

多层合采阶梯井产能计算模型的建立与求解

马 帅, 张风波, 洪楚侨, 刘双琪, 钟家峻, 王世朝

(中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057)

摘要:在阶梯井多个生产段同时对多个油层合采时产能预测难度较大。针对该问题,依据渗流力学、工程流体力学、油藏工程和数值分析有关理论,考虑油藏各向异性、渗流干扰、井筒管流压降和钻完井污染等因素,利用离散化处理方法,建立了阶梯井与薄互层油藏耦合的多层合采阶梯井产能计算模型,分析了该模型具有唯一解的充要条件,给出了求解方法。利用某三层薄互层油藏数据进行了实例计算,分析了井筒径向流率、井筒流量和井筒流压的分布规律,发现阶梯井生产过程中,井筒径向流率分布规律满足高阶偶次多项式,流量分布规律满足三次多项式,流压沿井筒呈抛物线状分布且越靠近跟端下降越快,并认为管流摩阻造成的压降和产量损失不可避免;将利用该模型计算的全井产量与 Joshi 公式的计算结果进行了对比,发现二者仅相差 1.79%。研究表明,建立的多层合采阶梯井产能计算模型的计算结果合理,为相关产能预测提供了新方法。

关键词:阶梯水平井 薄互层 耦合 数学模型 产能预测

中图分类号:TE319⁺.1; TE32⁺8 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2015)05-0094-06

Development and Solution to the Coupling Model of the Productivity of Interbedded Reservoirs in Stepped Horizontal Wells

Ma Shuai, Zhang Fengbo, Hong Chuqiao, Liu Shuangqi, Zhong Jiajun, Wang Shichao

(Zhanjiang Branch of CNOOC Ltd., Zhanjiang, Guangdong, 524057, China)

Abstract: It is difficult to forecast the production capacities of stepped horizontal wells when producing multiple reservoirs at multiple sections. On the basis of the relevant theories such as seepage mechanics, engineering fluid mechanics, reservoir engineering and numerical analysis, a new detailed coupled model of stepped wells and thin interbedded reservoirs was established by utilizing discretization processing and considering factors such as anisotropy, filtering interference, pipe flow pressure drop and contamination caused by drilling and/or completion. This productivity calculation model of multilayer commingled production of stepped wells has a unique solution. Taking a three thin interbedded reservoir as an example, we analyzed with this model the wellbore radial flow rate, wellbore flow and wellbore flow pressure distribution rules of stepped horizontal wells. Numerical simulation results showed that flow friction in the wells should not be overlooked, and the stepped horizontal well flow rate distribution presented the shape of a high-order polynomial, the flow rate distribution adhered to cubic polynomial law, flow pressure distribution stayed within parabolic limits, and pressure dropped faster at the heel section. The entire well production calculated by this model is just 1.79% less than Joshi's. It demonstrated that the calculation results for production were reasonable and provided a new method for productivity prediction of stepped horizontal wells.

Key words: stepped horizontal well; thin interbed; coupling; mathematical model; productivity forecast

阶梯水平井简称阶梯井,是由具有一定高程差的 2 个或 2 个以上水平段和连接段组成的单井筒井型^[1-3]。目前,国内有关阶梯井的产能计算模型不多,以下几个具有一定代表性:黄世军等^[4]针对有夹层的薄互层油藏提出了油藏-井筒耦合模型,首次对阶梯井的产能进行了半解析计算,得到了阶梯井的流率和流压分布剖面;陆程等^[5]针对双台阶水平井建立了简单耦合模型,通过分析影响双台阶水平井

产量的造斜角和造斜段长度等因素,给出了判断水平井是否发生倒灌回流现象的临界造斜角和临界造斜段长度,以及发生倒灌回流现象后地面井口处是

收稿日期:2015-02-12; 改回日期:2015-06-08。

作者简介:马帅(1989—),男,河南渑池人,2011 年毕业于西南石油大学石油工程专业,2014 年获西南石油大学油气田开发工程专业硕士学位,助理工程师,从事油气藏开发和产能评价工作。

联系方式:(0759)3911521, mashuai6@cnooc.com.cn。

否有产量的极限造斜角和极限造斜段长度;任嵒等^[6]建立了穿过 3 个独立断块油层的油藏-井筒耦合模型,认为物性较好的储层靠近阶梯井跟端、物性较差的储层靠近趾端的情况下产能最大。但以上模型考虑的因素不够完善,只能针对特定生产段的阶梯井,存在一定局限性,且实际运算中结果受离散化程度影响较大,故各油田常将阶梯井看作多个水平井,用 Joshi 公式^[7]进行产能预测。不过 Joshi 公式也有其不足,即在多层合采阶梯井条件下采用该公式分段求解,会忽略各微元段之间的势干扰,且仅能得到全井产量,无法得到微观井筒流入规律和流压剖面。为了能够更加准确地针对任意层合采的阶梯井进行产能计算,笔者基于流体力学、工程流体力学、油藏工程和数值分析有关理论,建立了阶梯井与薄互层油藏耦合的多层合采阶梯井产能计算模型。

1 模型的建立

以 3 层合采阶梯井为例进行说明。

1.1 假设条件

模型针对薄互层油藏建立,因此作如下假设:1)油层较薄,水平段在垂向上位于油层中部;2)仅水平段产液,连接段对产能无贡献。

1.2 离散化处理

将整个井筒水平段进行离散化处理,形成一系列长度为 L_{ws} 的微元段,由此衍生出参数 N_{seg_i} 和 N_{st} ,其表达式分别为:

$$N_{seg_i} = \text{int}\left(\frac{L_{hi}}{L_{ws}}\right) \quad (1)$$

$$N_{st} = \sum_{i=1}^{N_r} N_{seg_i} \quad (2)$$

式中: N_{seg_i} 为第 i 个水平段的微元段个数; $\text{int}()$ 为截断函数; L_{hi} 为第 i 个水平段的井筒长度, m; L_{ws} 为微元段长度, m; N_{st} 为整个阶梯井的微元段个数; N_r 为水平段的个数,即油层个数。

离散处理后,为方便表示,用 i 或 a 定位水平段,用 j 或 b 定位水平段上的某个微元段,下文中出现的下标 i, j 则表示第 i 个水平段上的第 j 个微元段,简称 i, j 微元段。

1.3 油藏渗流模型

油藏渗流过程可分为 3 个阶段:

1) 第 1 阶段,流体从油藏边界流向近井地带(理想渗流压降)^[8-9],表达式为:

$$\Delta p_{ri,j}(x, y, z) = \sum_{j=1}^{N_{seg_i}} \left[\frac{1}{4\pi K_{ai} L_{hi}} \sum_{k=-N_M}^{N_M} \ln \frac{r_{i,j,k} + L_{ws}}{r_{i,j,k} - L_{ws}} \right] \quad (3)$$

式中: $\Delta p_{ri,j}(x, y, z)$ 为流体从油藏边界到近井地带的 i, j 微元段的渗流压降, MPa; μ_{oi} 为第 i 个油层的原油黏度, mPa·s; $q_{i,j}$ 为 i, j 处的径向流量, m^3/s ; $K_{ai} = \sqrt{K_{hi} K_{vi}}$, K_{hi} 和 K_{vi} 分别为第 i 层的水平渗透率和垂直渗透率, D; N_M 为镜像反映次数; $r_{i,j,k}$ 为 i, j 微元段的第 k 次镜像反映到 i, j 微元段的距离, m。

2) 第 2 阶段,流体在近井地带流经钻完井污染带(表皮附加压降),表达式为:

$$\Delta p_{si,j} = \frac{1.824 q_{i,j} \mu_{oi}}{K_{ai} L_{ws}} S_{Di,j} \quad (4)$$

$$\text{其中 } S_{Di,j} = S_{Di,1} + \frac{(j+0.5)L_{ws}}{L_{hi}} (S_{Di,j} - S_{Di,N_{seg_i}}) \quad (5)$$

式中: $\Delta p_{si,j}$ 为流体流经近井地带到钻完井污染带的 i, j 微元段的表皮压降, MPa; h_i 为第 i 个油层的厚度, m; $S_{Di,j}$ 为 i, j 微元段处的表皮系数。

表皮模型采用圆锥剖面模型^[10]求解,需要给出水平段跟端、趾端的表皮。

3) 第 3 阶段,流体通过井壁和完井管柱之间的环空流入井筒内部压降(完井管柱压降)^[10-11],其表达式为:

$$\Delta p_{ani,j} = \frac{3.335 3 \times 10^{-6} E \rho_{oi} T_{gi}}{A_{Si}^2} q_{i,j}^2 + \frac{\mu_{oi} T_{gi}}{6.802 1 \times 10^{-6} K_{gi} A_{si}} q_{i,j} \quad (6)$$

式中: $\Delta p_{ani,j}$ 为流体流经完井管柱 i, j 微元段的附加压降, MPa; B_{oi} 为第 i 个油层中原油的体积系数; ρ_{oi} 为第 i 个油层中原油的密度, kg/m^3 ; K_{ani} 为第 i 个水平段环空填充砂的渗透率, D; K_{gi} 为第 i 个水平段砾石充填层的渗透率, D; 中间参数 E , T_{gi} 和 A_{si} 的计算方法见文献[11-12]。

这 3 个阶段都伴随有各自的压降,串联后形成了油藏渗流总压降,具体表达式为:

$$\Delta p_{fti,j} = \Delta p_{ri,j} + \Delta p_{si,j} + \Delta p_{ani,j} \quad (7)$$

式中: $\Delta p_{fti,j}$ 为油藏渗流总压降, MPa。

1.4 井筒管流模型

利用井筒管流模型模拟单相原油在井筒中的一维变质量流动,模型求解的本质是管流压降,包括沿

程摩阻压降、管流加速压降、壁面径向流动干扰压降以及高程差引起的重力压降。

1.4.1 沿程摩阻压降

i, j 微元段内管流流量的表达式为：

$$q_{wi,j} = 0.5 q_{i,j} + \sum_{a=i}^{N_r} \sum_{b=j}^{N_{seg}} q_{a,b} \quad (8)$$

式中： $q_{wi,j}$ 为 i, j 微元段内的管流流量， m^3/s 。

对应管流流速的表达式为：

$$v_{wi,j} = \left(\frac{q_{wi,j}}{1000} \right) / \left(\frac{\pi D_i^2}{4} \right) \quad (9)$$

式中： $v_{wi,j}$ 为 i, j 微元段内的流体流速， m/s ； D_i 为对应完井方式下原油实际流经截面的半径， m 。

通过流速可以计算出每个微元段的雷诺数 $Re_{i,j}$ ，其表达式为：

$$Re_{i,j} = \frac{\rho_{owi,j} v_{wi,j} D_i}{\mu_{owi,j}} \quad (10)$$

其中

$$\rho_{owi,j} = \frac{\sum_{a=i}^{N_r} \sum_{b=j}^{N_{seg}} q_{wa,b} \rho_{oa}}{\sum_{a=i}^{N_r} \sum_{b=j}^{N_{seg}} q_{wa,b}} \quad (11)$$

$$\mu_{owi,j} = \frac{\sum_{a=i}^{N_r} \sum_{b=j}^{N_{seg}} q_{wa,b} \mu_{oa}}{\sum_{a=i}^{N_r} \sum_{b=j}^{N_{seg}} q_{wa,b}} \quad (12)$$

式中： $\rho_{owi,j}$ 为 i, j 微元段内流体的密度， kg/m^3 ； $\mu_{owi,j}$ 为 i, j 微元段内流体的黏度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

由此可计算出 i, j 微元段内部管流沿程的摩阻压降，其表达式为：

$$\Delta p_{fi,j} = \frac{\lambda_{fi,j} L_{ws} \rho_{owi,j} v_{wi,j}^2}{2 D_i} C_{wfi,j} \quad (13)$$

式中： $\Delta p_{fi,j}$ 为 i, j 微元段内管流沿程摩阻压降， MPa ； $\lambda_{fi,j}$ 为微元段沿程水力摩阻系数^[13]； $C_{wfi,j}$ 为壁面流入矫正系数，计算方法见文献^[14-16]。

据此可计算出当前微元段到整个阶梯井跟端的摩阻压降，表达式为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta p_{fi,j} = 0.5 \Delta p_{fi,j} + \sum_{b=1}^j \Delta p_{fa,b} \quad (i=1) \\ \Delta p_{fi,j} = 0.5 \Delta p_{fi,j} + \sum_{a=1}^i (\Delta p_{fc(a-1)} + \sum_{b=1}^j \Delta p_{fa,b}) \quad (i>1) \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\text{其中} \quad \Delta p_{fa} = \frac{\lambda_{fa} L_{ca} \rho_{ow_{a+1,1}} v_{w(a+1,1)}^2}{2 \times 10^6 D_a} \quad (15)$$

式中： Δp_{fa} 为当前微元段到整个阶梯井跟端的摩阻

压降， MPa ； Δp_{fc} 为第 a 个连接段产生的摩阻压降， MPa ； L_{ca} 为第 a 个连接段的长度， m ； D_a 为第 a 个连接段的内径， m 。

1.4.2 加速压降

任意水平微元段流体从当前位置到 1 号水平段跟端产生的加速压降为：

$$\Delta p_{acci,j} = (\rho_{ow1,1} v_{w1,1}^2 - \rho_{owi,j} v_{wi,j}^2) \times 10^{-6} \quad (16)$$

式中： $\Delta p_{acci,j}$ 为任意水平微元段流体从当前位置到 1 号水平段跟端产生的加速压降， MPa 。

1.4.3 重力压降

任意水平微元段流体从当前位置到 1 号水平段跟端产生的重力压降为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta p_{gi,j} = 0 \quad (i=1) \\ \Delta p_{gi,j} = [0.5 \rho_{owi,j} g \sum_{a=1}^{i-1} (h_a + h_{a+1})] \times 10^{-6} \quad (i>1) \end{array} \right. \quad (17)$$

式中： $\Delta p_{gi,j}$ 为任意水平微元段流体从当前位置到 1 号水平段跟端产生的重力压降， MPa ； h_a, h_{a+1} 为第 a 个和第 $a+1$ 个储层的厚度， m 。

由此得到井筒管流总压降，具体表达式为：

$$\Delta p_{wbi,j} = \Delta p_{fi,j} + \Delta p_{acci,j} + \Delta p_{gi,j} \quad (18)$$

式中： $\Delta p_{wbi,j}$ 为井筒管流总压降， MPa 。

1.5 稳态耦合模型

油藏渗流模型和井筒管流模型不是两个独立的系统，在水平微元段中心处，两个系统的压力值相等^[17]。这就是整个耦合模型的稳态耦合条件，由此可建立线性方程组，具体表达式为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_{seg}} q_{i,j} = q_{st} \\ \Delta p_{fti,j} + \Delta p_{wbi,j} + p_{wf} = p_{ei} \end{array} \right. \quad (19)$$

式中： q_{st} 为全井段产量， m^3/s ， p_{ei} 为第 i 个油层压力， MPa 。

综上所述，建立的 3 层合采阶梯井产能计算模型如图 1 所示。

2 模型求解

欲求解式(19)，需给定 p_{wf} 或 q_{st} ，即模型求解有 2 种模式：给定 1 号水平段跟端流压 p_{wf} 模式和给定全井产量 q_{st} 模式。笔者以给定 p_{wf} 模式进行求解说明。

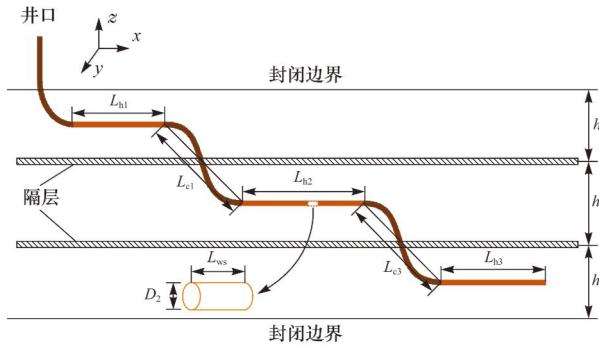


图 1 三层合采阶梯井产能计算模型示意

Fig. 1 Diagram of the productivity forecast model of stepped horizontal wells' commingled production in 3 layers

2.1 具备唯一解条件验证

式(19)可以表示为:

$$\mathbf{A}_{(N_{st}+1) \times (N_{st}+1)} \mathbf{X}_{(N_{st}+1) \times 1} = \mathbf{B}_{(N_{st}+1) \times 1} \quad (20)$$

式中:各下标均表示矩阵维数。

\mathbf{A} 为线性方程组的系数矩阵,可表示为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 & -1 \\ \mathbf{A}_1 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ 0 & \mathbf{A}_2 & \cdots & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{A}_i & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{A}_{Nr} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中:最后一列的 $\mathbf{0}$ 表示零向量,其他 $\mathbf{0}$ 表示零矩阵; \mathbf{A}_i 为第 i 个地层的系数矩阵 ($N_{seg_i} \times N_{seg_i}$)。

\mathbf{A}_i 的具体表达式为:

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \phi_{i11} & \phi_{i12} & \cdots & \phi_{i1\beta} & \cdots & \phi_{i1N_{seg_i}} \\ \phi_{i21} & \phi_{i22} & \cdots & \phi_{i2\beta} & \cdots & \phi_{i2N_{seg_i}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{ia1} & \phi_{ia2} & \cdots & \phi_{ia\beta} & \cdots & \phi_{iaN_{seg_i}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{iN_{seg_i}1} & \phi_{iN_{seg_i}2} & \cdots & \phi_{iN_{seg_i}\beta} & \cdots & \phi_{iN_{seg_i}N_{seg_i}} \end{bmatrix} \quad (22)$$

式(21)中, $\phi_{i\alpha\beta}$ 为第 i 个地层中第 β 个微元段在第 α 个微元段产生的影响系数^[7-8],具体表达式为:

$$\phi_{i\alpha\beta} = \frac{\mu_{oi}}{4\pi K_{ai} L_{hi}} \sum_{k=-N_M}^{N_M} \ln \frac{r_{\beta, \alpha, k} + L_{ws}}{r_{\beta, \alpha, k} - L_{ws}} \quad (23)$$

\mathbf{X} 为方程组的未知数矩阵,具体形式为:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1 \quad \mathbf{X}_2 \quad \cdots \quad \mathbf{X}_i \quad \cdots \quad \mathbf{X}_{Nr} \quad \mathbf{q}_{N_{st}}]^T \quad (24)$$

$$\text{其中 } \mathbf{X}_i = [q_{i1} \quad q_{i2} \quad \cdots \quad q_{ij} \quad \cdots \quad q_{iN_{seg_i}}]^T \quad (25)$$

\mathbf{B} 为方程组的常数矩阵,具体形式为:

$$\mathbf{B} = [0 \quad b_1 \quad b_2 \quad \cdots \quad b_i \quad \cdots \quad b_{Nr}]^T \quad (26)$$

$$\text{其中 } \mathbf{b}_i = [\Delta p_{i1} \quad \Delta p_{i2} \quad \cdots \quad \Delta p_{ij} \quad \cdots \quad \Delta p_{iN_{seg_i}}]^T \quad (27)$$

$$\Delta p_{i,j} = p_{ei} - (\Delta p_{si,j} + \Delta p_{ani,j} + \Delta p_{Fi,j} + \Delta p_{acci,j} + \Delta p_{gi,j} + p_{wf}) \quad (28)$$

给定 p_{wf} 后,方程组中有 q_{st} 和 $q_{i,j}$ 等 $N_{st}+1$ 个未知数,方程组中有 $N_{st}+1$ 个方程。方程与未知数个数相等,因而方程组具备唯一解的必要条件,但仍需要验证是否存在唯一解。其增广矩阵为:

$$\bar{\mathbf{A}} = [\mathbf{AB}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 & -1 & 0 \\ \mathbf{A}_1 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_2 & \cdots & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{b}_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{A}_i & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{b}_i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{A}_{Nr} & \mathbf{0} & \mathbf{b}_{Nr} \end{bmatrix} \quad (29)$$

如有唯一解,则:

$$r(\mathbf{A}) = r(\bar{\mathbf{A}}) = N_{st} + 1 \quad (30)$$

式中: $r()$ 为矩阵的秩。

2.2 迭代求解

使用列主元素消去法处理增广矩阵,来验证方程组具有唯一解,验证成功后可顺势求得阶梯水平井各个微元段的产量 $q_{i,j}^{(0)}$ 。式(19)中的 $\Delta p_{si,j}$ 、 $\Delta p_{ani,j}$ 、 $\Delta p_{Fi,j}$ 、 $\Delta p_{acci,j}$ 和 $\Delta p_{gi,j}$ 是 $q_{i,j}$ 的函数,迭代过程的首次运算中 $q_{i,j}$ 是缺失的,需对这 5 项的初值进行假设,均假设为 0,即: $\Delta p_{si,j}^{(0)} = 0$, $\Delta p_{ani,j}^{(0)} = 0$, $\Delta p_{Fi,j}^{(0)} = 0$, $\Delta p_{acci,j}^{(0)} = 0$, $\Delta p_{gi,j}^{(0)} = 0$ 。在后续迭代过程中, $\Delta p_{si,j}^{(n+1)}$ 、 $\Delta p_{ani,j}^{(n+1)}$ 、 $\Delta p_{Fi,j}^{(n+1)}$ 、 $\Delta p_{acci,j}^{(n+1)}$ 和 $\Delta p_{gi,j}^{(n+1)}$ 将依赖于前次迭代结果 $q_{i,j}^{(n)}$ 进行计算。

校核结果需满足给定的误差限:

$$|q_{i,j}^{(n+1)} - q_{i,j}^{(n)}| \leq \xi q_{i,j}^{(n)} \quad (31)$$

式中: ξ 为相对误差限系数。

3 实例计算

为更好地验证上述模型,利用某 3 层薄互层油藏数据进行了实例计算。各项参数见表 1、表 2。

表 1 油藏参数

Table 1 Reservoir parameters

层号	油层厚度/m	油层压 力/MPa	水平渗透 率/mD	垂向渗透 率/mD	原油密度/(kg·m ⁻³)	原油黏度/(mPa·s)
1	11	18.0	722	491	880	37.62
2	9	18.1	638	477	875	37.01
3	8	18.2	715	498	869	33.42

表 2 井筒参数

Table 2 Wellbore parameters

井段	井筒半径/m		井筒长度/m		井筒垂深/m		污染带半径/m		污染带渗透率/mD	
	井段	井筒半径/m	井筒长度/m	跟端	趾端	跟端	趾端	跟端	趾端	
1号水平段	0.088 90	357	1 807.0	1 807.0	0.57	0.54	136	155		
1号连接段	0.088 90	58	1 807.0	1 817.0						
2号水平段	0.069 85	546	1 817.0	1 817.0	0.49	0.43	227	268		
2号连接段	0.069 85	49	1 817.0	1 825.5						
3号水平段	0.069 85	308	1 825.5	1 825.5	0.33	0.28	470	493		

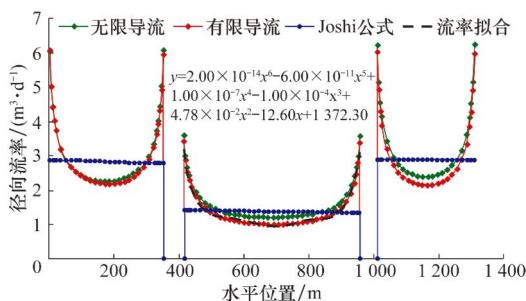


图 2 井筒径向流率分布规律

Fig. 2 Radial flow rate distribution profiles

从图 2 可以看出, 阶梯井径向流率呈现 U 形分布组合, 井筒跟端流率最大, 中间段流率最小; 而 Joshi 公式没有考虑井筒微元段之间的干扰, 离散处理后得到的流率是均匀分布的。拟合中间段流率, 得到高阶偶数次多项式函数, 两端值达到中间的 3 倍。

井筒流量分布剖面见图 3。

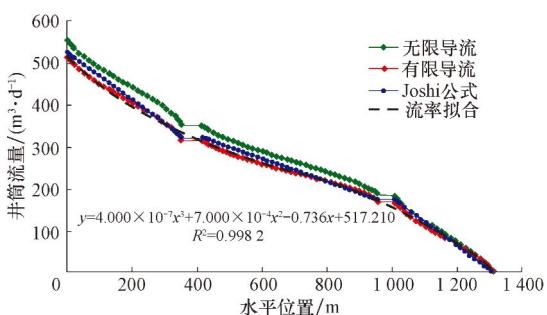


图 3 井筒流量分布规律

Fig. 3 Cumulative flow distribution profiles

L_{ws} 取 5 m, N_M 取 4, ξ 取 0.5%, 给定跟端流压 16 MPa, 可计算得到流率、流量和流压沿井筒方向的剖面。同时, Joshi 公式虽然难以反映井筒流入流规律, 但具有对水平井全井段产量预测准确度高的特点, 因此采用 Joshi 公式对 3 个水平段的生产进行了离散化模拟对比。

井筒径向流率分布剖面见图 2。

表 2 井筒参数

Table 2 Wellbore parameters

由图 3 可知, 与流率分布相反, 越靠近跟端, 摩阻造成的流量损失越大。该实例条件下, 摩阻造成减产 39.11 m³/d。与 Joshi 公式进行对比, 二者所得流量分布规律一致, 且全井产量相差仅为 1.79%, 说明该模型的预测结果是合理的。对全井段进行拟合, 认为其流量分布遵循三次多项式规律, 即跟端高、趾端低。

井筒流压分布剖面见图 4。

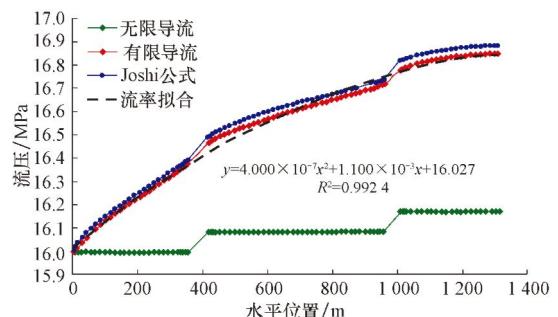


图 4 井筒流压分布规律

Fig. 4 Flowing pressure distribution profiles

由图 4 可知, 流压在跟端没有损失, 摩阻导致越远离跟端流压损失越多。该实例条件下, 摩阻造成趾端损失流压 0.68 MPa。由于 Joshi 公式计算的产量比多层合采阶梯井产能计算模型稍高, 故其流压也相对较高, 但二者分布规律一致, 证明了该模型是合理的。对全井段进行拟合, 认为其流压呈抛物线分布, 即越靠近跟端流量越大, 流压越低且降低趋势逐渐增大, 该实例跟端斜率为趾端的 21 倍, 全井

有 1/2 的流压消耗在前 1/4 井段。

4 结论与建议

1) 采用离散化手段建立了多层合采阶梯井产能计算模型, 该模型考虑了表皮系数、完井方式、层间原油物性差异等的影响, 且能够对任意层合采的阶梯井进行产量计算。

2) 求解多层合采阶梯井产能计算模型得到了阶梯井井筒流入规律, 即呈高阶偶次多项式的形态, 且每个阶梯中, 跟端流率通常达到中间段的 3 倍, 这表明在该类井完井或调剖设计时有必要对井筒进行分段处理。

3) 全井产量计算值与 Joshi 公式的计算结果相差仅为 1.79%, 流压剖面与 Joshi 公式一致, 说明了该模型的合理性; 流量剖面呈三次多项式分布, 流压剖面呈抛物线状分布; 由于跟端流体大量汇集, 导致大部分流压消耗在靠近跟端的井段, 故开发边底水油藏时应预防水体在跟端突破。

参 考 文 献

References

- [1] 冯志明, 颜金玲. 阶梯水平井钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(5): 22-26.
Feng Zhiming, Jie Jinling. Stepped horizontal drilling technology [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2000, 22(5): 22-26.
- [2] 王爱国, 王敏生, 牛洪波, 等. 深部薄油层、双阶梯水平井钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(2): 5-8.
Wang Aiguo, Wang Minsheng, Niu Hongbo, et al. Horizontal drilling technology of two-stage in deep thin reservoir [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(2): 5-8.
- [3] 荣宁, 吴迪, 韩易龙, 等. 微地震监测水驱前缘技术在哈得双台阶水平井的应用效果评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(2): 94-96.
Rong Ning, Wu Di, Han Yilong, et al. Application evaluation of microearthquake monitoring waterflood front technique used to double step horizontal wells in Hade Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(2): 94-96.
- [4] 黄世军, 程林松, 赵凤兰, 等. 薄互层油藏中阶梯水平井产能评价模型研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(3): 60-65.
Huang Shijun, Cheng Linsong, Zhao Fenglan, et al. The productivity evaluation model of the stepped horizontal well in thin interbedded reservoirs [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(3): 60-65.
- [5] 陆程, 丁一萍, 关云东, 等. 双台阶水平井产能的确定方法[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(5): 82-85.
Lu Cheng, Ding Yiping, Guan Yundong, et al. The study on productivity of stepped horizontal well [J]. Petroleum Geology, 2009, 16(5): 82-85.
- [6] 任岚, 赵金洲, 胡永全, 等. 断块油藏中阶梯水平井的渗流特性[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 107-112.
Ren Lan, Zhao Jinzhou, Hu Yongquan, et al. Seepage characteristics of stepped horizontal wells in fault-block reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 107-112.
- [7] Joshi S D. Augmentation of well productivity with slant and horizontal wells (includes associated papers 24547 and 25308) [J]. Journal of Petroleum Technology, 1988, 40(6): 729-739.
- [8] 程林松. 高等渗流力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 336-346.
Cheng Linsong. Advanced percolation mechanics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 336-346.
- [9] 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.
- [10] Frick T P, Economides M J. State-of-the-art in the matrix stimulation of horizontal wells [J]. SPE Advanced Technology Series, 1996, 4(1): 94-102.
- [11] 熊友明, 潘迎德. 裸眼系列完井方式下水平井产能预测研究[J]. 西南石油学院学报, 1997, 19(2): 42-46.
Xiong Youming, Pan Yingde. Study on productivity prediction of the horizontal wells with open hole series of completion methods [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1997, 19(2): 42-46.
- [12] Ouyang Liangbiao, Bill Huang W S. A comprehensive evaluation of well-completion impacts on the performance of horizontal and multilateral wells [R]. SPE 96530, 2005.
- [13] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986: 128-131.
Yuan Enxi. Engineering fluid mechanics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986: 128-131.
- [14] Ouyang Liangbiao, Arbab Sepehr, Aziz Khalid. A single-phase wellbore-flow model for horizontal, vertical, and slanted wells [R]. SPE 36608, 1998.
- [15] Ouyang Liangbiao, Aziz Khalid. A simplified approach to couple wellbore flow and reservoir inflow for arbitrary well configurations [R]. SPE 48936, 1998.
- [16] 曾祥林, 林玲, 杜志敏, 等. 考虑井壁径向流入的大位移井筒压降计算[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(6): 40-43.
Zeng Xianglin, Lin Ling, Du Zhimin, et al. Wellbore pressure drop calculation considering the radial inflow through wall in the extended reach well [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(6): 40-43.
- [17] 耿正玲, 崔传智, 杨赤宸, 等. 各向异性油藏油水两相流水平井产能计算[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(12): 119-122, 156.
Geng Zhengling, Cui Chuanzhi, Yang Chichen, et al. Productivity calculation of horizontal well in two phase anisotropy reservoirs [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(12): 119-122, 156.