

基于节点网络的水平井分段流入剖面预测方法

庞伟¹, 刘理明², 何祖清¹, 何同¹, 王国华²

(1. 中国石油化工工程技术研发院, 北京 100101; 2. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川成都 610500)

摘要: 随着水平井分段完井技术的发展, 完井结构变得越来越复杂, 为了准确模拟水平井分段完井流入剖面, 研究了基于节点网络的水平井分段流入剖面预测方法。将完井结构简化为由地层、井壁与完井工具间的环空、完井工具构成的水平井井筒网络, 基于物质守恒原理和动量守恒定理, 建立了各类流动桥的压降模型; 用桥流动指数来表征流体流动方向, 建立了耦合地层、井壁与完井工具间的环空、完井工具三者之间的流体流入剖面预测模型, 并采用 Newton-Raphson 迭代方法进行了求解。算例分析表明, 应用该方法可预测水平井复杂完井结构的环空、油管中的压力和流量分布, 准确反映完井方式和完井工具对井筒流体流入剖面的影响, 且具有较高的预测精度。研究认为, 建立的水平井分段流入剖面模型可为完井方式选择、参数优化设计提供理论支撑。

关键词: 水平井; 分段完井; 井筒网络; 流入剖面; 产能模型; 完井参数

中图分类号: TE25 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2019)02-0093-06

A Dynamic Prediction Method for Segmental Flow Performance in Horizontal Wells Based on Node Networks

PANG Wei¹, LIU Liming², HE Zuqing¹, HE Tong¹, WANG Guohua²

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China; 2. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: The dynamic prediction of segmental flow performance in horizontal wells is the basis for analyzing the adjustment effect of wellbore fluid inflow in different completion methods and the production performance of different well sections. The completion structure can be simplified into a three-layer node network composed of the formation, the annulus between borehole wall and completion tools, and completion tools. Based on the principle of mass conservation and the theorem of momentum conservation, the pressure drop model of various flow bridges was established. The bridge flow index was used to characterize the direction of fluid flow, and with the performance prediction model of the fluid flow in the coupling formation, the above mentioned annulus and the completion tools were further established. Finally, the Newton-Raphson iterative method was used to find the solution. The analysis on the calculation example showed that this model is able to predict the annulus, pressure and flow distribution in the tubing in horizontal wells with complex completion structure, and it can effectively reflect the impact of completion mode and completion tools on the fluid flow performance of the wellbore, with higher prediction precision. The established model can provide theoretical supports for the selection of segmental completion method and parameters for best practices for the optimization design of horizontal wells.

Key words: horizontal well; segregated completion; wellbore node network; flow performance; productivity model; completion parameters

随着水平井的水平段越来越长, 采用分段完井的水平井越来越多, 完井结构越来越复杂, 预测长水平井段和复杂完井结构水平井的流入剖面越来越难^[1-4]。S. D. Joshi 等人^[5-8]基于无限导流分别建立了简化的水平井解析模型, 但由于没有考虑井筒压降使得预测的水平井产能过高。自从 B. J. Dikken^[9]指出水平井筒压降会影响水平井产能以来, 多位学

收稿日期: 2018-09-10; 改回日期: 2018-11-28。

作者简介: 庞伟 (1983—), 男, 山东肥城人, 2007 年毕业于中国石油大学 (华东) 石油工程专业, 2010 年获中国石油大学 (华东) 油气田开发工程专业硕士学位, 研究员, 主要从事非常规油气及高温高压油气井完井测试研究工作。E-mail: pangwei.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项“高压低渗油气藏固井完井技术”(编号: 2016ZX05021-005) 资助。

者对水平井的井筒压降损失以及井筒管流与油藏渗流的耦合产能进行了研究, E. Ozkan 等人^[10-14]从不同角度对水平井筒压降进行了研究, 认为水平井筒内的压降与普通水平管内压降不一样, 水平井筒压降与管壁摩擦、加速损失、孔眼粗糙度及混合流体有关。Ouyang Liangbiao 等人^[15-19]建立了油藏/井筒耦合模型, 但没有考虑分段完井结构对产能和井筒流入剖面的影响。K. Neylon 等人^[20-21]考虑了分段完井结构对产量的影响, 但无法对完井环空、基管的压力剖面和流量剖面进行模拟。为此, 笔者研究了基于节点网络的水平井分段流入剖面预测方法, 建立了水平井分段流动井筒网络模型, 进行了理论推导, 采用 Newton-Raphson 迭代方法求解, 并分别用 Joshi 解析公式和井筒网络模型进行产能预测。对比分析表明, 建立的井筒网络模型能够描述水平井的分段流入剖面, 对分段完井参数优化设计具有一定的指导作用。

1 水平井分段完井流入剖面模型建立

水平井完井后, 地层流体首先从油藏经过井壁(裸眼井壁、射孔孔眼或人工裂缝)进入环空, 然后经过完井工具过流通道(流入控制装置)流进完井工具中心管(基管), 最后汇流到水平井的跟端(见图 1)。

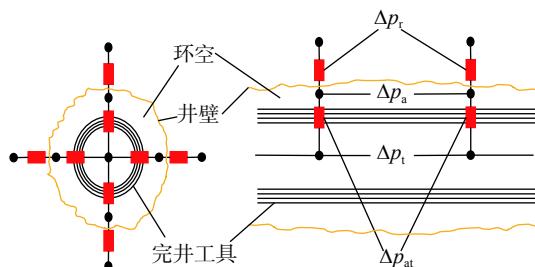


图 1 水平井完井结构示意
Fig. 1 Completion structure of horizontal well

图 1 所示的完井结构可简化成图 2 所示的基本井筒节点网络结构。其中, 最上面一排节点代表油藏, 中间一排代表完井工具与井壁形成的环空, 最下面一排代表油管(完井工具内部基管), 最左边跟端处节点为流出节点。油藏节点的压力为油藏压力 p_{res} , 流出节点压力为井底压力 p_{bh} 。各节点通过桥连接, 共分为 4 类桥: 油藏-环空桥、环空桥、环空-油管桥和油管桥, 4 类桥的压降分别为 Δp_r , Δp_a , Δp_{at} 和 Δp_t , 不同类型桥的压降计算模型不一样。

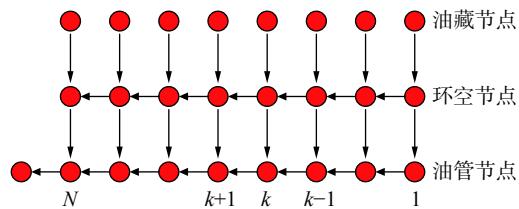


图 2 水平井井筒网络节点结构示意

Fig. 2 Schematic diagram of the network node structure in the horizontal wellbore

不同分段完井方式简化成的井筒完井网络结构不一样, 图 2 所示的井筒节点网络中油藏节点压力、跟端节点压力(或者跟端流量)为已知边界条件, 其他节点的压力和桥流量为未知量, 即需要求解的变量。

1.1 节点网络类型

从图 2 可以看出, 水平井筒节点网络结构由 3 种类型的节点网络构成。将水平井筒分成 N 段, 水平井筒跟端处为第 1 段, 组成 I 类节点网络; 水平井筒跟端处为第 N 段, 组成 III 类节点网络; 水平井筒其他位置组成 II 类节点网络。

1.1.1 I 类节点网络

起始段第 1 段为 I 类节点网络, 环空和油管节点没有上游流动桥(见图 3)。第 1 段网络总共包含 q_{rl} , q_{al} , q_{at1} , q_{tl1} , p_{al} 和 p_{tl} 等 6 个未知数, 需要 6 个方程求解未知数。从节点 2、节点 3 可以得到 2 个质量守恒方程, 从 4 条桥可以得到 4 个动量守恒方程, 总共 6 个方程。

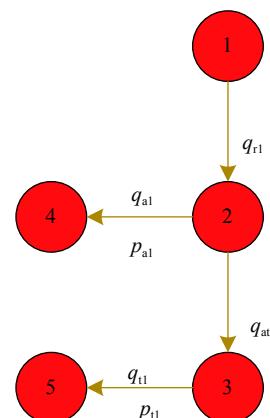


图 3 第 1 段网络结构及未知参数分布

Fig. 3 Network structure and unknown parameter distribution of the first segment

1.1.2 II 类节点网络

第 k 段($1 < k < N$)为 II 类节点网络, 第 2 段到

($N-1$)段中任意一段可以表示成如图 4 所示的网络结构, 环空和油管节点存在上游流动桥。第 k 段网络总共包含有 6 个未知数, 因此需要 6 个方程求解未知数。从节点 4、节点 5 可以得到 2 个质量守恒方程, 从除上游 2 条桥外的剩余 4 条桥可以得到 4 个动量守恒方程, 总共 6 个方程。

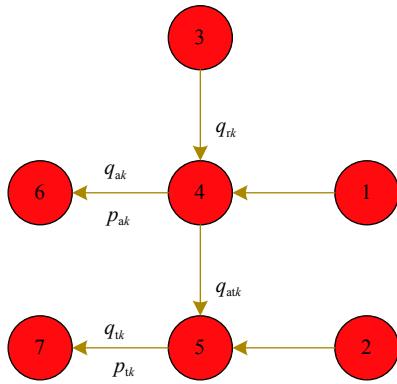


图 4 第 k 段网络结构及未知参数分布

Fig. 4 Network structure and unknown parameter distribution of the k^{th} segment

1.1.3 III 类节点网络

第 N 段为第 III 类节点网络, 图 5 所示为第 N 段网络结构图, 由于不存在第 N 段环空桥, 只有 5 个未知数。因此, 需要 5 个方程求解未知数。从节点 2、节点 3 可以得到 2 个质量守恒方程, 从 3 条桥可以得到 3 个动量守恒方程, 总共 5 个方程。

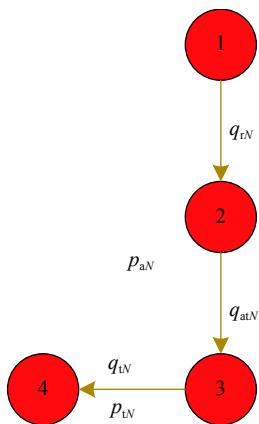


图 5 第 N 段网络结构及未知参数分布

Fig. 5 Network structure and unknown parameter distribution of the N^{th} segment

考虑流体为单相流动且流体不可压缩, 对于除了油藏节点外的每一个节点, 可以得到节点物质守恒方程为:

$$\sum_j q_{ij} = 0 \quad (1)$$

式中: q_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间流动桥的体积流量, m^3/d ; i 为计算节点; j 为与节点 i 相连的节点数。

根据动量守恒定理, 可以得到各流动桥的压降方程。其表达式为:

$$p_i - p_j = \pm f(q_{ij}) \quad (2)$$

式中: p_i, p_j 为节点压力, Pa ; $f(q_{ij})$ 为油藏-环空桥、环空桥、环空-油管桥、油管桥 4 类流动桥的流动压降 $\Delta p_r, \Delta p_a, \Delta p_{at}$ 和 Δp_t ; “+”表示 i 是上游节点; “-”表示 i 是下游节点。流动方向是未知的, 在求解时假定流动方向为正, 若计算流量结果为负, 即实际流动方向与假定流动方向相反。

1.2 流动桥压降模型

1.2.1 油藏流动模型

根据达西定律, 每段油藏流体流入环空所产生的泄流压降可表示为:

$$\Delta p_r = p_{\text{res}} - p_{ak} = \frac{q_{rk}}{J_k L_k \cos \theta} \quad (3)$$

其中

$$J_k = \frac{542.8 K_{rk}}{\mu \left[\ln \left(\frac{h I_{\text{ani}}}{r_w (I_{\text{ani}} + 1)} \right) + \frac{\pi r}{2 h I_{\text{ani}}} - 0.75 + S_K + S_R \right]} \quad (4)$$

式中: p_{res} 为油藏压力, Pa ; p_{ak} 为第 k 段环空压力, Pa ; q_{rk} 为第 k 段油藏的泄流量, m^3/d ; J_k 为第 k 段单位长度的产能指数, $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$; L_k 为第 k 段的长度, m ; θ 为井斜角, rad ; K_{rk} 为第 k 段地层渗透率, D ; μ 为流体黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; h 为地层厚度 m ; r_w 为井筒半径, m ; I_{ani} 为地层非均质系数; r 为泄油半径, m ; S_R 为渗流表皮系数^[6]; S_K 为地层损害表皮系数^[22]。

1.2.2 环空压降模型

对于环空流动, 若环空中充满地层砂或者人工充填砾石, 考虑为单相达西流动, 压降计算模型为:

$$\Delta p_a = \frac{q_{ak} \mu L_k}{A_a K_a} = \frac{10^{12} q_{ak} \mu L_k}{\pi \frac{D_w^2 - D_{to}^2}{4} K_a} \quad (5)$$

式中: Δp_a 为流体在环空中的流动压降, Pa ; q_{ak} 为第 k 段的环空流量, m^3/d ; A_a 为环空流动截面积, m^2 ; K_a 为环空渗透率, D ; D_w 为井筒直径, m ; D_{to} 为油管外径, m 。

若环空中无地层砂或者人工充填砾石, 则采用

与油管压降相同的计算模型, 此时模型中油管内径等于等效的环空水力直径。

1.2.3 节流压降模型

不同节流装置节流压降的计算模型不同, 应根据具体的节流装置选择压降模型, 对于割缝衬管或者高级优质筛管应该选择其对应的泄流系数。以喷嘴型节流装置为例, 相应的计算模型为^[23]:

$$\Delta p_{at} = \frac{\rho q_{atk}^2}{2\pi^2 C^2 D_n^2} \quad (6)$$

式中: Δp_{at} 为流体在环空与油管之间的节流装置中的节流压降, Pa; q_{atk} 为第 k 段节流装置的流量, m^3/d ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; C 为喷嘴流量系数; D_n 为节流喷嘴直径, m。

1.2.4 油管压降模型

考虑摩擦压降、加速压降和重力压降^[20], 流体在油管中的压降计算模型为:

$$\Delta p_t = \Delta p_{fric} + \Delta p_{acc} + \Delta p_g \quad (7)$$

其中 $\Delta p_{fric} = \frac{f \rho q_{tk}^2}{2\pi^2 D_{ti}^5} L_k$ (8)

$$\Delta p_{acc} = \Delta \left(\frac{16\rho}{\pi D_{ti}^4} q_{tk}^2 \right) \quad (9)$$

$$\Delta p_h = \rho g \Delta h = \rho g L_k \sin \theta \quad (10)$$

式中: Δp_t 为流体在油管中的流动压降, Pa; Δp_{fric} 为摩擦压降, Pa; Δp_{acc} 为加速度压降, Pa; Δp_g 为重力压降, Pa; f 为摩擦系数; q_{tk} 为第 k 段油管内的流量, m^3/d ; D_{ti} 为油管内径, m; g 为重力加速度, m/s^2 ; Δh 为第 $1, 2, \dots, n$ 段油管的高度差, m。

对于图 2 所示的井筒节点网络结构, 总共包含有 $6N-1$ 个未知数, 同时可以建立 $6N-1$ 个方程来求解这些未知数。

2 模型求解

由于所建立的方程组是非线性的, 而 Newton-Raphson 迭代方法求解非线性方程组具有较高的收敛速度, 所以选择该方法进行求解。但是 Newton-Raphson 方法对迭代初值选择要求高, 否则很容易不收敛。所以须对分段完井结构有清晰的了解, 给定的初值应尽可能接近实际情况。

1) 如图 2 所示, 将水平井筒划分为 N 段, 建立的 $6N-1$ 个非线性方程组为:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为所求网络模型未知量 x_1, x_2, \dots, x_n 的非线性实函数, $n=6N-1$ 。

2) $\mathbf{x}^e = (x_1^e, x_2^e, \dots, x_n^e)$ 是式(11)的一组初始近似解。

3) 将式(11)的左端在 $(x_1^e, x_2^e, \dots, x_n^e)$ 用多元泰勒公式展开, 取线性部分, 得到如下的近似方程组:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(x_1^e, x_2^e, \dots, x_n^e)}{\partial x_i} \Delta x_i^e = 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(x_1^e, x_2^e, \dots, x_n^e)}{\partial x_i} \Delta x_i^e = 0 \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(x_1^e, x_2^e, \dots, x_n^e)}{\partial x_i} \Delta x_i^e = 0 \end{cases} \quad (12)$$

得到了关于 $\Delta x_i^e = x_i - x_i^e (i = 1, 2, \dots, n)$ 的线性方程组, 同时计算如下雅克比行列式:

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{vmatrix} \quad (13)$$

当行列式不等于 0 时, 方程组有唯一解。记得到的新解为 $\mathbf{x}^{e+1} = (x_1^{e+1}, x_2^{e+1}, \dots, x_n^{e+1})$ 。

4) 根据工程要求, 给定求解精度 ε , 其条件可表示为:

$$|\mathbf{x}^{e+1} - \mathbf{x}^e| \leq \varepsilon \quad (14)$$

计算结果满足式(14)时, 计算终止。否则重复 3)、4)步, 直到满足给定精度要求为止。

为了使网络结构具有灵活性, 假设了一个桥流动指数 I_{ij} , 当流体的实际流动方向与假设的流动方向一致时, I_{ij} 取 +1; 当流体的实际流动方向与假设的流动方向相反时, I_{ij} 取 -1; 当没有流体流过桥时, I_{ij} 取 0。如环空中带有封隔器, 则带有封隔器位置处的桥系数 I_{ij} 取 0; 某段完井为盲管时, 则没有环空向油管的流量通过, 此时没有流体流过的环空-油管桥系数 I_{ij} 亦为 0, 大大增加了网络模型的适应性。

3 算例分析

某水平井水平段长度 1 000 m, 井筒直径 177.8 mm,

偏心距为 0, 油层厚度 10 m, 油层水平渗透率 100 mD, 垂直渗透率 80 mD, 原油黏度 10 mPa·s, 原油体积系数 1.01, 地层压力 20.00 MPa, 井底压力(即井筒跟端压力)15.00 MPa, 不考虑地层污染, 井筒流动压力均大于泡点压力。采用上述井筒网络模型分别对 2 种完井方法进行模拟分析。

完井方法 1 为全井筒采用筛管完井, 考虑筛管的泄流阻力, 筛管外径为 127.0 mm。假设将该水平井分成 50 段, 模拟井筒流动参数分布, 模拟结果如图 6 所示, 跟端流量(产量)为 $247.95 \text{ m}^3/\text{d}$, 油管总压降为 0.22 MPa。从流量和压力分布结果来看, 能够反映实际完井方式对井筒流动动态的影响。

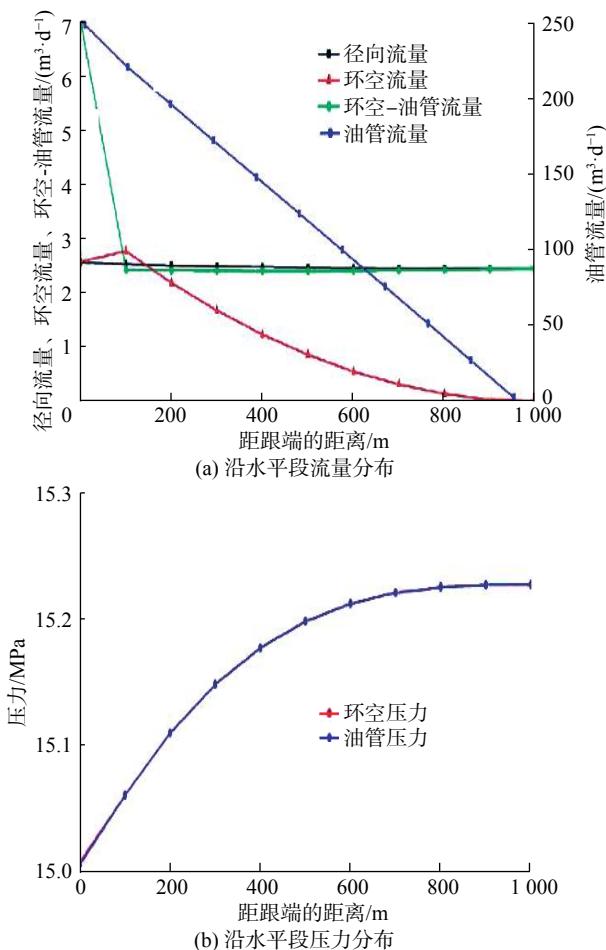


图 6 完井方法 1 的井筒节点网络模型计算结果

Fig. 6 The calculation results of wellbore node network model for completion method 1

完井方法 2 为将该水平井分成 100 段, 如图 1、图 2 所示, 跟端处安装封隔器, 从跟端起前 40 段采用盲管, 后 60 段每段安装一个节流喷嘴, 喷嘴直径为 3.0 mm, 喷嘴流量系数为 0.93。井筒流动参数分布模

拟结果如图 7 所示, 跟端流量(产量)为 $206.89 \text{ m}^3/\text{d}$, 油管总压降为 0.24 MPa。

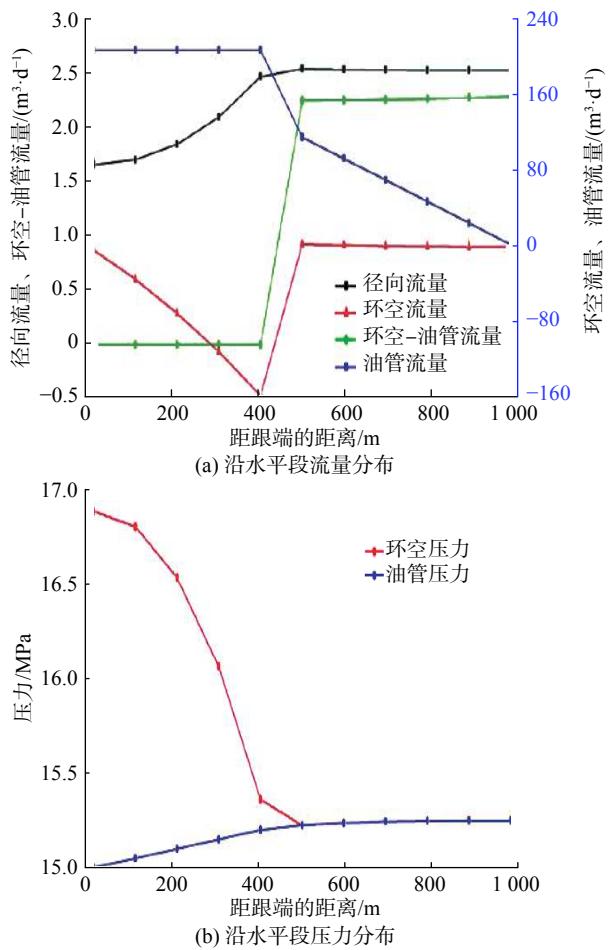


图 7 完井方法 2 的井筒节点网络模型计算结果

Fig. 7 The calculation results of wellbore node network model for completion method 2

采用目前常用的 Joshi 水平井解析产能模型^[5]对该井进行产量预测, 预测结果为 $258.23 \text{ m}^3/\text{d}$ 。对比以上结果可知, 采用井筒网络模型计算的第一种完井方法的水平井产量小于 Joshi 解析模型产量, 这是因为井筒网络模型考虑了井筒压降及筛管的泄流阻力, 所以预测的产能比 Joshi 模型小, 说明井筒网络模型预测的产量是合理的; 第二种完井方法计算的水平井产量也小于 Joshi 模型预测值, 差值比第一种完井方法大, 主要由于存在盲管段产生环空压降和节流喷嘴的节流压降所导致。从图 6、图 7 可以看出, 井筒网络模型可以对水平井复杂分段完井的环空和油管内压力、流量分布及流体流动方向进行模拟。因此, 基于产能、压力均衡等目标, 采用该模型可对分段完井参数进行优化。

4 结论与建议

1) 现有水平井半解析产能模型只考虑了地层和井筒二者的耦合, 仅仅用表皮系数表示完井方法的影响。建立的包含地层、井壁与完井工具形成的环空、完井工具的3层耦合模型, 可以分析完井结构对流体流入动态的影响。

2) 建立了水平井井筒网络模型, 并采用 Newton-Raphson 迭代法求解; 模型测试表明, 井筒网络模型模拟的压力和流量分布能够反映不同完井方式对井筒流动动态的影响, 计算结果是合理的。

3) 通过改变井筒网络模型的桥指数和压降模型, 可以对各种复杂分段完井方式进行稳态模拟。

4) 为了更加准确地模拟水平井井筒流体流动, 建议开展水平井多相流井筒网络模型研究。

参 考 文 献

References

- [1] MAALOUF C B, ZIDAN M, UIJTENHOUT M, et al. Responsive design of inflow control devices completions for horizontal wells[R]. SPE 188794, 2017.
- [2] ABDULLAYEV A, KEDIA R, URAKOV A, et al. Optimization of recovery using intelligent completions in intelligent fields(Russian)[R]. SPE 188993, 2017.
- [3] 韩来聚. 胜利油田钻井完井技术新进展及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(1): 1–9.
HAN Laiju. The latest progress and suggestions of drilling and completion techniques in the Shengli Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(1): 1–9.
- [4] 杨智光. 大庆油田钻井完井技术新进展及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(6): 1–10.
YANG Zhiguang. The latest proposals for the advancement and development of drilling and completion technology in the Daqing Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(6): 1–10.
- [5] JOSHI S D. Augmentation of well productivity using slant and horizontal wells[R]. SPE 15375, 1986.
- [6] BABU D K, ODEH A S. Productivity of a horizontal well[R]. SPE 18298, 1989.
- [7] ELGAGHAH S A, OSISANYA S O, TIAB D. A simple productivity equation for horizontal wells based on drainage area concept[R]. SPE 35713, 1996.
- [8] FURUI K, ZHU D, HILL A D. A rigorous formation damage skin factor and reservoir inflow model for a horizontal well[J]. SPE Production & Facilities, 2003, 18(3): 151–157.
- [9] DIKKEN B J. Pressure drop in horizontal wells and its effect on production performance[J]. Journal of Petroleum Technology, 1990, 42(11): 1426–1433.
- [10] OZKAN E, SARICA C, HACIISLAMOGLU M, et al. Effect of conductivity on horizontal well pressure behavior[R]. SPE 24683, 1992.
- [11] IHARA M, KIKUYAMA K, MIZUGUCHI K. Flow in horizontal wellbores with influx through porous walls[R]. SPE 28485, 1994.
- [12] 周生田, 张琪. 水平井筒压降计算方法[J]. 石油钻采工艺, 1997, 19(1): 53–59.
ZHOU Shengtian, ZHANG Qi. Calculating method of pressure drop in horizontal wellbore[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1997, 19(1): 53–59.
- [13] OUYANG Liangbiao, ARBABI S, AZIZ K. General wellbore flow model for horizontal, vertical, and slanted well completions[J]. SPE Journal, 1998, 3(2): 124–133.
- [14] CLEMO T. Flow in perforated pipes: a comparison of models and experiments[R]. SPE 89036, 2006.
- [15] OUYANG Liangbiao, AZIZ K. A simplified approach to couple wellbore flow and reservoir inflow for arbitrary well configurations [R]. SPE 48936, 1998.
- [16] PENMATCHA V R, AZIZ K. Comprehensive reservoir/wellbore model for horizontal wells[J]. SPE Journal, 1999, 4(3): 224–234.
- [17] 刘想平, 郭呈柱, 蒋志祥, 等. 油层中渗流与水平井筒内流动的耦合模型[J]. 石油学报, 1999, 20(3): 82–86.
LIU Xiangping, GUO Chengzhu, JIANG Zhixiang, et al. The model coupling fluid flow in the reservoir with flow in the horizontal wellbore[J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(3): 82–86.
- [18] 黄世军, 程林松, 赵凤兰, 等. 阶梯水平井生产段油藏渗流与井筒变质量管流的耦合模型[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2005, 20(4): 463–471.
HUANG Shijun, CHENG Linsong, ZHAO Fenglan, et al. The flow model coupling reservoir percolation and variable mass pipe flow in production section of the stepped horizontal well[J]. Journal of Hydrodynamics(Series A), 2005, 20(4): 463–471.
- [19] 庞伟, 陈德春, 张仲平, 等. 非均质油藏水平井分段变密度射孔优化模型[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 214–221.
PANG Wei, CHEN Dechun, ZHANG Zhongping, et al. Segmentally variable density perforation optimization model of horizontal wells in heterogeneous reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 214–221.
- [20] NEYLON K, REISO E, HOLMES J A, et al. Modeling well inflow control with flow in both annulus and tubing[R]. SPE 118909, 2009.
- [21] 王庆, 刘慧卿, 张红玲, 等. 油藏耦合水平井调流控水筛管优选模型[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 346–349.
WANG Qing, LIU Huiqing, ZHANG Hongling, et al. An optimization model of completion strings with inner-located nozzle in horizontal wells coupled with reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 346–349.
- [22] 庞伟. 酸性气藏深井产能试井方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(2): 67–72.
PANG Wei. Deliverability test method for deep sour gas wells[J]. Well Testing, 2018, 27(2): 67–72.
- [23] 刘成文, 李兆敏. 锥形喷嘴流量系数及水力参数的理论计算方法[J]. 钻采工艺, 2000, 23(5): 1–3.
LIU Chengwen, LI Zhaomin. A theoretical calculation method for flow rate coefficient and hydraulic parameters of conical nozzle[J]. Drilling & Production Technology, 2000, 23(5): 1–3.