合物驱作为提高原油采收率的重要手段,对于提高单井产量具有重要的作用,通常聚合物被视为非牛顿幂律流体。在聚合物驱油过程中,由于聚合物还没波及到采油井周围,因此,在井筒周围就形成牛顿-非牛顿双区复合模型。针对非牛顿幂律流体的试井模型研究,国外学者 Ikoku 等^[1]研究了非牛顿幂律流体在多孔介质中的不稳定渗流特征。Vongvuthipornchai S.^[2]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拉氏空间解析解。针对聚驱油藏压力动态特征的研究,国内学者宋考平等^[3]进一步研究了3种外边界条件下非牛顿-牛顿流体复合试井模型,求得了拉氏空间中的解,做出了理论图版。梁光跃等^[4]通过引入有效半径等无量纲量定义,求得形式更为简洁的3种外边界条件下均质试井模型的有效半径解,并得到了一系列简化式,绘制了相应的典型曲线。李元媛等^[5]使用加法分离变量法,求解尚未有解析解的非定常非线性试井方程,导出了一系列简明(无特殊函数和无穷级数)的解析解。郭辉等^[6]和程时清等^[7]考虑地层中聚合物溶液存在剪切、扩散、对流等物化作用,建立了聚合物驱牛顿-非牛顿及非牛顿-牛顿油藏试井复合模型,采用有限差分算法对模型进行数值求解,绘制压力和压力导数双对数曲线图版。姚军等^[8]分别建立了碱-聚合物复合驱油藏流线数值试井解释模型,形成了适用于中、高含水期碱-聚合物复合驱油藏试井解释新方法。贾智淳等^[9]和董晓芳^[10]基于聚合物数值试井对聚合物井底压力进行了研究。但是,上述模型的建立都是基于直井的压力动态分析,对于压裂井没有展开深入的研究。针对有限导流压裂井的动态分析,Ozkan 等^[11]基于 Gringarten 等^[12]实空间点源函数的研究,成功的将实空间点源解转化到拉氏空间,对于考虑井储和表皮影响时奠定了良好的基础。Cinco-Ley 等^[13]将储层与裂缝模型进行耦合,推导得到有限导流垂直裂缝井压力计算方法。Riley 等^[14]基于椭圆渗流模型建立了有限导流垂直裂缝井筒化解。段永刚等^[15]、陈军等^[16]、付春权等^[17]、赵玉龙等^[18]分别从椭圆渗流和点源函数两种不同方法对压裂井以及双区复合压裂井试井模型进行了求解并分析各因素对曲线的影响。

基于点源函数基本理论,首先,建立牛顿-非牛顿所形成的双区复合油藏渗流微分方程并求解,得到了牛顿-非牛顿复合油藏有限导流压裂井试井模

型解析解;其次,利用裂缝导流能力函数计算获得有限导流垂直裂缝模型解析解;最后,利用 Stehfest 数值反演^[19]获得实空间井底压力解,绘制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

将聚驱物理模型抽象成牛顿流体-非牛顿流体组成的双区复合模型,作为相应的假设条件,建立顶底封闭、侧向无限大外边界油藏渗流微分方程和边界条件,得到牛顿-非牛顿双区复合点源函数解,再通过对点源函数在 z 方向上从 0 到 h 积分,再从 $-L_f$ 到 L_f 积分得到均匀流量牛顿-非牛顿复合区压裂井面源解。

1.1 牛顿-非牛顿压裂井物理模型

针对聚合物驱油过程,该物理模型可抽象为由牛顿流体-非牛顿幂律流体组成的双区复合油藏(图1)。内区为牛顿流体,外区为非牛顿幂律流体,内区界面半径为 r_m 。

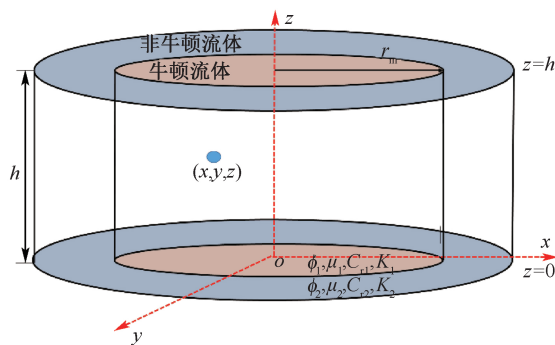


图1 牛顿-非牛顿复合点源物理模型示意图

Fig.1 Diagram of the Newton-non-Newtonian composite point source physical model

假设条件如下:

- (1)井位于地层中心,油层为水平、均质、等厚的无限大地层,流动呈层流;
- (2)各区内流体均为单相微可压缩的液体,忽略重力和毛管力的影响;
- (3)内区流体符合达西平面径向渗流规律,等温渗流;
- (4)裂缝长度为 L_f ,裂缝宽度为 W ,裂缝关于井筒对称;
- (5)两相邻渗流区域界面不存在附加压力降;
- (6)不考虑聚合物溶液在岩石表面的吸附、聚合物的不可入孔隙之类因素;
- (7)非牛顿流体黏度变化服从 Ostwald-De Waele 模型。根据文献[2],幂律流体的视黏度与特征黏度

的比值可以用牛顿区半径和幂律指数表示,即

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

式中: m 为幂律指数,无因次; μ_a 为非牛顿区幂律流体视黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; μ_2 为牛顿、非牛顿区幂律流体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; r 为任意位置径向距离, cm ; r_m 为牛顿区半径, cm ; 下标 D 表示无因次变量。

1.2 牛顿-非牛顿双区复合点源函数解

根据上述物理模型的描述和假设条件,得到顶底封闭、侧向无限大外边界油藏渗流微分方程和边界条件。

内区无因次渗流微分方程如下:

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

外区无因次渗流微分方程如下:

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

在初始时刻,内外区压力相等,且都为原始地层压力,即

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

由于点源位于上下封闭边界储层中,上下边界处封闭条件可以写为

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

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

侧向无限大外边界为

$$p_{D1}(r_D = \infty, z_D, t_D) = 0 \quad (7)$$

内边界条件为

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

根据界面压力和速度相等条件,有

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

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

其中

$$M_{12} = \left(\frac{K_{h1}}{\mu_1} \right) / \left(\frac{K_{h2}}{\mu_2} \right)$$

$$\eta_{12} = \left(\frac{K_{h1}}{\phi_1 \mu_1 C_{11}} \right) / \left(\frac{K_{h2}}{\phi_2 \mu_2 C_{12}} \right)$$

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

式中: ϕ_1, ϕ_2 分别为牛顿、非牛顿区地层孔隙度,无因次; η_{12} 为牛顿与非牛顿区储层导压系数比,无因次; ρ 为 z 方向的无穷小量, cm ; M_{12} 为牛顿与非牛顿区储层流体流度比,无因次; C_{11}, C_{12} 分别为牛顿、非牛顿区综合压缩系数, $(10^{-1} \text{MPa})^{-1}$; t 为生产时间, s ; K_1, K_2 为牛顿、非牛顿区储层渗透率, D ; h 为有效地层厚度, cm ; p_1, p_2 为牛顿、非牛顿区储层压力, 10^{-1}MPa ; \bar{q} 为瞬时流量, cm^3/s ; 下标 D 表示无因次。

各参数的无因次定义如下:

$$r_D = \frac{r}{L_{\text{ref}}}, r_{mD} = \frac{r_m}{L_{\text{ref}}}$$

$$x_D = \frac{x}{L_{\text{ref}}}, y_D = \frac{y}{L_{\text{ref}}}, z_D = \frac{z}{L_{\text{ref}}} \sqrt{\frac{K_{h1}}{K_{v1}}}$$

$$x_{wD} = \frac{x_w}{L_{\text{ref}}}, y_{wD} = \frac{y_w}{L_{\text{ref}}}, z_{wD} = \frac{z_w}{L_{\text{ref}}} \sqrt{\frac{K_{h1}}{K_{v1}}}, \rho_D = \frac{\rho}{L_{\text{ref}}}$$

$$h_D = \frac{h}{L_{\text{ref}}}, L_{hD} = \frac{L_h}{L_{\text{ref}}}, K_D = \frac{K_{h1}}{K_{v1}} / \frac{K_{h2}}{K_{v2}}$$

$$p_{D1} = \frac{2\pi K_{h1} h}{q_{sc} \mu_1} (p_e - p_1), p_{D2} = \frac{2\pi K_{h2} h}{q_{sc} \mu_2} (p_e - p_2)$$

$$t_D = \frac{K_{h1} t}{\phi_1 C_{11} \mu_1 L_{\text{ref}}^2}, C_D = \frac{C}{2\pi \phi_1 C_{11} h L_{\text{ref}}^2}, \bar{q}_D = \frac{\bar{q}(t)}{q_{sc}}$$

式中: L_{ref} 为参考长度, cm ; q_{sc} 为生产井地下产量, cm^3/s ; x, y, z 为三维空间中任意位置坐标, cm ; x_w, y_w, z_w 为三维空间中任意位置计算坐标, cm ; C 为井筒储集系数, $\text{cm}^3/(10^{-1} \text{MPa})$; 下标 h 表示水平方向; 下标 v 表示垂直方向。

为了求解上述模型的解,分别对(2)~(10)式关于时间 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,再关于 z_D 进行有限余弦傅立叶变换和逆变换,得到顶底封闭边界、侧向无限大外边界点源解。其中有限余弦傅立叶变换和逆变换如下:

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

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

式中:上标 $(-)$ 为 Laplace 空间参数。

最终得到经过 Laplace 变换和有限余弦傅立叶变换之后的渗流微分方程如下:

式中: x_D 取0.732代替无限导流井底压力解。

根据我国学者王晓冬等^[21]提出的裂缝导流函数,即

$$\bar{s}f(C_D) = 2\pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(n\pi)^2 C_D + 2\sqrt{(n\pi)^2 + u}} + \frac{0.4063\pi}{\pi(C_D + 0.8997) + 1.6252u} \quad (19)$$

得到有限导流垂直裂缝牛顿-非牛顿井底压力解,其形式如下:

$$\bar{p}_{vD} = \bar{p}_{D1} + \bar{s}f(C_D) \quad (20)$$

结合试井分析中常用的杜哈美原理以及叠加原理,即可求得 Laplace 空间中考虑井筒储集和表皮效应的无因次井底压力,即

$$\bar{p}_{wD}(s) = \frac{\bar{s}p_{vD} + S}{s + C_D s^2 (\bar{s}p_{vD} + S)} \quad (21)$$

式中: C_D 为无因次裂缝导流能力; L_f 为裂缝半长,cm; S 为表皮系数。

2 典型特征曲线及其影响因素分析

根据(21)式,利用 Stehfest 数值反演得到实空间井底压力解。为了验证该导流能力函数在计算压裂井试井模型的正确性,将所计算得到的结果取幂律指数 $m=1$ 与商业软件 Saphir 计算结果进行对比,可以看出,利用导流能力函数计算得到的压裂井曲线会达到很好的匹配效果(图3)。因此,可以利用该函数计算牛顿-非牛顿所组成的复合油藏压裂井井底压力。

图3为不考虑井储和表皮时牛顿-非牛顿复合模型特征曲线。根据压力导数曲线特征可知,牛顿-非牛顿复合模型共分为6个流动阶段:第Ⅰ阶段为双线性流阶段。在理想情况下,该阶段压力及其导数曲线平行且呈斜率为0.25的斜线;第Ⅱ阶段为线性流阶段。该阶段压力导数曲线呈斜率为0.5的直线;第Ⅲ阶段为储层围绕裂缝的椭圆流阶段。该阶段压力导数曲线呈斜率为0.36的直线;第Ⅳ阶段为内区径向流阶段。该阶段压力导数曲线呈0.5水平线;第Ⅴ阶段为过渡段;第Ⅵ阶段为外区反应阶段。由于外区为幂律流体,流体黏度大,流体流动所消耗的压降大。因此,该阶段压力及其导数曲线上翘,且呈斜率为 $(1-m)/(3-m)$ 斜率的直线,幂律指数 m 越小,直线斜率越大。

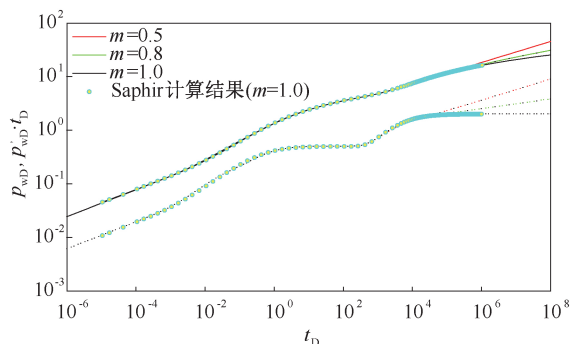


图3 牛顿-非牛顿双区复合压裂井特征曲线

Fig.3 Characteristic curve of Newton-non-Newtonian composite fracturing wells

图4为裂缝导流能力对特征曲线的影响。导流能力表征裂缝导流能力的大小,导流能力越大,裂缝的导流能力越强,双线性流和线性流阶段压力损失就越小。在典型压力及其导数双对数曲线图上的特征为:无因次导流能力越大,双线性流结束的时间越早,压力及其导数曲线位置越高。当无因次导流能力大于一定值时,双线性流特征不出现,只表现线性流特征。

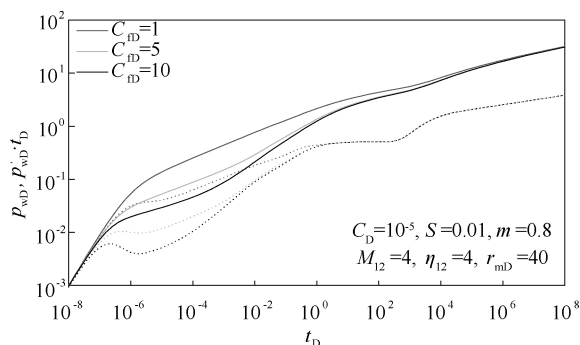


图4 裂缝导流能力对特征曲线的影响

Fig.4 Influence of fracture conductivity on characteristic curve

图5为牛顿-非牛顿区流度比和牛顿区半径对特征曲线的影响。 M_{12} 越小,说明牛顿区流体比非牛顿区流体流度小,由于计算的压力为井底压力,所以非牛顿区流体流入井筒所消耗的压差更大。因此,牛顿-非牛顿区流度比越小,非牛顿区径向流阶段无因次压力导数曲线越低,且呈斜率为 $(1-m)/(3-m)$ 斜率的直线(图5a);牛顿区半径的大小主要影响牛顿区径向流阶段持续的时间和非牛顿区径向流阶段的开始时间。牛顿区半径越小,牛顿区径向流阶段持续时间越短,压力导数曲线变化为其0.5水平线越短,非牛顿区压力及其导数曲线位置越高(图5b)。

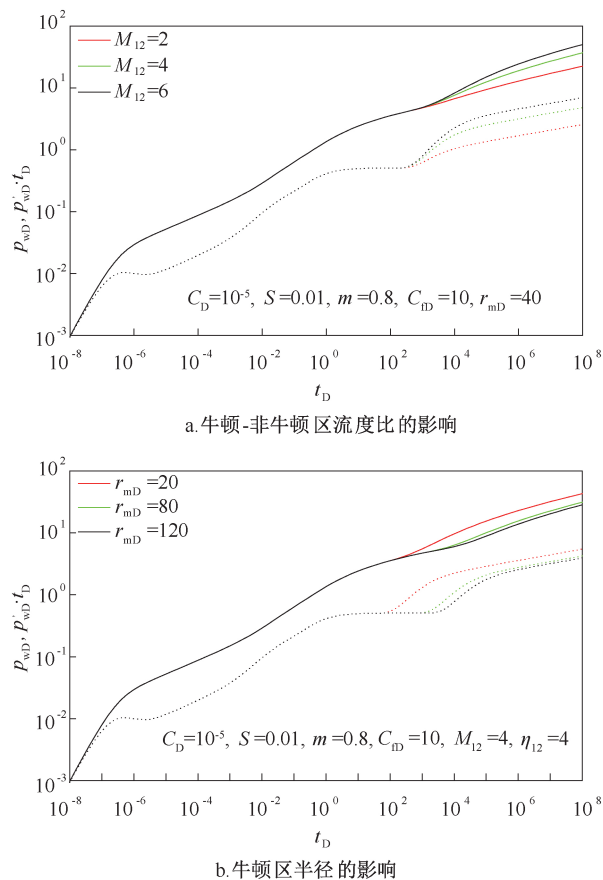


图5 牛顿-非牛顿区流度比和牛顿区半径
对特征曲线的影响

Fig.5 Influence of the mobility ratio of Newton-non-Newtonian zone and radius of Newton zone on the characteristic curve

3 实例分析

某油田一口聚合物驱压裂井,该井2014年4月投入生产,测试73.2388h,产量为20 m³/d,随后进行压裂并注入聚合物。该井基本参数如下:储层厚度12.5 m,井筒半径为0.07 m,孔隙度为0.158,总的压缩系数0.002 MPa⁻¹,原油黏度0.99 mPa·s,原油体积系数为1.001。

图6是实测曲线与理论曲线的拟合图。从图中可以看出,双对数和历史压降实测曲线与理论曲线均拟合良好,解释得到的相关参数如下:一区渗透率为4.26 mD,流度比为4.76,系数比为7.58,导流能力为12 200 mD·m,井筒储集系数为2.122 m³/MPa,表皮系数为0,裂缝半长为23.139 m,幂率指数为0.124。该解释结果描述了油藏径向渗透率变化特征。

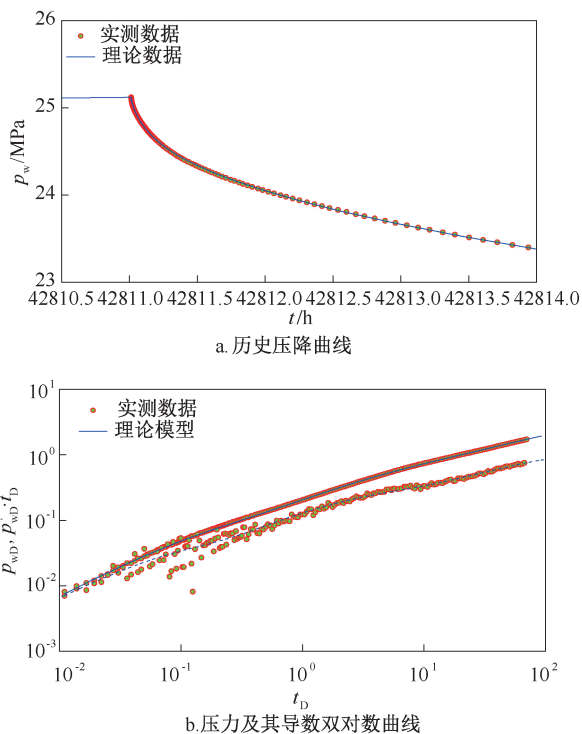


图6 实测试井解释拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of measured well testing interpretation

4 结论

(1)利用裂缝导流能力函数计算牛顿-非牛顿双区复合油藏有限导流压裂井井底压力,具有计算速度快、精度高等优点。

(2)幂律指数越小,非牛顿区径向流阶段压力导数曲线 $(1-m)/(3-m)$ 直线斜率越大。

(3)牛顿-非牛顿区流度比越大,非牛顿区径向流阶段压力导数曲线越高,且呈 $(1-m)/(3-m)$ 斜率直线;牛顿区半径越小,牛顿区径向流持续时间越短,非牛顿区径向流阶段压力导数 $(1-m)/(3-m)$ 斜率直线越高。

致谢:感谢西南石油大学和2018年油气田勘探开发国际会议会务组同意本文公开发表。感谢国家科技重大专项(2017ZX05009-004和2016ZX05015-003)的支持。

参考文献

- [1] IKOKU C U, RAMEY H J. Wellbore storage and skin effects during the transient flow of non-Newtonian power-law fluids in porous media [C]. SPE 7449, 1980.
- [2] VONGVUTHIPORNCHAI S, RAGHAVAN R. Well test analysis of data dominated by storage and skin: non-Newtonian power-law fluids [C]. SPE 14454, 1987.
- [3] 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.
- [4] 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 & Technology Review*, 2010, 28(13): 58-61.
- [5] 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 & Technology Review*, 2010, 28(18): 32-35.
- [6] 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 & Gas Field*, 2014, 21(4): 504-508.
- [7] 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]. *Hua Zhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(4): 110-113.
- [8] 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.
- YAO Jun, WU Minglu, HU Hang. Stream line numerical well-testing interpretation model for alkaline-polymer combination flooding reservoirs and its application [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(6): 894-898.
- [9] 贾智淳, 闫术, 董晓芳, 等. 剪切变稀作用对聚驱试井分析影响的数值研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(5): 107-114.
- JIA Zhichun, YAN Shu, DONG Xiaofang, et al. Numerical study on the impact of shear thinning behavior in well test analysis for polymer flooding [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2016, 38(5): 107-114.
- [10] 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.
- [11] OZKAN E, RAGHAVAN R. New solutions for well-test-analysis problems: Part 1-Analytical considerations [J]. *SPE Formation Evaluation*, 1991, 6(3): 359-368.
- [12] 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.
- [13] CINCO-Ley H, MENG H Z. Pressure transient analysis of wells with finite conductivity vertical fractures in double porosity reservoirs [C]. *SPE 18172*, 1988.
- [14] RILEY M F, Brigham W E, Horne R N. Analytic solutions for elliptical finite-conductivity fractures [C]. *SPE 22656*, 1991.
- [15] 段永刚, 李建秋. 页岩气无限导流压裂井压力动态分析[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 26-29.
- DUAN Yonggang, LI Jianqiu. Transient pressure analysis of infinite conductivity fractured wells for shale gas [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(10): 26-29.
- [16] 陈军, 杨峻懿, 刘启国, 等. 两区复合气藏有限导流垂直裂缝井压力动态分析[J]. 钻采工艺, 2016, 39(2): 32-34.
- CHEN Jun, YANG Junyi, LIU Qiguo, et al. Transient pressure behavior of finite-conductivity fractured well in bi-zonal composite gas reservoirs [J]. *Drilling & Production Technology*, 2016, 39(2): 32-34.
- [17] 付春权, 尹洪军, 贾俊飞. 复合油藏垂直裂缝井压力动态分析[J]. 东北石油大学学报, 2008, 32(2): 113-115.
- FU Chunquan, YIN Hongjun, JIA Junfei. Pressure field analysis of steady-state flow of vertically fractured well by boundary element method [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2008, 32(2): 113-115.
- [18] ZHAO Y L, ZHANG L H, LIU Y H, et al. Transient pressure analysis of fractured well in bi-zonal gas reservoirs [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 524: 89-99.
- [19] STEHFEST H. Numerical inversion of Laplace transform [J]. *Communication of the ACM*, 1970, 13(1): 47-49.
- [20] OZKAN E, RAGHAVAN R. New solutions for well-test-analysis problems: Part 2-Computational considerations and applications [J]. *SPE Formation Evaluation*, 1991, 6(3): 369-378.
- [21] 王晓冬, 罗万静, 侯晓春, 等. 矩形油藏多段压裂水平井不稳态压力分析[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 74-78.
- WANG Xiaodong, LUO Wanqing, HOU Xiaochun, et al. Transient pressure analysis of multiple-fractured horizontal wells in boxed reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 74-78.

编辑 刘述忍

第一作者简介: 徐有杰, 男, 1990 年出生, 硕士研究生, 目前就读于西南石油大学油气田开发工程专业, 主要从事渗流力学与试井分析研究工作。电话: 15882028133; Email: xuyoujie920309@163.com。通信地址: 四川省成都市新都区新都大道 8 号西南石油大学, 邮政编码: 610500。