

文章编号:1673-5005(2010)02-0083-06

考虑多段流动耦合的鱼骨刺井产能评价模型

黄世军¹, 程林松¹, 赵凤兰², 李春兰¹

(1. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学 提高采收率中心, 北京 102249)

摘要:根据实际油藏中鱼骨刺井井眼轨迹的三维空间展布特征,建立上下封闭边界油藏中鱼骨刺井生产段油藏渗流数学模型,考虑主井眼与分支井眼完井方式和井筒内流动损失,形成主井眼生产段井筒内变质量管流、主井眼生产段近井油藏渗流、分支井眼生产段井筒内变质量管流和分支井眼生产段近井油藏渗流耦合作用的鱼骨刺井产能评价模型,并进行应用分析。结果表明:鱼骨刺井生产时,主井眼生产段沿程压降呈非线性增加,分支井眼与主井眼生产段交汇处存在压降突变点;主井眼与分支井眼生产段的势相互干扰,主井眼生产段径向流量分布呈两端高、中间低、交汇点处减小的特征,而分支井眼沿程径向流量呈跟端低、中间逐渐增大、指端高的特点。

关键词:鱼骨刺井; 多段流动; 耦合模型; 产能评价; 流动分析

中图分类号:TE 355 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2010.02.017

Production evaluation model of fishbone well considering coupling among multi-segments flow

HUANG Shi-jun¹, CHENG Lin-song¹, ZHAO Feng-lan², LI Chun-lan¹

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. EOR Center in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: A new percolation model near production section of fishbone bore in closed boundary reservoir was established based on the 3-D spatial description of fishbone well trajectory. Based on the completion methods and flow loss of main bore and laterals, a production evaluation model was formed on considering coupling influence between percolation in reservoir and variable mass pipe flow in production section wellbore and the interference between laterals and main bore. And the model was applied and analyzed. The results show that the pressure drop distribution along main section is non-linear increase, and the pressure drop changes suddenly in the point of main and lateral intersection. And the radial flow distribution along main production section shows the characteristics of high at heel end and toe end, low at midium part and decrease at intersection. But the radial flow distribution along lateral production section shows the characteristics of high at heel end, inscrease at midium part and high at toe end.

Key words: fishbone well; multi-segments flow; coupling model; production evaluation; flow analysis

随着复杂油气田开发技术的深入发展,包括水平井、鱼骨刺井和多分支井在内的复杂结构井逐渐在难开发油藏中应用^[1-3],相对常规直井和水平井而言,鱼骨刺井的井眼结构较复杂,而目前针对该种井型进行近井渗流特征和产能评价的研究相对较少。Salas^[4]将鱼骨刺井各分支生产段分成若干小段,在假设各小段具有无限导流能力的基础上建立了鱼骨

刺井单相流产能解析模型,但没有考虑分支间的干扰;Retnanto^[5]提出用“形状因子”表征鱼骨刺井的几何分布及形态,并分析了分支数与产能之间的关系,而所建立的产能模型中没有考虑生产段变质量管流和非生产段多相管流对近井油藏地带流动的影响;Ouyang^[6-7]以及韩国庆等^[8]提出了形式类似的适合任意结构多分支井产能计算的半解析模型,刘

收稿日期:2009-07-03

基金项目:国家自然科学基金项目(50804052)

作者简介:黄世军(1974-),男(汉族),河南新郑人,讲师,博士,研究方向为油气田渗流机理与应用、复杂结构井开发理论。

想平等^[9]推导了鱼骨型多分支井生产时地层内压力分布,并建立了考虑多分支井筒内压降影响的向井流动态关系数学模型,但模型中仅考虑了生产段沿程压降对近井地带油藏势分布的影响,没有考虑分支井眼内流体汇流以及分支井眼非生产段内流动对产量的影响;文献[10]中针对多段流动耦合的鱼骨刺井近井渗流特征进行了研究,但仅考虑了主井眼与分支井眼的势干扰,且假设鱼骨刺井水平分布和分支井眼不存在沿程压力降。笔者基于鱼骨刺井生产段三维空间油藏势干扰,结合微元线汇思想,考虑该种井型生产时各生产段的相互影响,建立多段流动耦合的鱼骨刺井产能评价模型,并对该模型进行应用分析。

1 鱼骨刺井近井油藏渗流模型

1.1 鱼骨刺井生产段的空间特征描述

以鱼骨刺井井口在 xoy 平面的投影点为坐标原点,设 z 坐标零点为井眼最大垂直井深,建立如图 1 所示的空间三维 $oxyz$ 坐标系。

设鱼骨刺井生产段起始坐标为 $M_0(x_{m0}, y_{m0}, z_{m0})$,主井眼长度为 L_m ,主井眼划分为 M 段微元段,则每一微元段长度 $\Delta L_m = L_m/M$ 。设鱼骨刺井分支数为 N ,第 $j(j = 1, 2, \dots, N)$ 分支长度为 L_j ,划分线汇段数为 T_j ,则该分支微元段长度 $\Delta L_j = L_j/T_j$ 。

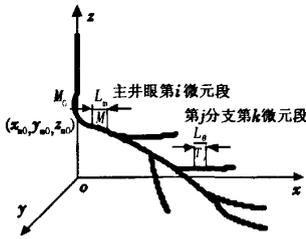


图 1 鱼骨刺井三维空间分布示意图

Fig. 1 3D spatial distribution of fishbone well

按照钻完井工艺标准,三维空间中表征某一井点的相对坐标数学描述包括垂深、井斜角 θ 以及方位角 α 。鱼骨刺井主井眼生产段的第 $i(i = 1, 2, \dots, M)$ 微元段上任意点坐标 $M_i(x_{mi}, y_{mi}, z_{mi})$ 可以表示为

$$x_{mi} = x_{m0} + \Delta L_m \left[\sum_{k=1}^{i-1} (\sin \theta_{mk} \cos \alpha_{mk}) + t \sin \theta_{mi} \cos \alpha_{mi} \right],$$

$$y_{mi} = y_{m0} + \Delta L_m \left[\sum_{k=1}^{i-1} (\sin \theta_{mk} \sin \alpha_{mk}) + t \sin \theta_{mi} \sin \alpha_{mi} \right],$$

$$z_{mi} = z_{m0} + \Delta L_m \left[\sum_{k=1}^{i-1} \cos \theta_{mk} + t \cos \theta_{mi} \right], \quad 0 \leq i \leq M,$$

$$z_{mi} = z_{m0} + \Delta L_m \left[\sum_{k=1}^{i-1} \cos \theta_{mk} + t \cos \theta_{mi} \right], \quad 0 \leq i \leq N,$$

$0 \leq t \leq 1$ 。

式中, t 表示分支井眼微元段上任意点在该微元段的相对位置, $t = 0, 1$ 分别为该段的起点和终点。

以 $M_0(x_{m0}, y_{m0}, z_{m0})$ 为参照点,鱼骨刺井第 j 分支井眼生产段第 $k(k = 1, 2, \dots, N)$ 微元段上任意一点坐标 $R_{jk}(x_{j,k}, y_{j,k}, z_{j,k})$ 可表示为

$$x_{j,k} = x_{m0} + \Delta L_m \sum_{k=1}^S (\sin \theta_{mk} \cos \alpha_{mk}) + \Delta L_j \times \left[\sum_{v=1}^{k-1} (\sin \theta_{j,v} \cos \alpha_{j,v}) + t \sin \theta_{j,k} \cos \alpha_{j,k} \right] + \delta_{xj},$$

$$y_{j,k} = y_{m0} + \Delta L_m \sum_{k=1}^S (\sin \theta_{mk} \sin \alpha_{mk}) + \Delta L_j \times \left[\sum_{v=1}^{k-1} (\sin \theta_{j,v} \sin \alpha_{j,v}) + t \sin \theta_{j,k} \sin \alpha_{j,k} \right] + \delta_{yj},$$

$$z_{j,k} = z_{m0} + \Delta L_m \sum_{k=1}^S \cos \theta_{mk} + \Delta L_j \left(\sum_{v=1}^{k-1} \cos \theta_{j,v} + t \cos \theta_{j,k} \right) + \delta_{zj}, \quad 1 \leq k \leq T_j, 1 \leq j \leq N.$$

式中, S 取 $L_m/\Delta L_m$ 的整数部分; δ_x, δ_y 和 δ_z 为计算偏差修正值,分别取 $L_m - S\Delta L_m$ 在 x, y, z 轴上的投影。

1.2 鱼骨刺井近井油藏渗流模型

假设:主井眼与分支井眼生产段处于同一套压力系统,即考虑二者的势干扰;均质、各向异性油藏,储层内流体流动符合等温线性渗流规律;主井眼采用套管完井或裸眼完井,考虑井筒内流动损失,即近井油藏渗流与主井眼井筒内流动存在耦合作用;分支井眼采用裸眼完井,考虑井筒内流动损失,即近井油藏渗流与分支井眼井筒内流动存在耦合作用。

对于鱼骨刺井而言,主井眼和分支井眼单独生产时近井地带势分布与常规水平井类似^[10-11],鱼骨刺井主井眼单独生产时在无限大地层中任意点 $M(x, y, z)$ 所产生的势^[10] $\Phi_m(x, y, z')$ 为

$$\Phi_m(x, y, z') = \frac{-1}{4\pi\Delta L_m} \sum_{i=1}^M \left[q_{mr}(i) \ln \frac{r_{1mi} + r_{2mi} + \Delta L'_{mi}}{r_{1mi} + r_{2mi} - \Delta L'_{mi}} \right] + C.$$

其中

$$r_{1mi} = \sqrt{(x_{mi}|_{t=0} - x)^2 + (y_{mi}|_{t=0} - y)^2 + (z'_{mi}|_{t=0} - z')^2},$$

$$r_{2mi} = \sqrt{(x_{mi}|_{t=1} - x)^2 + (y_{mi}|_{t=1} - y)^2 + (z'_{mi}|_{t=1} - z')^2},$$

$$\Delta L'_{mi} = \Delta L_m \sqrt{\beta^2 \cos^2 \theta_{mi} + \frac{1}{\beta^2} \sin^2 \theta_{mi}},$$

$$\beta = \sqrt{k_h/k_v}, \quad z' = \beta z.$$

式中, $q_{mr}(i)$ 为鱼骨刺井主井眼生产段第 i 微元段径

向流量, m^3/d ; k_h 和 k_v 分别为油藏水平和垂向渗透率, $10^{-3} \mu m^2$ 。

鱼骨刺井第 j 分支井眼单独生产时在无限大地层中任意点 $M(x, y, z)$ 所产生的势^[10] 为

$$\Phi_j(x, y, z') = \frac{-1}{4\pi\Delta L'_{\bar{y},k}} \sum_{k=1}^{T_j} \left[q_{fr}(j, k) \ln \frac{r_{1\bar{y},k} + r_{2\bar{y},k} + \Delta L'_{\bar{y},k}}{r_{1\bar{y},k} + r_{2\bar{y},k} - \Delta L'_{\bar{y},k}} \right] + C.$$

式中, $q_{fr}(j, k)$ 为鱼骨刺井第 j 分支生产段第 k 微元段径向流量, m^3/d ; $r_{1\bar{y},k}, r_{2\bar{y},k}, \Delta L'_{\bar{y},k}$ 表达式与 $r_{1mi}, r_{2mi}, \Delta L'_{mi}$ 的类似。

当主井眼与分支井眼同时生产时,二者存在势的干扰,根据镜像反映原理和势叠加原理,可得到封闭边界油藏中鱼骨刺井生产段在 $M(x, y, z')$ 点所产生的势为

$$\Phi(x, y, z') = \frac{-1}{4\pi} \left\{ \sum_{j=1}^N \left[\frac{1}{\Delta L'_{\bar{y},k}} \sum_{k=1}^{T_j} (q_{fr}(j, k) \varphi_{\bar{y},k}(x, y, z')) \right] + \frac{1}{\Delta L_m} \sum_{i=1}^M [q_{mr}(i) \varphi_{mi}(x, y, z')] \right\} + C.$$

$\varphi_{\bar{y},k}(x, y, z'), \varphi_{mi}(x, y, z')$ 分别为与封闭边界油藏中鱼骨刺井分支井眼微元段、主井眼微元段有关的函数,表达式分别为

$$\varphi_{\bar{y},k} = \xi_{\bar{y},k}(z'_{\bar{y},k} \Big|_{t=0}, z'_{\bar{y},k} \Big|_{t=1}, x, y, z') + \xi_{j,k}(-z'_{\bar{y},k} \Big|_{t=0}, -z'_{\bar{y},k} \Big|_{t=1}, x, y, z') + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\xi_{\bar{y},k}(2nh' + z'_{\bar{y},k} \Big|_{t=0}, 2nh' + z'_{\bar{y},k} \Big|_{t=1}, x, y, z') + \xi_{\bar{y},k}(-2nh' + z'_{\bar{y},k} \Big|_{t=0}, -2nh' + z'_{\bar{y},k} \Big|_{t=1}, x, y, z') + \xi_{\bar{y},k}(2nh' - z'_{\bar{y},k} \Big|_{t=0}, 2nh' - z'_{\bar{y},k} \Big|_{t=1}, x, y, z') + \xi_{\bar{y},k}(-2nh' - z'_{\bar{y},k} \Big|_{t=0}, -2nh' - z'_{\bar{y},k} \Big|_{t=1}, x, y, z') \right] + \frac{2\Delta L'_{\bar{y}}}{nh'},$$

$$\varphi_{mi} = \xi_{mi}(z'_{mi} \Big|_{t=0}, z'_{mi} \Big|_{t=1}, x, y, z') + \xi_{mi}(-z'_{mi} \Big|_{t=0}, -z'_{mi} \Big|_{t=1}, x, y, z') + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\xi_{mi}(2nh' + z'_{mi} \Big|_{t=0}, 2nh' + z'_{mi} \Big|_{t=1}, x, y, z') + \xi_{mi}(-2nh' + z'_{mi} \Big|_{t=0}, -2nh' + z'_{mi} \Big|_{t=1}, x, y, z') + \xi_{mi}(2nh' - z'_{mi} \Big|_{t=0}, 2nh' - z'_{mi} \Big|_{t=1}, x, y, z') + \xi_{mi}(-2nh' - z'_{mi} \Big|_{t=0}, -2nh' - z'_{mi} \Big|_{t=1}, x, y, z') \right] + \frac{2\Delta L'_{mi}}{nh'}$$

其中

$$\xi_{\bar{y},k}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, x, y, z') = \ln \frac{r_{1\bar{y},k} + r_{2\bar{y},k} + \Delta L'_{\bar{y},k}}{r_{1\bar{y},k} + r_{2\bar{y},k} - \Delta L'_{\bar{y},k}};$$

$$\xi_{mi}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, x, y, z') = \ln \frac{r_{1mi} + r_{2mi} + \Delta L'_{mi}}{r_{1mi} + r_{2mi} - \Delta L'_{mi}}.$$

设供给边界处的势为 Φ_e , 压力为 p_e , 可得到鱼骨刺井生产段沿程径向流量 $q_{mr}(i), q_{fr}(j, k)$ 与流压 $p_{wf,m}(i), p_{wf,f}(j, k)$ ($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq T_j$) 的渗流数学模型为

$$\begin{bmatrix} A_{\sum_{j=1}^N T_j \times \sum_{k=1}^{T_j}} & B_{\sum_{j=1}^N T_j \times M} \\ C_{M \times \sum_{j=1}^N T_j} & D_{M \times M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{q_{fr}(1,1)}{\Delta L_{\bar{y}}} \\ \frac{q_{fr}(1,2)}{\Delta L_{\bar{y}}} \\ \vdots \\ \frac{q_{fr}(1,T_1)}{\Delta L_{\bar{y}}} \\ \vdots \\ \frac{q_{fr}(N,T_N)}{\Delta L_{\bar{y}}} \\ \frac{q_{mr}(1)}{\Delta L_m} \\ \frac{q_{mr}(2)}{\Delta L_m} \\ \vdots \\ \frac{q_{mr}(M)}{\Delta L_m} \end{bmatrix} = \lambda_o \begin{bmatrix} p_e - p_{wf,f}(1,1) \\ p_e - p_{wf,f}(1,2) \\ \vdots \\ p_e - p_{wf,f}(1,T_1) \\ \vdots \\ p_e - p_{wf,f}(N,T_N) \\ p_e - p_{wf,m}(1) \\ p_e - p_{wf,m}(2) \\ \vdots \\ p_e - p_{wf,m}(M) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\lambda_o = \frac{1.0858 \times 10^{-3} \sqrt{k_h k_v}}{\mu_o}$$

$$\begin{aligned}
 A_{\sum_{j=1}^N T_j \times \sum_{j=1}^N T_j} &= \begin{bmatrix} \varphi_{f(1,1)(1,1)} - \varphi_{fe(1,1)} & \cdots & \varphi_{f(1,1)(1,T_1)} - \varphi_{fe(1,T_1)} & \varphi_{f(1,1)(2,1)} - \varphi_{fe(2,1)} & \cdots & \varphi_{f(1,1)(N,T_N)} - \varphi_{fe(N,T_N)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varphi_{f(1,T_1)(1,1)} - \varphi_{fe(1,1)} & \cdots & \varphi_{f(1,T_1)(1,T_1)} - \varphi_{fe(1,T_1)} & \varphi_{f(1,T_1)(2,1)} - \varphi_{fe(2,1)} & \cdots & \varphi_{f(1,T_1)(N,T_N)} - \varphi_{fe(N,T_N)} \\ \varphi_{f(2,1)(1,1)} - \varphi_{fe(1,1)} & \cdots & \varphi_{f(2,1)(1,T_1)} - \varphi_{fe(1,T_1)} & \varphi_{f(2,1)(2,1)} - \varphi_{fe(2,1)} & \cdots & \varphi_{f(2,1)(N,T_N)} - \varphi_{fe(N,T_N)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varphi_{f(N,T_N)(1,1)} - \varphi_{fe(1,1)} & \cdots & \varphi_{f(N,T_N)(1,T_1)} - \varphi_{fe(1,T_1)} & \varphi_{f(N,T_N)(2,1)} - \varphi_{fe(2,1)} & \cdots & \varphi_{f(N,T_N)(N,T_N)} - \varphi_{fe(N,T_N)} \end{bmatrix}, \\
 B_{\sum_{j=1}^N T_j \times M} &= \begin{bmatrix} \varphi_{f(1,1)m(1)} - \varphi_{fem(1)} & \varphi_{f(1,1)m(2)} - \varphi_{fem(2)} & \cdots & \varphi_{f(1,1)m(M)} - \varphi_{fem(M)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varphi_{f(1,T_1)m(1)} - \varphi_{fem(1)} & \varphi_{f(1,T_1)m(2)} - \varphi_{fem(2)} & \cdots & \varphi_{f(1,T_1)m(M)} - \varphi_{fem(M)} \\ \varphi_{f(2,1)m(1)} - \varphi_{fem(1)} & \varphi_{f(2,1)m(2)} - \varphi_{fem(2)} & \cdots & \varphi_{f(2,1)m(M)} - \varphi_{fem(M)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varphi_{f(N,T_N)m(1)} - \varphi_{fem(1)} & \varphi_{f(N,T_N)m(2)} - \varphi_{fem(2)} & \cdots & \varphi_{f(N,T_N)m(M)} - \varphi_{fem(M)} \end{bmatrix}, \\
 C_{m \times \sum_{j=1}^N T_j} &= \begin{bmatrix} \varphi_{m(1)f(1,1)} - \varphi_{mef(1,1)} & \cdots & \varphi_{m(1)f(1,T_1)} - \varphi_{mef(1,T_1)} & \varphi_{m(1)f(2,1)} - \varphi_{mef(2,1)} & \cdots & \varphi_{m(1)f(N,T_N)} - \varphi_{mef(N,T_N)} \\ \varphi_{m(2)f(1,1)} - \varphi_{mef(1,1)} & \cdots & \varphi_{m(2)f(1,T_1)} - \varphi_{mef(1,T_1)} & \varphi_{m(2)f(2,1)} - \varphi_{mef(2,1)} & \cdots & \varphi_{m(2)f(N,T_N)} - \varphi_{mef(N,T_N)} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varphi_{m(M)f(1,1)} - \varphi_{mef(1,1)} & \cdots & \varphi_{m(M)f(1,T_1)} - \varphi_{mef(1,T_1)} & \varphi_{m(M)f(2,1)} - \varphi_{mef(2,1)} & \cdots & \varphi_{m(M)f(N,T_N)} - \varphi_{mef(N,T_N)} \end{bmatrix}, \\
 D_{M \times M} &= \begin{bmatrix} \varphi_{m(1)m(1)} - \varphi_{mem(1)} & \varphi_{m(1)m(2)} - \varphi_{mem(2)} & \cdots & \varphi_{m(1)m(M)} - \varphi_{mem(M)} \\ \varphi_{m(2)m(1)} - \varphi_{mem(1)} & \varphi_{m(2)m(2)} - \varphi_{mem(2)} & \cdots & \varphi_{m(2)m(M)} - \varphi_{mem(M)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varphi_{m(M)m(1)} - \varphi_{mem(1)} & \varphi_{m(M)m(2)} - \varphi_{mem(2)} & \cdots & \varphi_{m(M)m(M)} - \varphi_{mem(M)} \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

式中, $p_{wf,f}(j,k)$ 和 $p_{wf,m}(i)$ 分别为鱼骨刺井第 j 分支井眼生产段第 k 微元段以及主井眼生产段第 i 微元段井壁处的压力, MPa; λ_0 为单位长度微元线汇的传导系数, $m^3/(d \cdot \text{MPa})$; μ_0 为流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

2 鱼骨刺井生产段沿程流动分析模型

鱼骨刺井生产时, 分支井眼和主井眼井筒内流动损失都要考虑, 因此沿程流动分析分为分支井眼和主井眼生产段沿程流动分析。

2.1 分支井眼生产段沿程流动分析模型

对于 N 分支鱼骨刺井, 将分支井眼生产段划分为 T_j 个微元段 ($1 \leq j \leq N$), 设分支井眼跟端(即分支井眼与主井眼生产段并筒交汇点)的流压为 $p_{wf,f}(j,0)$, 由水平井生产段沿程流动分析模型^[11], 得到鱼骨刺井第 j 分支生产段沿程流动分析模型为

$$\Delta p_{wf,f}(j,k) = \frac{L_j}{N_j} \left\{ \frac{2.7146 \times 10^{-14} \rho}{D_j^5} [f_{2j,k} \phi + f_{1j,k} (1 - \phi)] \left[2q_n(j,k) - q_{fr}(j,k) \frac{L_j}{N_j} \right]^2 + \frac{\rho g \cos \theta_{j,k}}{1000} + \frac{2.1717 \times 10^{-14} \rho q_{fr}(j,k) \left[2q_n(j,k) - q_{fr}(j,k) \frac{L_j}{N_j} \right]}{D_j^3} \right\},$$

$$1 \leq k \leq T_j, 1 \leq j \leq N. \tag{2}$$

式中, $\Delta q_{wf,f}(j,k)$ 为第 j 分支生产段第 k 微元段的压降损失, MPa; $f_{2j,k}$ 和 $f_{1j,k}$ 分别为裸眼完井鱼骨刺井生产段第 j 分支第 k 微元段并筒管壁摩擦因数和流体径向流入生产段井筒所造成的微元段摩擦阻力系数; D_j 为第 j 分支井筒直径, m ; $q_{fr}(j,k)$ 和 $q_n(j,k)$ 分别为第 j 分支生产段第 k 微元段径向流入量和并筒内轴向流量, m^3/d ; ϕ 为孔隙度。

鱼骨刺井分支井眼生产段沿程流量满足以下关系:

$$q_n(j,k) = q_{fr}(j,k) + q_n(j,k-1). \tag{3}$$

鱼骨刺井分支井眼生产段跟端流压为 $p_{wf,f}(j,k) = p_{wf,m}(j,k-1) + 0.5[\Delta p_{wf,f}(j,k-1) + \Delta p_{wf,f}(j,k)]$, $1 \leq j \leq N, 2 \leq k \leq T_j + 1$ 。

$$\begin{aligned}
 p_{wf,f}(j,1) &= p_{wf,f}(j,0) + 0.5 \Delta p_{wf,f}(j,1), \\
 \Delta p_{wf,f}(j, T_j + 1) &= 0.
 \end{aligned}$$

2.2 主井眼生产段沿程流动分析模型

主井眼生产段沿程流动分析模型^[10] 为 $\Delta p_{wf,m}(i) = \frac{\rho L_m}{M} \left\{ \frac{[f_{2m,i} \phi + f_{1m,i} (1 - \phi)] [2q_{im}(i) - q_{rm}(i)]^2}{D_m^5} + \right.$

$$\frac{g \cos \theta_m}{10^3} + \frac{M q_m(i)}{L_m D_m^4} [2q_m(i) - q_m(i)] \}, 1 \leq i \leq M. \quad (5)$$

鱼骨刺井生产段主井筒沿程流量满足以下关系:

$$q_m(i) = \sum_{s=1}^M q_m(s) + \sum_{j=v}^N \sum_{k=1}^{T_j} q_r(j,k), 1 \leq i \leq M. \quad (6)$$

式中, i 和 v 符合关系式 $i = \sum_{s=v}^{w+1} m_s$, 其中 m_s 为主井筒生产段被分支井眼汇流点间隔开的部分所划分的微元段数, 有 $M = \sum_{s=1}^{w+1} m_s$, w 为分支井眼向主井眼生产段并筒汇流的节点数。

鱼骨刺井生产段主井筒沿程流压符合以下关系:

$$p_{wf,m}(i) = p_{wf,m}(i-1) + 0.5(\Delta p_{wf,m}(i-1) + \Delta p_{wf,m}(i)), 2 \leq i \leq M+1. \quad (7)$$

其中

$$p_{wf,m}(1) = p_{wf} + 0.5 \Delta p_{wf,m}(1), \\ \Delta p_{wf,m}(M+1) = 0.$$

式中, p_{wf} 为主井眼生产段跟端流压, MPa; $\Delta p_{wf,m}(i)$ 为主井眼生产段第 i 段微元段的压降损失, MPa。

3 多段流动耦合的鱼骨刺井产能评价

鱼骨刺井生产时, 分支井眼并筒内变质量流与近井油藏渗流存在耦合作用, 主井眼生产段并筒内变质量流与近井油藏渗流存在耦合作用, 同时, 分支井眼并筒内流动与主井眼生产段并筒内流动在汇流点处存在耦合作用, 地层内分支井眼生产段与主井眼生产

段也存在渗流耦合(即势的干扰), 因此鱼骨刺井产能评价模型应建立的多段流动耦合的基础上。

鱼骨刺井生产段的渗流数学模型式(1)可表示为含有流量 $q_m(i), q_r(j,k)$ 与流压 $p_{wf,m}(i), p_{wf,i}(j,k)$ ($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq T_j$) 共 $2(M+N \times T_j)$ 个未知量、 $(M+N \times T_j)$ 个方程组成的方程组: $F_{on}[q_m(i), q_r(j,k), p_{wf,m}(i), p_{wf,i}(j,k)] = 0. \quad (8)$

由鱼骨刺井生产段流动分析模型式(2)~(7)可以得到未知量为 $q_m(i), q_r(j,k), p_{wf,m}(i)$ 以及 $p_{wf,i}(j,k)$ ($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq T_j$) 共 $2(M+N \times T_j)$ 个未知量、 $(M+N \times T_j)$ 个方程组成的方程组:

$$F_{oz}[q_m(i), q_r(j,k), p_{wf,m}(i), p_{wf,i}(j,k)] = 0. \quad (9)$$

式(8)和式(9)共有 $2(M+N \times T_j)$ 个方程、 $2(M+N \times T_j)$ 个未知量, 所组成的方程组即为多段流动耦合鱼骨刺井产能评价模型。

4 应用分析

海上某4分支鱼骨刺井的地层和流体参数: 流体黏度为 $380 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, 地层水平和垂向渗透率分别为 3.6 和 $0.36 \mu\text{m}^2$, 油层厚度为 18.2 m , 主井眼半径(套管完井)为 0.089 m , 主井眼长 400 m , 分支井眼长 $2 \times 150 \text{ m}, 2 \times 100 \text{ m}$, 分支井眼半径(裸眼完井)为 0.111 m 。

利用建立的鱼骨刺井产能评价模型对主井眼生产段和分支井眼生产段沿程压力降分布和沿程径流量及并筒流量分布进行计算分析, 结果如图2~4所示。

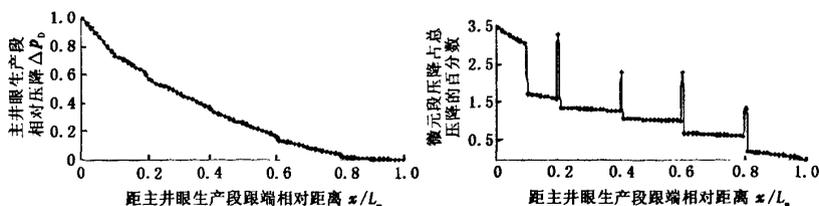


图2 主井眼生产段压降沿程分布

Fig. 2 Pressure drop distribution along main section

从主井眼生产段沿程压力降分布(图2)可以看出: 由于油藏流体径向流入主井眼生产段并筒, 沿主井眼生产段指端到跟端方向并筒内流量逐渐增加, 导致沿程压降呈非线性增加; 同时, 由于分支井眼向主井眼的汇流, 导致在汇流点处出现压降突变点, 这种汇流所造成的压降损失最大可占沿程总压降的 3.5% 左右。

从主井眼生产段流量沿程分布(图3)可以看出, 主井眼生产段与分支井眼生产段交汇处附近出现了不同程度的径向流量降低, 这主要是受分支井眼生产段势的干扰所致, 而在远离交汇点的地方, 主井眼生产段径向流量受影响程度逐渐减弱, 大体分布呈现两端高、中间低的特征, 反映在单位长度采收指数上呈现跟端与指端高, 向中间生产段逐渐降低

的特征。

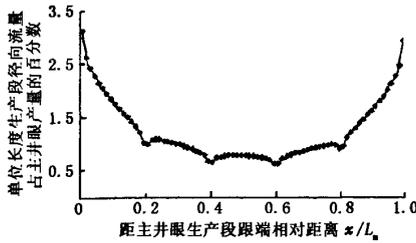


图3 主井眼生产段流量沿程分布

Fig.3 Flow distribution along main section

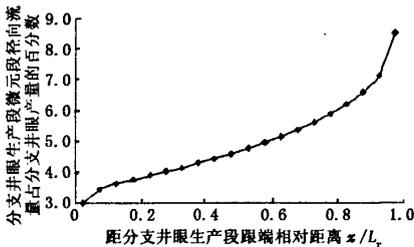


图4 分支井眼生产段流量沿程分布

Fig.4 Flow distribution along lateral section

从分支井眼生产段流量沿程分布(图4)可以看出,分支井眼沿程径向流量呈现跟端低、中间逐渐增大、指端高的特点,这主要是由于分支井眼生产段跟端与主井眼生产段交汇,该处的地层势受主井眼生产段势的干扰最大,导致地层向井筒的径向流量贡献最小,而远离交汇点,主井眼生产段与分支井眼生产段之间势干扰程度逐渐减弱,分支井眼生产段径向流量分布逐渐向单独生产时的特征过渡,反映在单位长度采油指数上呈现跟端向指端逐渐增加的特征。

5 结论

(1) 鱼骨刺井生产时,主井眼生产段井筒内为变质量管流,导致沿程压降非线性增加,同时分支井眼向主井眼的汇流,导致在分支井眼生产段与主井眼生产段交汇处出现压降突变点,而这种汇流所造成的压降损失最大可占沿程总压降的3.5%左右。

(2) 主井眼生产段与分支井眼生产段相互干扰,主井眼生产段径向流量分布呈现两端高、中间低、交汇点处减小的特征,分支井眼沿程径向流量呈现跟端低、中间逐渐增大、指端高的特点。

参考文献:

[1] DOSSARY A S. Challenges and achievements of drilling maximum reservoir contact (MRC) wells in Shaybah field

[R]. SPE/IADC 85307, 2003.

[2] JIM Oberkircher, RAY Smith. A survey of the first 10 years of modern multilateral wells [R]. SPE 84025, 2003.

[3] 何海峰, 张公社, 符翔, 等. 用节点法计算鱼骨形分支井产能[J]. 中国海上油气, 2004, 16(4): 263-265.

HE Hai-feng, ZHANG Gong-she, FU Xiang, et al. Calculating productivity of fishbone multilateral wells with nodal method[J]. China Offshore Oil and Gas, 2004, 16(4): 263-265.

[4] SALAS J R, CLIFFORD P J, JENKINS D P. Multilateral well performance prediction[R]. SPE 35711, 1996.

[5] RETNANTO A, FRICK T P, BRAND C W, et al. Optimal configurations of multiple-lateral horizontal wells [R]. SPE 35712, 1996.

[6] OUYANG Liang-biao, AZIZ Khalid. A simplified approach to couple wellbore flow and reservoir inflow for arbitrary well configurations[R]. SPE 48936, 1998.

[7] OUYANG Liang-biao, AZIZ Khalid. A general single-phase wellbore/reservoir coupling model for multilateral wells[R]. SPE 72467, 2001.

[8] 韩国庆, 吴晓东, 陈昊, 等. 多层非均质油藏双分支井产能影响因素分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(4): 81-85.

HAN Guo-qing, WU Xiao-dong, CHEN Hao, et al. Influence factors for production of dual-lateral well in multi-layer heterogeneous reservoirs[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(4): 81-85.

[9] 刘想平, 张兆顺, 崔桂香, 等. 鱼骨型多分支井向井流动动态关系[J]. 石油学报, 2000, 21(6): 57-60.

LIU Xiang-ping, ZHANG Zhao-shun, CUI Gui-xiang, et al. Inflow performance relationship of a herringbone multilateral well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(6): 57-60.

[10] 黄世军, 程林松, 赵凤兰, 等. 平面多分支井产能评价新模型研究[J]. 油气井测试, 2009, 18(4): 1-5.

HUANG Shi-jun, CHENG Lin-song, ZHAO Feng-lan, et al. Study on production evaluation model of plane multi-lateral well[J]. Well Testing, 2009, 18(4): 1-5.

[11] 黄世军, 程林松, 赵凤兰. 基于多段流动耦合的鱼骨刺井近井渗流研究[J]. 武汉工业学院学报, 2009, 23(3): 26-29.

HUANG Shi-jun, CHENG Lin-song, ZHAO Feng-lan. Research on fluid flow in pore near fishbone well considering on coupling among multi-segments flows[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2009, 23(3): 26-29.

(编辑 李志芬)