

致密气藏分段压裂水平井的不稳定压力与产量综合分析方法

欧阳伟平^{1,2}

1. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司 陕西西安 710018

2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室 陕西西安 710018

通讯作者:Email:ouywp56@163.com

项目支持:中国石油川庆钻探公司项目“致密油气藏压裂优化设计及监测评价技术一体化平台开发”(CQ2017B-23-2-4)

引用:欧阳伟平. 致密气藏分段压裂水平井的不稳定压力与产量综合分析方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 14-21.

Cite: OUYANG Weiping. Comprehensive analysis method for transient pressure and production of multistage fractured horizontal well in tight gas reservoirs [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 14-21.

摘要 基于达西线性渗流的常规试井解释模型及产量递减分析模型不再适用于具有非线性渗流特征的致密气藏,采用视渗透率的方法,建立了一种综合考虑储层应力敏感、启动压力梯度以及滑脱效应的压裂水平井3D非线性渗流数学模型。利用混合有限元方法对模型进行求解,获得了非线性渗流条件下压裂水平井的试井理论曲线及产量递减Blasingame曲线。研究表明,应力敏感及启动压力梯度会“抬升”试井理论曲线,“降低”产量递减曲线,减小压力扩散速度,延缓外边界响应的的时间。滑脱效应会小幅度“降低”试井理论曲线,“抬升”产量递减曲线,但其影响程度比较小。利用所建立的非线性渗流模型对苏里格气田压裂水平井试井测试资料进行试井解释,对生产数据进行产量递减分析,将两者解释得到的储层参数及裂缝参数进行对比校正,并通过模型预测产量与实际产量的对比,证实新方法可靠实用,能降低解释的多解性,比常规方法更先进,可用于存在非线性渗流特征的致密气藏储层动态评价。

关键词 致密气;试井;水平井;应力敏感;启动压力梯度;滑脱效应;非线性渗流;产量递减;试井解释

中图分类号:TE353 **文献标识码**:A **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.01.003

Comprehensive analysis method for transient pressure and production of multistage fractured horizontal well in tight gas reservoirs

OUYANG Weiping^{1,2}

1. Changqing Downhole Technology Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Xi'an, Shaanxi 710018, China

2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil and Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China

Abstract: The conventional well test analysis model and production decline analysis model based on Darcy linear seepage theory are no longer applicable to tight gas reservoirs with nonlinear seepage characteristics. A 3D nonlinear seepage mathematical model of fractured horizontal well is established considering stress sensitivity, starting pressure gradient and slippage effect by using apparent permeability method. Well test type curves and production decline Blasingame curves under different nonlinear seepage conditions are obtained using the mixed finite element method. Effects of different nonlinear seepage factors on well test type curves and production decline curves have been studied. The calculation results show that stress sensitivity and starting pressure gradient will increase the value of well test theoretical curve, decrease the value of production decline curve, reduce the pressure diffusion speed, and postpone the corresponding time of the external boundary. However, the slippage effect will reduce the value of well test theoretical curve and increase the value of production decline curve, but the degree of its influence is small. Base on the nonlinear seepage model established, the well test data of fractured horizontal wells in Sulige gas field were interpreted by using the well test interpretation method, and production data were analyzed by using the advanced production decline analysis method. The results of reservoir parameters and fracture parameters interpreted by the two methods are compared, and then the model established is verified to be reliable and practical by the comparison between the model prediction and the actual output. The new method can reduce the multiple solutions of the interpretation, which is more advanced

than the conventional method, and thus it can be widely applied in tight gas wells with nonlinear seepage characteristics.

Keywords: tight gas; well testing; horizontal well; stress sensitivity; starting pressure gradient; slippage effect; nonlinear seepage; production decline; well test interpretation

试井解释方法及现代产量递减分析方法是目前进行储层动态评价的主要方法,能够较好地表征储层在动态条件下的实际特征。试井解释方法主要以测试过程中井底不稳定压力分析为基础,而现代产量递减分析方法以生产过程中不稳定产量分析为基础。试井解释方法与现代产量递减分析方法各有所长,在储层评价过程中应将试井解释与产量递减分析有机结合、相互约束、相互验证,尽量降低解释结果的多解性和不确定性,为提高解释结果的可靠性提供保障^[1]。然而,目前理论研究及现场应用中综合两种方法进行储层动态评价的文献鲜有报道。

致密气藏与常规天然气藏在渗流特征上有许多不同。大量的岩心实验测试^[2-4]表明致密气藏具有较强的应力敏感效应,主要表现为储层渗透率随有效应力的增加而减小,且储层越致密应力敏感效应越强。任晓娟等人^[5]最早通过实验发现低渗透气藏在一定含水饱和度条件下具有启动压力梯度效应,此后,贺伟、刘晓旭等人^[6-7]对气藏存在启动压力梯度的实质原因进行了研究,朱维耀等人^[8-9]建立了考虑启动压力梯度的直井渗流数学模型,杨朝蓬等人^[10]针对苏里格气田研究了致密气藏启动压力梯度大小及影响因素。此外,由于储层渗透率低致密气藏还存在滑脱效应^[11]。综上所述,致密气藏具有应力敏感、启动压力梯度和滑脱效应等非线性渗流特征^[12-13],常规基于达西线性渗流的试井解释模型^[14-15]及产量递减分析模型^[16-17]已不再适用于此类储层。由于致密气藏多段压裂水平井渗流机理和井型的复杂性,目前针对致密气藏压裂水平井不稳定渗流模型的研究还比较少,考虑致密气藏非线性渗流特征的压裂水平井渗流模型更鲜有报道。缺乏准确获取致密气藏水平井储层参数及压裂效果的有效模型,这严重影响到致密气压裂水平井开发方案的制定以及压裂设计的进一步优化。

根据致密气井岩心非线性渗流实验结果,采用视渗透率的方法,建立一种综合考虑应力敏感、启动压力梯度以及滑脱效应的压裂水平井 3D 非线性渗流数学模型,利用混合有限元方法对模型进行求解。分别计算获得非线性渗流条件下压裂水平井试井理论曲线及产量递减特征曲线,研究了非线性渗流因素对试井曲线及产量递减曲线的影响。最终综合试井解释及产量递减分析对现场实例进行解释分析,

验证了本文模型及方法的可靠性和实用性。

1 非线性渗流数学模型

根据前人对致密气井岩心的非线性渗流实验结果,采用视渗透率方法,建立一种综合考虑应力敏感、启动压力梯度以及滑脱效应的压裂水平井 3D 非线性渗流数学模型,并利用混合有限元方法求得数值解。

1.1 非线性渗流方程

根据国内外文献调研及室内岩心渗流实验的结果,采用视渗透率的概念,利用幂律方程^[18]来描述应力敏感效应,利用三参数非线性渗流方程^[19]来描述具有启动压力梯度的低速非达西渗流,利用 Klinkenberg 公式^[20]来描述滑脱效应。建立了一种综合描述应力敏感、启动压力梯度和滑脱效应的致密气藏非线性渗流方程,即

$$K_g = K_i \left(1 - \frac{\Delta p}{\sigma_{ei}} \right)^{-S_p} \left(1 - \frac{\lambda_c}{\frac{dp}{dr} + \lambda_c - \lambda_a} \right) \left(1 + \frac{b}{p_i - \Delta p} \right) \quad (1)$$

式中: K_g 为气体视渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_i 为原始储层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; Δp 为当前压力与原始地层压力的差值, MPa; p_i 为原始地层压力, MPa; σ_{ei} 为有效应力, MPa; S_p 为有效应力增加过程的渗透率应力敏感系数; λ_a 为最小启动压力梯度, MPa/m; λ_c 为平均启动压力梯度, MPa/m; b 为滑脱因子, MPa。

1.2 模型假设

(1) 原始储层非均质且渗透率各向异性,非均质特征可以根据水平井测井数据来设定。储层具有应力敏感效应、启动压力梯度效应及滑脱效应。

(2) 储层以气体为主,地层水为束缚水,水仅影响气体的渗透率,仅考虑单相气的渗流。

(3) 考虑井筒储集效应和表皮效应,水平井筒具有无限大导流能力。

(4) 多级分段压裂后产生多段裂缝,裂缝为有限导流裂缝,忽略裂缝的应力敏感效应,裂缝可根据实际压裂位置和压裂加砂量设置为不等长,不等距。

(5) 由于裂缝宽度远小于裂缝长度和高度,为了简化模型的计算量,假设流体在裂缝中的流动为

二维流动,流体在地层的流动为三维流动。

1.3 数学模型

储层控制方程:

$$K_{xD} \frac{\partial^2 p_{DR}}{\partial x_D^2} + K_{yD} \frac{\partial^2 p_{DR}}{\partial y_D^2} + K_{zD} \frac{\partial^2 p_{DR}}{\partial z_D^2} = \frac{1}{K_{LD}} \frac{\partial p_{DR}}{\partial t_D} \quad (2)$$

其中

$$K_{LD} = \left(1 - \frac{\Delta p}{\sigma_{ei}}\right)^{-s_p} \left(1 - \frac{\lambda_c}{\frac{dp}{dr} + \lambda_c - \lambda_a}\right) \left(1 + \frac{b}{p_i - \Delta p}\right)$$

裂缝控制方程:

$$\frac{\partial^2 p_{Df}}{\partial y_D^2} + \frac{\partial^2 p_{Df}}{\partial z_D^2} = \frac{1}{K_{fD}} \frac{\partial p_{Df}}{\partial t_D} \quad (3)$$

式中: K_{xD} 、 K_{yD} 、 K_{zD} 为 x 、 y 、 z 方向无量纲渗透率; x_D 、 y_D 、 z_D 为无量纲坐标; K_{LD} 、 K_{fD} 为区域、裂缝的无量纲渗透率; p_D 为无量纲压力; t_D 为无量纲测试时间。

初始条件: $p_D(x, y, z) = 0$

内边界条件:

$$\sum_{j=1}^N A_j K_{jD} \left(\frac{\partial p_{jD}}{\partial n'} \right) \Big|_{\Gamma_{in}} = 2\pi h_D \left(1 - C_D \frac{dp_{wD}}{dt_D} \right)$$

$$p_{wD}(t_D) = p_{jD} - \frac{S_t}{2\pi h_D} \sum_{j=1}^N A_j K_{jD} \left(\frac{\partial p_{jD}}{\partial n'} \right)$$

外边界条件:

$$\text{封闭: } \frac{\partial p_D}{\partial n'} \Big|_{\Gamma_{out}} = 0; \quad \text{定压: } p_D \Big|_{\Gamma_{out}} = 0$$

式中: K_{jD} 为内边界单元的无量纲渗透率; A_{jD} 为内边界网格单元的面积; N 为内边界单元数; j 为有限元单元结点序号; S_t 为总表皮系数; h_D 为无量纲储层厚度; Γ_{out} 代表外边界; Γ_{in} 代表内边界; p_{wD} 为井底的无量纲压力; C_D 为无量纲井筒储存系数。

无量纲量的定义:

$$p_D = \frac{784.9 \sqrt{K_x K_y} h (\psi_i - \psi)}{q_{sc} T}; \psi(p) = 2 \int_0^p \frac{p}{\mu Z} dp$$

$$x_D = \frac{x}{L}; y_D = \frac{y}{L}; z_D = \frac{z}{L}; t_D = \frac{3.6 \times 10^{-3} \sqrt{K_x K_y} t}{\phi \mu C_L L^2}$$

$$K_{xD} = \frac{K_x}{\sqrt{K_x K_y}}; K_{yD} = \frac{K_y}{\sqrt{K_x K_y}}; K_{zD} = \frac{K_z}{\sqrt{K_x K_y}}$$

$$K_{fD} = \frac{K_f}{\sqrt{K_x K_y}}; h_D = \frac{h}{L}; C_D = \frac{0.1592 C}{\phi h C_L L^2}$$

$$\frac{\partial p_{jD}}{\partial n'} = - \left(K_{xD} \frac{\partial p_{jD}}{\partial x_D} \cos \alpha + K_{yD} \frac{\partial p_{jD}}{\partial y_D} \cos \beta + K_{zD} \frac{\partial p_{jD}}{\partial z_D} \cos \gamma \right)$$

式中: ψ 为拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa} \cdot \text{s})$; p 为压力, MPa ; μ 为气体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; Z 为气体偏差因子; q_{sc} 为标准状况下气体产量, m^3/d ; T 为储层温度, K ; K_x 、 K_y 、 K_z 为 x 、 y 、 z 方向的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_f 为裂缝渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; C_L 为综合压缩系数, $1/\text{MPa}$; L 为水平井半长, m ; h 为储层有效厚度, m ; ϕ 为有效孔隙度; α 、 β 、 γ 为内边界单元面法线方向与坐标轴的夹角。

1.4 模型求解

采用混合有限元方法对模型进行求解,将整个计算区域划分为两个部分,一是三维流动的储层区域;二是二维流动的裂缝区域。采用四面体作为三维网格的单元网格,三角形网格作为二维网格的单元网格(如图1)。从图中可看到,裂缝及井筒区域采用了网格局部加密技术,在实际计算过程中可以根据计算精度及计算时间的要求来调整网格数量。

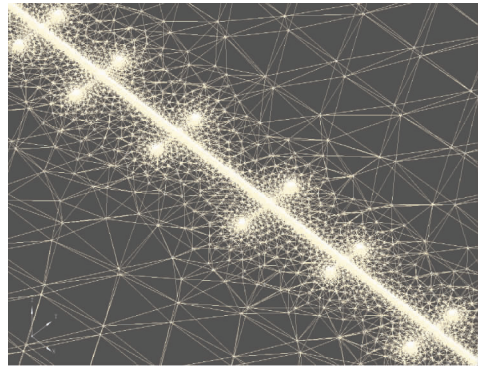


图1 压裂水平井三维网格图

Fig.1 Three-dimensional grid diagram of fracturing horizontal well

根据储层和裂缝控制方程的弱积分形式,分别离散储层和裂缝的控制方程,得到储层区域三维有限元方程为:

$$VK_{LD} \left(K_{xD} b_i^2 + K_{yD} c_i^2 + K_{zD} d_i^2 + \frac{1}{10K_{LD} \Delta t_D} \right) p_{DRi}^{e,n+1}$$

$$+ VK_{LD} \left(K_{xD} b_i b_j + K_{yD} c_i c_j + K_{zD} d_i d_j + \frac{1}{20K_{LD} \Delta t_D} \right) p_{DRj}^{e,n+1}$$

$$+ VK_{LD} \left(K_{xD} b_i b_k + K_{yD} c_i c_k + K_{zD} d_i d_k + \frac{1}{20K_{LD} \Delta t_D} \right) p_{DRk}^{e,n+1}$$

$$+ VK_{LD} \left(K_{xD} b_i b_m + K_{yD} c_i c_m + K_{zD} d_i d_m + \frac{1}{20K_{LD} \Delta t_D} \right) p_{DRm}^{e,n+1}$$

$$- \frac{AK_{LD}}{6} \frac{\partial p_{DRi}^{e,n+1}}{\partial n'} - \frac{AK_{LD}}{12} \frac{\partial p_{DRj}^{e,n+1}}{\partial n'} - \frac{AK_{LD}}{12} \frac{\partial p_{DRk}^{e,n+1}}{\partial n'} - \frac{AK_{LD}}{12} \frac{\partial p_{DRm}^{e,n+1}}{\partial n'}$$

$$= \frac{V}{10\Delta t_D} p_{DRi}^{e,n} + \frac{V}{20\Delta t_D} p_{DRj}^{e,n} + \frac{V}{20\Delta t_D} p_{DRk}^{e,n} + \frac{V}{20\Delta t_D} p_{DRm}^{e,n} \quad (4)$$

裂缝面二维有限元方程:

$$\begin{aligned}
& AK_{\text{D}} \left(b_i^2 + c_i^2 + \frac{1}{6K_{\text{D}}\Delta t_{\text{D}}} \right) p_{\text{Dfi}}^{e,n+1} \\
& + AK_{\text{D}} \left(b_j b_j + c_j c_j + \frac{1}{12K_{\text{D}}\Delta t_{\text{D}}} \right) p_{\text{Dfj}}^{e,n+1} \\
& + AK_{\text{D}} \left(b_k b_k + c_k c_k + \frac{1}{12K_{\text{D}}\Delta t_{\text{D}}} \right) p_{\text{Dfk}}^{e,n+1} \\
& - \frac{lK_{\text{D}}}{3} \frac{\partial p_{\text{Dfi}}^{e,n+1}}{\partial n'} - \frac{lK_{\text{D}}}{6} \frac{\partial p_{\text{Dfj/k}}^{e,n+1}}{\partial n'} \\
& = \frac{A}{6\Delta t_{\text{D}}} p_{\text{Dfi}}^{e,n} + \frac{A}{12\Delta t_{\text{D}}} p_{\text{Dfj}}^{e,n} + \frac{A}{12\Delta t_{\text{D}}} p_{\text{Dfk}}^{e,n} \quad (5)
\end{aligned}$$

式中: V 为四面体单元的体积; A 为单元体一个面上的面积; b, c, d 为有限元单元系数; i, j, k, m 为有限元单元结点序号; l 为裂缝在内边界的单元边长。

根据上述有限元方程生成地层 3D 模型的刚度矩阵和裂缝 2D 模型的刚度矩阵, 再将两个刚度矩阵叠加形成系统刚度矩阵, 具体的叠加方法可参照文献^[21-22]。利用 SuperLU 线性方程组求解器对混合有限元方法形成的系统刚度矩阵进行求解, 即可获取模型的数值解。

2 计算结果及分析

采用模型计算获得非线性渗流条件下的压裂水平井试井理论曲线及产量递减特征曲线, 研究了应力敏感、启动压力梯度和滑脱效应对试井曲线及产量递减曲线的影响规律。

2.1 应力敏感的影响

假定一口致密气藏水平井, 储层水平方向渗透率 K_x 与 K_y 均为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 垂直方向渗透率 K_z 为 $0.002 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 储层上覆岩石压力为 60 MPa, 原始孔隙压力为 30 MPa, 应力敏感系数 S_p 为 1.5, 储层为封闭矩形储层, 长 2 000 m, 宽 800 m。水平井位于储层中心, 水平井长 1 000 m, 分段压裂 5 段, 裂缝长度 100 m, 裂缝渗透率为 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 裂缝表皮系数为 0.1, 井储系数为 $3 \text{ m}^3/\text{MPa}$ 。该井的整个生产经过了三开三关, 开井流量均为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。由该井的基础数据计算得到最后一次关井压力恢复的双对数曲线如图 2 所示。

从图 2 中的曲线对比可知, 应力敏感对试井双对数曲线的影响非常明显, 应力敏感条件下的压力及压力导数曲线要高于不考虑应力敏感条件下的曲线, 其原因在于考虑应力敏感下的渗透率随着孔隙压力的下降而变小, 井底流动阻力增加, 造成相同产量条件下, 生产压差增加。应力敏感不可逆的压力

及压力导数曲线要高于可逆条件下的曲线, 因为在关井压力恢复过程中井底附近的渗透率会有所恢复, 但是应力敏感不可逆下的渗透率恢复值要小于应力敏感可逆下的恢复值, 造成应力敏感不可逆条件下的井底流动阻力更大。

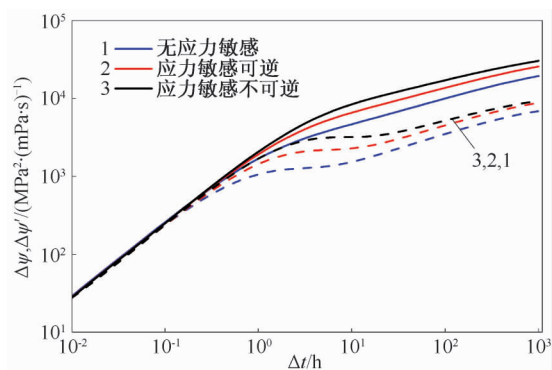


图 2 不同应力敏感条件下的试井双对数曲线
Fig.2 Well test log-log type curves under different stress sensitivity conditions

图 3 为不同应力敏感系数下的压裂水平井 Blasingame 曲线。

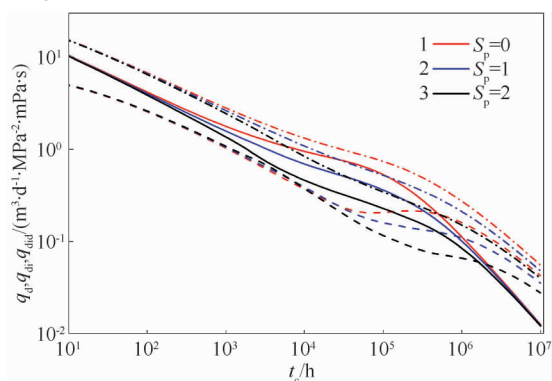


图 3 不同应力敏感系数下的 Blasingame 曲线
Fig.3 Blasingame curves under different stress sensitivity coefficients

从曲线对比可知, 不同应力敏感系数的曲线在早期阶段重合, 但一段时间后曲线差异逐渐加大。应力敏感效应会造成中后期阶段产量递减特征曲线值减小, 应力敏感系数越大曲线值减小的幅度越大, 说明应力敏感会降低压裂水平井的产量。此外, 由于应力敏感会使得储层渗透率减小, 因此应力敏感还会减缓压力扩散的速度, 使得边界响应的时间推迟, 非稳态到拟稳态的过渡段更加平滑。

2.2 启动压力梯度的影响

假定最小启动压力梯度 λa 分别为 0、0.02 MPa/m、0.1 MPa/m, 平均启动压力梯度 λc 分别为 0、0.1 MPa/m、0.3 MPa/m。图 4 为计算得到的不同启动压力梯度条件下的压裂水平井试井曲线。由

图中曲线对比结果可知,启动压力梯度会增加试井曲线中压力及压力导数值,使得曲线“抬升”,启动压力梯度系数越大,曲线“抬升”的幅度越大,说明启动压力梯度的存在会增加渗流阻力。

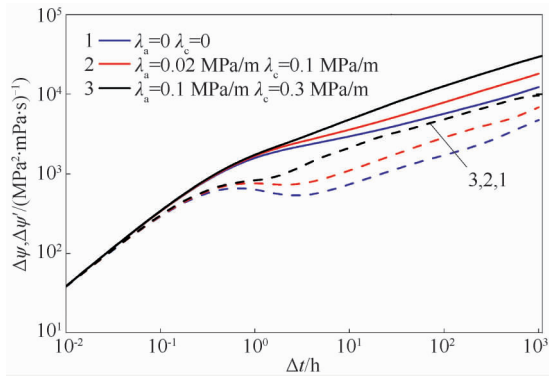


图4 不同启动压力梯度系数下的试井双对数曲线
Fig.4 Well test log-log type curves under different starting pressure gradient coefficients

启动压力梯度不仅会影响试井理论曲线,还会对压力扩散产生较大影响。图5为不同启动压力梯度条件下储层生产1000 h时的压力场分布。

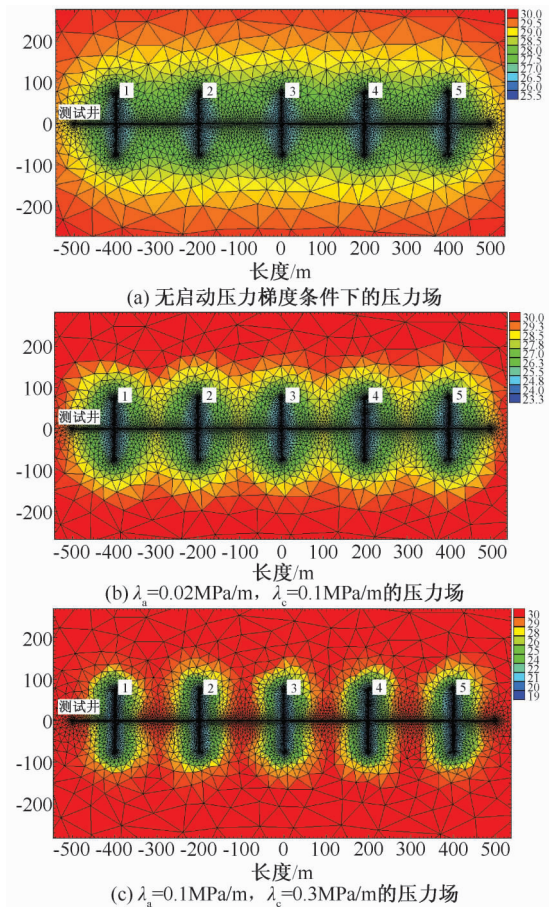


图5 不同启动压力梯度系数下的压力场
Fig.5 Pressure field under different starting pressure gradient coefficients

对比其中压力场扩散范围可知,启动压力梯度会减缓压力扩散速度,启动压力梯度值越大,压力扩散速度越慢,这主要是因为启动压力梯度会形成动边界,启动压力梯度越大,动边界扩展的速度越慢。

图6为不同启动压力梯度系数条件下的压裂水平井 Blasingame 曲线。从图6可以看出,不同应力敏感系数条件下的曲线在早期阶段就不重合,一段时间后曲线差异进一步加大,但在拟稳态阶段曲线又最终重合在一起。与应力敏感对递减特征曲线的影响类似,启动压力梯度同样会使得产量递减曲线值减小,启动压力梯度越大,产量递减曲线值越小,说明启动压力梯度会减小气井的产量。由于启动压力梯度会造成动边界的存在,压力扩散速度减小,因此启动压力梯度会使得产量递减特征曲线的拟稳态阶段推迟。

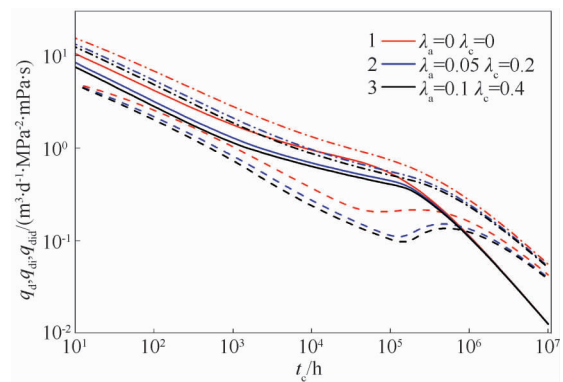


图6 不同启动压力梯度系数下的 Blasingame 曲线
Fig.6 Blasingame curves under different starting pressure gradient coefficients

2.3 滑脱效应的影响

假定测试时储层平均压力为 15 MPa,储层渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,根据实验室测试得到的滑脱因子公式计算此时的滑脱因子大小,计算得到的试井理论曲线如图7所示。从计算结果可知,滑脱效应会减小试井曲线中压力及压力导数值,但对试井曲线降低的幅度比较小,这主要是因为滑脱效应会小幅度增加气体的视渗透率。实验室岩心渗流实验中滑脱效应非常明显,这是由于实验室驱替压力比较小造成的。滑脱效应的大小主要取决于孔隙压力及绝对渗透率。常规试井测试时储层压力还比较高,因此滑脱效应对试井理论曲线的影响比较小。

图8为滑脱效应对压裂水平井 Blasingame 曲线的影响。

从曲线对比可知,滑脱效应仅仅会对产量递减

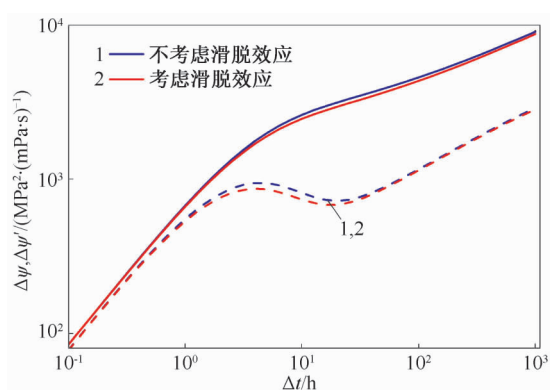


图 7 滑脱效应对试井理论曲线的影响

Fig.7 Influence of slippage effect on well test theory curve

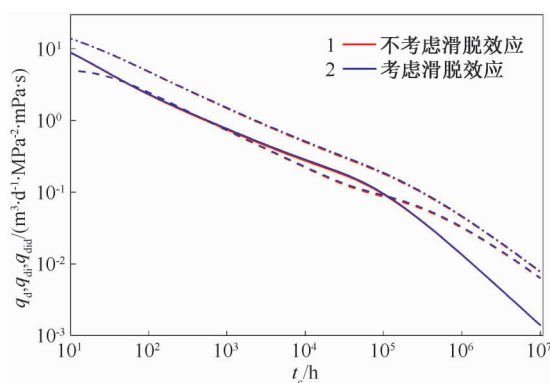


图 8 滑脱效应对 Blasingame 曲线的影响

Fig.8 Influence of the slippage effect on the Blasingame curve

特征曲线的中后期阶段有一定的影响,考虑滑脱效应的产量递减曲线值会小幅度增加,但增幅较小。

3 实例分析

利用所建立的模型对苏里格气田多口压裂水平井试井测试资料进行试井解释,对生产数据进行产量递减分析,将两种方法解释得到的储层参数及裂缝参数进行对比分析,并通过模型预测产量与实际产量的对比验证模型的正确性。

现以其中一口井为例进行说明。该井开采层位为盒 8,属于致密储层,储层温度为 105 ℃,孔隙度 6.5%,有效厚度为 9.6 m,含气饱和度 55%,天然气相对密度 0.6。水平段长度 1 266 m,分段压裂了 9 段,压完放喷排液后进行修正等时试井,经历 4 开 4 关及延长测试,每个工作制度测试时间约为 1 d,延长测试时间 30 d,关井压力恢复 45 d。此后,生产时间约 4.8 a,累计产量 $1.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3.1 试井解释

利用所建立的压裂水平井试井解释模型首先对该井修正等时试井数据进行试井解释,考虑致密储

层的非线性渗流特征,解释拟合曲线如图 9 所示。试井曲线拟合发现该井主要的非线性渗流特征为应力敏感,具有明显的应力敏感不可逆特征。由图可知,试井曲线拟合程度较高。

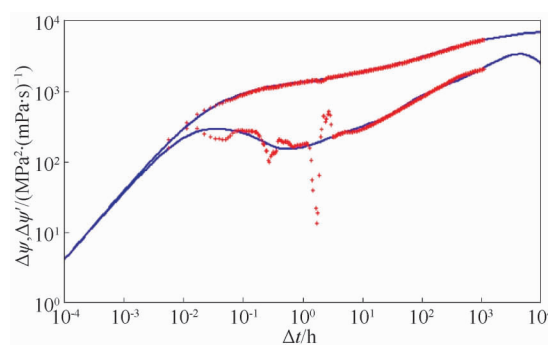


图 9 试井双对数曲线拟合图

Fig.9 Matching diagram of well test log-log type curves

3.2 产量递减分析

利用模型对该井 2011 年 6 月 13 日至 2016 年 3 月 21 日的生产数据进行解释分析,主要考虑应力敏感效应和滑脱效应,产量递减 Blasingame 曲线拟合效果如图 10 所示。由拟合图可知,该井已进入了拟稳态阶段,理论曲线与实测曲线拟合得比较理想。

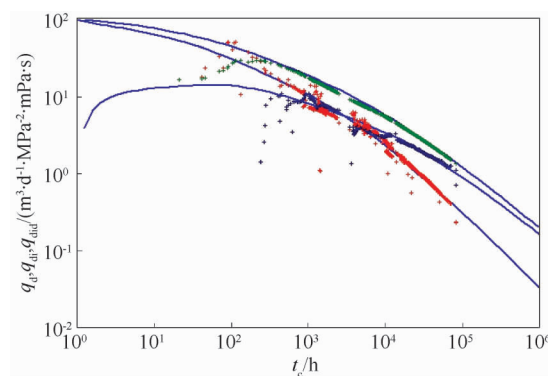


图 10 产量递减 Blasingame 曲线拟合图

Fig.10 Production decline Blasingame curves matching diagram

3.3 结果对比及验证

将试井解释结果与产量递减分析结果进行对比,如表 1 所示。

从表中对比可知,试井解释结果与产量递减分析结果获得的储层参数与裂缝参数基本一致,然后将两者解释结果的平均值作为储层参数实际值,再结合该井生产阶段的井口压力,利用模型进行产量预测,并与实际产量进行对比。对比结果如图 11 所示。

从产量曲线对比结果可知,模型预测结果与实测结果吻合很好,说明评价参数可靠性高。

表1 试井解释结果与产量递减分析结果对比

Table 1 The results comparison between well test interpretation and production decline analysis

分析方法	渗透率 $/(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	裂缝平均 半长/m	裂缝渗透 率/ μm^2	裂缝表皮	应力敏感 系数	矩形边界 长/m	矩形边界 宽/m	井控面积 $/\text{km}^2$	井控储量 $/10^8 \text{m}^3$
试井解释	0.325 8	113.0	32	0.185	1.7	2 532	866	2.19	1.79
产量递减分析	0.330 9	102.0	36	0.200	1.2	2 406	882	2.12	1.73

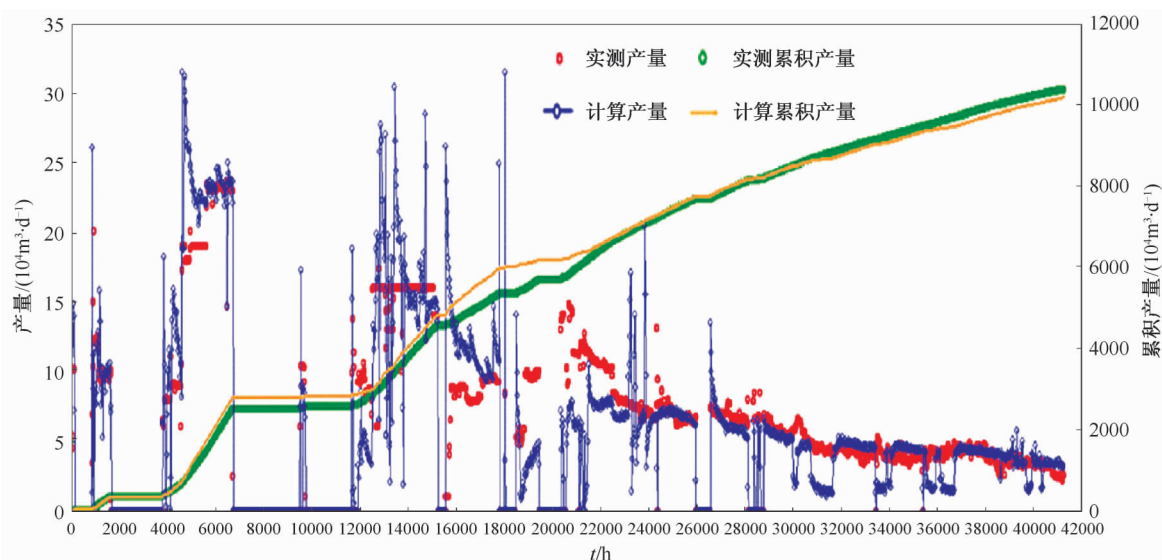


图11 产量预测值与测试值的对比图

Fig.11 Comparison of production prediction and test value

4 结论

(1)建立了一种综合考虑储层应力敏感、启动压力梯度以及滑脱效应的压裂水平井三维非线性渗流数学模型,利用混合有限元方法获得了非线性渗流条件下压裂水平井试井理论曲线及产量递减Blasingame曲线。

(2)研究了非线性渗流因素对试井曲线及产量递减曲线的影响,为致密气藏试井曲线及产量递减曲线的准确拟合提供了基础。研究表明:应力敏感及启动压力梯度会“抬升”试井曲线,“降低”产量递减曲线,减小压力扩散速度,延缓外边界相应的时间。滑脱效应会小幅度“降低”试井理论曲线,“抬升”产量递减曲线,但其影响程度比较小。

(3)现场实例应用分析说明了综合试井解释及产量递减分析方法进行水平井储层动态评价的流程,同时验证了本文模型及方法的实用可靠,为提高致密气藏水平井储层动态评价的可靠性提供了重要技术支持。

致谢:感谢川庆钻探长庆井下技术作业公司同意该论文的发表;感谢川庆钻探公司的科研项目资助。

参 考 文 献

- [1] 孙贺东. 油气井现代产量递减分析方法及应用[M]. 北京:石油工业出版社,2013.
- [2] 贺玉龙,杨立中. 围压升降过程中岩体渗透率变化特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004,23(3): 415-419.
HE Yulong, YANG Lizhong. Testing study on variational characteristics of rockmass permeability under loading-unloading of confining pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(3): 415-419.
- [3] 肖文联,李滔,李闽,等. 致密储集层应力敏感性评价[J]. 石油勘探与开发, 2016,43(1):107-114.
XIAO Wenlian, LI Tao, LI Min *et al.* Evaluation of the stress sensitivity in tight reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016,43(1):107-114.
- [4] 窦宏恩,张虎俊,姚尚林,等. 致密储集层岩石应力敏感性测试与评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2016,43(6):1022-1028.
DOU Hongen, ZHANG Hujun, YAO Shanglin *et al.* Measurement and evaluation of the stress sensitivity in tight reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016,43(6):1022-1028.
- [5] 任晓娟,阎庆来,何秋轩,等. 低渗气层气体的渗流特征实验研究[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 1997,12(3):22-25.
REN Xiaojuan, YAN Qinglai, HE Qiuxuan. The experimental study of characteristics of gas flow in tight formation

- [J]. Journal of Xian Petroleum Institute (Natural Science Edition), 1997, 12(3): 22-25.
- [6] 贺伟,冯曦,钟孚勋. 低渗储层特殊渗流机理和低渗透气井动态特征探讨[J]. 天然气工业, 2002, 22(S1): 91-94.
HE Wei, FENG Xi, ZHONG Fuxun. Discussion on the special percolation mechanism of low permeability reservoir and the performance characteristics of low permeability gas well [J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(S1): 91-94.
- [7] 刘晓旭,胡勇,朱斌,等. 气体低速非达西渗流机理及渗流特征研究[J]. 特种油气藏, 2006, 13(6): 43-46.
LIU Xiaoxu, HU Yong, ZHU Bin *et al.* Study on low-velocity non-Darcy gas seepage mechanism and characteristics [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2006, 13(6): 43-46.
- [8] 朱维耀,宋洪庆,何东博,等. 含水低渗气藏低速非达西渗流数学模型及产能方程研究[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(5): 685-689.
ZHU Weiyao, SONG Hongqing, HE Dongbo *et al.* Low-velocity non-Darcy gas seepage model and productivity equations of low-permeability water-bearing gas reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(5): 685-689.
- [9] 欧阳伟平,张冕,刘曰武,等. 基于三参数非线性渗流的致密气藏数值试井分析[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(11): 2030-2036.
OUYANG Weiping, ZHANG Mian, LIU Yuewu *et al.* Numerical well test analysis of tight gas reservoirs based on the three parameter nonlinear seepage [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(11): 2030-2036.
- [10] 杨朝蓬,李星民,刘尚奇,等. 苏里格低渗致密气藏阈压效应[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 347-354.
YANG Zhaopeng, LI Xingmin, LIU Shangqi *et al.* Threshold pressure effect of low permeability tight gas reservoirs in Sulige gas field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 347-354.
- [11] 朱光亚,刘先贵,李树铁,等. 低渗气藏气体渗流滑脱效应影响研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(5): 44-47.
ZHU Guangya, LIU Xiangui, LI Shutie *et al.* A study of slippage effect of gas percolation in low permeability gas pools [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(5): 44-47.
- [12] 孟琦,吕凤滨,刘红兵,等. 多因素影响下低渗压裂气井产能分析[J]. 油气井测试, 2015, 24(5): 14-17.
MENG Qi, LYU Fengbin, LIU Hongbing *et al.* Analysis of the low permeability fracturing gas well productivity under the influence of multiple factors [J]. Well Testing, 2015, 24(5): 14-17.
- [13] 范海军,张倩倩,王宁,等. 低渗透气藏有限导流裂缝水平井产能预测[J]. 油气井测试, 2013, 22(3): 1-4.
FAN Haijun, ZHANG Qianqian, WANG Ning *et al.* Productivity prediction of a finite-conductivity fracture horizontal well in low permeability gas reservoir [J]. Well Testing, 2013, 22(3): 1-4.
- [14] 曾焱,王本成,聂仁仕. 线性复合油藏多级压裂水平井渗流模型[J]. 石油学报, 2017, 38(6): 687-695.
ZENG Yan, WANG Bencheng, NIE Renshi. The porous flow model of multi-stage fractured horizontal well in linear composite oil reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(6): 687-695.
- [15] 任宗孝,吴晓东,屈展,等. 倾斜裂缝水平井非稳态压力模型[J]. 石油学报, 2017, 38(9): 1059-1065.
REN Zongxiao, WU Xiaodong, QU Zhan *et al.* Transient pressure model for horizontal wells with inclined fractures [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(9): 1059-1065.
- [16] Blasingame T A, Ilk D, Hosseinpour-zonoozi N. Application of the B-derivative function to production analysis [C]. SPE paper 107967 presented at Rocky Mountain Oil & Gas Technology Symposium, Denver, Colorado, USA, 16-18 April, 2007.
- [17] 孙贺东,欧阳伟平,张冕. 基于数值模型的气井现代产量递减分析及动态预测[J]. 石油学报, 2017, 38(10): 1194-1199.
SUN Hedong, OUYANG Weiping, ZHANG Mian. Advanced production decline analysis and performance forecasting of gas wells based on numerical model [J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(10): 1194-1199.
- [18] 罗瑞兰,程林松,彭建春,等. 确定低渗岩心渗透率随有效覆压变化关系的新方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(2): 87-90.
LUO Ruilan, CHENG Linsong, PENG Jianchun *et al.* New method of determining relationship between permeability and effective overburden pressure for low-permeability reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2007, 31(2): 87-90.
- [19] 黄延章,杨正明,何英,等. 低渗透多孔介质中的非线性渗流理论[J]. 力学与实践, 2013, 35(5): 1-8.
HUANG Yangzhang, YANG Zhengming, HE Ying *et al.* Nonlinear porous flow in low permeability porous media [J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(5): 1-8.
- [20] KLINKENBERG L J. The permeability of porous media to liquids and gases [J]. Socar Proceedings, 1941, 2(2): 200-213.
- [21] 欧阳伟平,刘曰武. 射孔完井参数对试井理论曲线的影响[J]. 石油学报, 2013, 34(3): 528-534.
OUYANG Weiping, LIU Yuewu. Effects of perforated completion parameters on well test type curves [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 528-534.
- [22] WAN Yizhao, LIU Yuewu, OUYANG Weiping *et al.* Numerical investigation of dual-porosity model with transient transfer function based on discrete-fracture model [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(5): 611-626.

编辑 穆立婷

第一作者简介:欧阳伟平,男,1986年出生,中石油川庆钻探博士后,2014年博士毕业于中国科学院力学研究所,主要从事渗流力学与油气井试井研究。电话:029-86599095, 17791874616; Email:ouywp56@163.com。地址:西安市未央区凤城四路长庆大厦,邮政编码:710018。