

复杂结构井数值模拟分段耦合模型

安永生¹, 宋扬¹, 李振泉²

(1. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中石化胜利油田有限公司, 山东东营 257000)

摘要: 针对复杂结构井的油藏渗流特征和井筒流动特点, 分别建立油藏质量守恒方程、井筒质量守恒方程和井筒动量方程, 采用井筒分段的方法对复杂结构井进行分段、编号, 并与油藏网格相匹配, 结合数值模拟矩阵“镶边”处理方法实现复杂结构井油藏和井筒的耦合, 利用全隐式方法进行求解。以鱼骨状分支井为例进行计算分析。结果表明, 复杂结构井分段耦合模型能够充分体现油藏渗流和井筒变质量流的相互影响, 改进后的数值模拟软件可以满足复杂结构井生产动态模拟的需求。

关键词: 油藏; 复杂结构井; 数值模拟; 分段耦合模型; 质量守恒; 动量守恒

中图分类号: TE 355 **文献标志码:** A

Multi-segment coupling model of numerical simulation of complex structural wells

AN Yong-sheng¹, SONG Yang¹, LI Zhen-quan²

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Shengli Oilfield Company Limited, SINOPEC, Dongying 257000, China)

Abstract: According to the percolation characteristics in reservoir and wellbore flow, the mass conservation equations separately in the reservoir and in the wellbore, and the momentum equation in the wellbore were developed. A complex structural well were segmented, and the segments were numbered, and then matched with the reservoir grids. Combined with the bordered matrix method in numerical simulation, the reservoir and the wellbore of a complex structural well were coupled, and the problem was solved using the fully implicit method. A herringbone well was analyzed. The results show that the multi-segment coupling model of a complex structural well can fully reflect the interaction between the percolation in the reservoir and the variable mass flow in the wellbore. The improved numerical simulation software can satisfy the requirement of production dynamic simulation for complex structural wells.

Key words: reservoir; complex structural wells; numerical simulation; multi-segment coupling model; mass conservation; momentum conservation

随着油气田开发技术的不断发展, 复杂结构井逐渐被应用于油气田生产中, 并取得了良好的效果^[1-6]。一方面, 复杂结构井因其自身结构特点, 可以有效扩大泄油面积, 增加单井产量, 进而减少开发井数, 提高油田经济效益; 另一方面, 由于复杂结构井具有任意井眼轨迹或有多个分支, 大大增加了模拟的难度。如何利用数值模拟方法对这种结构复杂井型进行模拟, 实现井筒和油藏耦合是当前亟待解

决的问题。针对这一问题, 笔者建立复杂结构井数值模拟分段耦合模型, 并将其应用于油藏数值模拟, 对鱼骨状分支井进行实例计算分析。

1 复杂结构井分段耦合模型

1.1 油藏模型

采用笛卡尔网格对模拟区域进行网格划分^[7-10], 并在此基础上对油水两相的质量守恒方程

进行差分,差分方程为

$$\frac{1}{\Delta t} \left[\left(\frac{\varphi S_w}{B_w} \right)^{n+1,l} - \left(\frac{\varphi S_w}{B_w} \right)^n + \delta \left(\frac{\varphi S_w}{B_w} \right) \right] = \nabla (T_w^{n+1} \nabla \Phi_w^{n+1}) + \frac{q_w^{n+1}}{B_w} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\Delta t} \left[\left(\frac{\varphi S_o}{B_o} \right)^{n+1,l} - \left(\frac{\varphi S_o}{B_o} \right)^n + \delta \left(\frac{\varphi S_o}{B_o} \right) \right] = \nabla (T_o^{n+1} \nabla \Phi_o^{n+1}) + \frac{q_o^{n+1}}{B_o^{n+1}} \quad (2)$$

式中, φ 为孔隙度; Δt 为时间步长, s; S_o 和 S_w 分别为油相和水相饱和度; B_o 和 B_w 分别为油相和水相体积系数; T_o 和 T_w 分别为油相和水相传导率, $m^3/s/MPa$; Φ_o 和 Φ_w 分别为油相和水相的势, MPa; q_o 和 q_w 分别为油相和水相在标准状态下的流速, s^{-1} ; l 为时间步内的迭代次数。

1.2 复杂结构井井筒模型

考虑复杂结构井井筒内变质量流的影响, 每一井段的控制方程为动量守恒方程、油相质量守恒方程和水相质量守恒方程。以一口双分支水平井为例(图1), 将主井筒和分支井筒共分为 n 段, 可以得到 $3n$ 个方程。

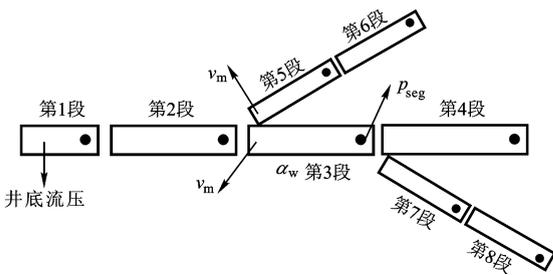


图1 复杂结构井分段耦合模型示意图

Fig.1 Sketch map of multi-segment coupling model of a complex structural well

其中每一井段的动量守恒方程为

$$p_{segi} - p_{segi-1} = \Delta p_{h,i} + \Delta p_{f,i} + \Delta p_{a,i}, \quad i=2,3,\dots,n. \quad (3)$$

式中, p_{segi} 为 i 井段的压力, MPa; $\Delta p_{h,i}$ 为 $i-1$ 和 i 井段之间的净液柱压力差, MPa; $\Delta p_{f,i}$ 为 $i-1$ 和 i 井段之间的摩擦引起的压力差, MPa; $\Delta p_{a,i}$ 为 $i-1$ 和 i 井段之间的加速度引起的压力差, MPa。

因为井段压力定义在井段的趾部, 因此 $i-1$ 井段和 i 井段之间的压力差取决于 i 井段的性质, 同时最顶端井段没有相应的动量守恒方程。

静液柱压力项表达式为

$$\Delta p_{h,i} = \rho_{segi} g \Delta h_{segi} \quad (4)$$

式中, ρ_{segi} 为 i 井段混合流体的密度, kg/m^3 ; Δh_{segi} 为 i 井段的垂直高度, m。

摩擦压力损失项表达式为

$$\Delta p_{f,i} = \left(\frac{2f_{fp}\rho_{seg}v_m^2}{d} \right)_i \Delta x_i \quad (5)$$

式中, f_{fp} 为摩擦因子; d 为井段的直径, m; v_m 为该井段混合流体的流速, m/s。

加速度压力损失项表达式为

$$\Delta p_{a,i} = \left(\frac{2m_{in}v_m}{A} \right)_i \quad (6)$$

式中, m_{in} 为通过孔眼混合物的质量流速, kg/s ; A 为截面积, m^2 。

除了动量守恒方程外, 每一个井段的油相质量守恒方程和水相质量守恒方程分别为

$$\frac{A_i L_i}{\Delta t} [(\rho_w \alpha_w)_{i+1}^{n+1} - (\rho_w \alpha_w)_i^n] = [(A \rho_w v_{sw})_{i+1}^{n+1} - (A \rho_w v_{sw})_i^{n+1}] - \left[\rho_w \frac{kK_{rw}h}{\mu_w B_w} I_w (p_{res} - p_{seg}) \right]_i^{n+1} \quad (7)$$

$$\frac{A_i L_i}{\Delta t} [(\rho_o \alpha_o)_{i+1}^{n+1} - (\rho_o \alpha_o)_i^n] = [(A \rho_o v_{so})_{i+1}^{n+1} - (A \rho_o v_{so})_i^{n+1}] - \left[\rho_o \frac{kK_{ro}h}{\mu_o B_o} I_w (p_{res} - p_{seg}) \right]_i^{n+1} \quad (8)$$

式中, α_o 和 α_w 分别为油相和水相在 i 井段中的持液率; ρ_o 和 ρ_w 分别为油相和水相密度, kg/m^3 ; L_i 为 i 井段的长度, m; v_{so} 和 v_{sw} 分别为油相和水相的表观速度, m/s; p_{res} 为网格块压力, MPa; p_{seg} 为井段压力, MPa; I_w 为井指数; h 为储层厚度, m; K_{ro} 和 K_{rw} 分别为油相和水相相对渗透率; μ_o 和 μ_w 分别为油相和水相黏度, Pa · s; B_o 和 B_w 分别为油相和水相体积系数; k 为储层渗透率, μm^2 。

1.3 漂移模型

在油藏数值模拟中需要一个相对简单、连续可微的关系式模拟井筒内的多相流动。因此本文中采用漂移模型对井筒内油水两相流进行描述。

漂移模型能够考虑到流体之间相对速度的影响, 关系式为

$$v_o = C_o v_m + v_d \quad (9)$$

式中, v_o 为油相的流速, m/s; C_o 为剖面参数; v_d 为漂移速度, m/s。

这些参数对两相流动的影响取决于混合速度。对于高流速情况 C_o 变得更加重要, 而在低流速的情况下 v_d 则占据了主导地位。

1.4 复杂结构井分段耦合模型

复杂结构井分段耦合模型采用全隐式的方法进行求解, 控制方程分为油藏方程和井筒方程两部分, 共 5 个方程, 其中油藏方程包括油相质量守恒方程

和水相质量守恒方程,井筒方程包括动量守恒方程、油相质量守恒方程和水相质量守恒方程。求解变量同样分为油藏变量和井筒变量两部分,共 5 个变量,其中油藏变量包括油相压力和水相饱和度,井筒变量包括井段压力、井段水相持液率和井段混合流速。

将漂移模型及其他辅助方程分别代入相应的油藏方程和井筒方程进行求解,就构成了复杂结构井分段耦合模型。

2 复杂结构井分段耦合模型的实现

为了将复杂结构井分段耦合模型应用于油藏数值模拟软件,需要对复杂结构井的分段方法进行研究,并对数值模拟软件的矩阵进行“镶边”处理。

2.1 井筒分段方法

复杂结构井除主井筒外一般还有多个分支井筒,每个井筒都有可能穿透多个网格,为了将井筒与油藏进行合理匹配,首先要对井筒进行分段和编号,然后把井筒编号与所在油藏网格编号记录在一起。

为了存取方便,采取油藏网格对复杂结构井自然分割的方法进行井筒的分段,即首先在模拟区域划分笛卡尔网格,然后根据复杂结构井井眼轨迹将其布置于油藏网格中,如果一个网格中只有主井筒或者只有分支井筒,则将网格中的井筒作为一个模拟井段进行记录;如果一个网格中既有主井筒也有分支井筒,则两个井筒作为两个模拟井段分别进行记录;如果一个网格中既有未射孔井筒(图 2 深色井段)、也有射孔井筒(图 2 浅色井段),则两个井筒作为两个模拟井段进行记录。

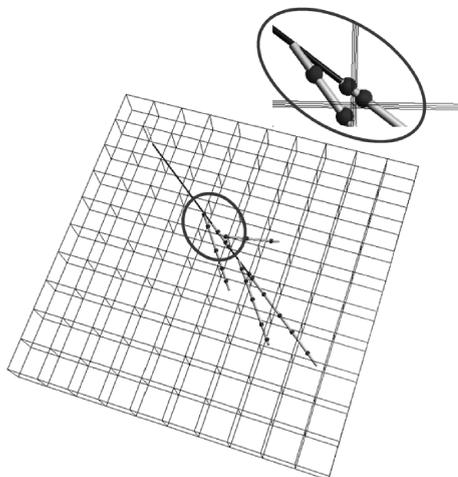


图 2 复杂结构井分段方法示意图

Fig. 2 Segmentation method of a complex structural well

复杂结构井井筒按照先主井筒后分支井筒、先井跟后井趾的方法进行编号,如有多个分支井筒,则

靠近主井筒井跟位置的分支优先进行编号。最后开辟存储空间,记录每一个网格中含有的井段数量、编号、长度、中心位置的坐标以及各井段是否射孔等信息。

当出现两个或多个分支井筒穿过同一油藏网格的情况,在油藏方程和井筒方程的源汇项计算中保留井段长度最长的井筒,忽略其他较短分支的影响。

2.2 矩阵处理方法

油藏数值模拟中,油水两相矩阵为七对角矩阵,每个非零元素的位置为一个 2×2 的小矩阵。当增加复杂结构井井筒方程和井筒变量后,矩阵形式可能会发生很大变化。本文中采取“镶边”处理的方法对原有矩阵进行改进,在不破坏原有矩阵的基础上,将井筒变量全部布置在矩阵右侧,井筒方程布置于矩阵下侧。以油水两相、二维油藏中一口水平井为例(图 3)进行矩阵的构建,新的“镶边”矩阵结构如图 4 所示。

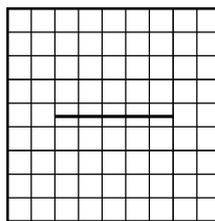


图 3 二维油藏一口水平井示意图

Fig. 3 A horizontal well in two-dimensional reservoir

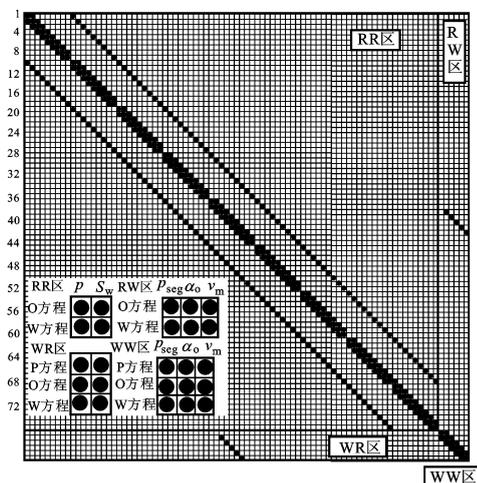


图 4 “镶边”矩阵结构示意图

Fig. 4 Configuration of bordered matrix

从图 4 中可以看出,矩阵可以分为 4 个区域,分别为 RR 区域(油藏方程对油藏变量求偏导)、RW 区域(油藏方程对井筒变量求偏导)、WR 区域(井筒方程对油藏变量求偏导)和 WW 区域(井筒方程对井筒变量求偏导)。

3 实例应用

利用复杂结构井数值模拟分段耦合模型对油藏数值模拟软件进行改进。以鱼骨状分支井单井模型为例进行实例计算。

假设单层油藏中心一口水平生产井其网格划分为 $21 \times 1 \times 1$,按顺序进行编号,三个方向的网格步长分别为50、50和30 m,参考深度1.2 km,参考深度下的压力为12 MPa,油水界面1.34 km,孔隙度0.33,水平渗透率 $683 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,垂向渗透率 $68.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,油水相渗及原油物性数据如表1、2所示。

表1 油水相渗数据

Table 1 Oil-water relative permeability

水相饱和度 S_w	水相相对渗透率 K_{rw}	油相相对渗透率 K_{ro}
0.322	0.000	1.000
0.436	0.015	0.760
0.444	0.022	0.696
0.460	0.024	0.578
0.498	0.037	0.375
0.543	0.053	0.235
0.576	0.071	0.171
0.598	0.088	0.140
0.618	0.108	0.117
0.640	0.120	0.097
0.663	0.140	0.080
0.703	0.165	0.058
0.731	0.184	0.047
0.751	0.212	0.041

表2 原油物性

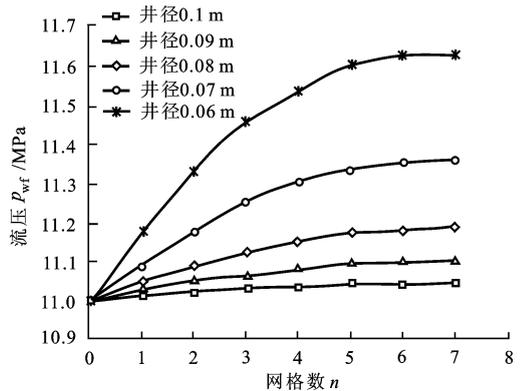
Table 2 Crude oil properties

压力 p/MPa	溶解气油比 R_s	原油黏度 $\mu/(\text{mPa} \cdot \text{s})$	体积系数 B
0	0.01	29.0	1.5
2	5.50	24.2	1.5
4	6.87	21.0	1.5
6	7.40	19.8	1.5
8	7.74	18.6	1.5
20.5	8.21	11.4	1.5

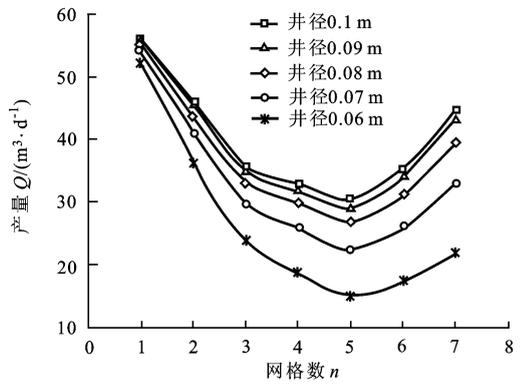
考虑油水两相渗流情况,建立鱼骨状分支井单井模型,其中主井筒长350 m,占据中部7个网格,网格编号分别为218、219、220、221、222、223、224,管径0.1 m,将主井筒均分为8段,每段长50 m,其中第一段为井口。两个分支井筒长度均为180 m,网格编号分别为220、200、180和222、244、266,管径0.1 m,地层压力12 MPa,鱼骨状分支井井底流压11 MPa。不同管径下的鱼骨状分支井井筒压力和产出剖面分布如图5所示。

从鱼骨状分支井主井筒压力及产出剖面分布可以看出,由于考虑了井筒内变质量流的影响,管径越小,井筒内的压降越大,主井筒产出剖面曲线

为近似的“U”型,但是在第3个和第5个井段所在位置产出剖面明显下降,并且管径越小,下降趋势越明显。这主要是由分支井筒对主井筒造成干扰所致。



(a) 井筒压力



(b) 产出剖面

图5 不同管径鱼骨状分支井主井筒压力和产出剖面分布
Fig. 5 Main well-bore pressure and production profiles distribution of herringbone wells with different tubing diameter

不同管径下的鱼骨状分支井生产曲线如图6所示。

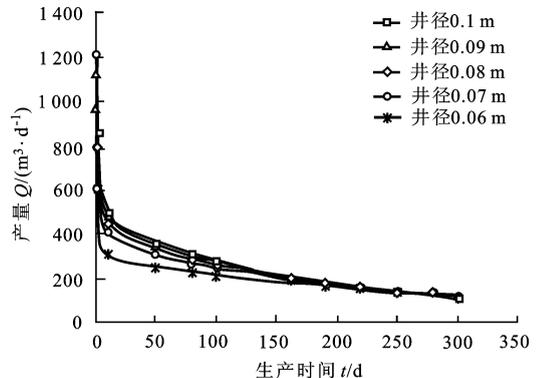


图6 不同油井管径鱼骨状分支井生产曲线
Fig. 6 Production curves of herringbone wells with different tubing diameters

从图6中可以看出,鱼骨状分支井生产初期处于不稳态流动阶段,压力波逐渐向外传播,产量很大;随着时间推移,压力波继续向外传播,压力波控制范围内的流动阻力迅速增加,产量相应地迅速下降;当生产时间进一步增加,压力波传播到边界,水平井产量下降速度开始稳定,进入拟稳态生产阶段。

4 结束语

结合油藏质量守恒方程、井筒质量守恒方程和井筒动量方程,建立了复杂结构井数值模拟分段耦合模型。利用矩阵“镶边”的处理方法实现了复杂结构井井筒与油藏的耦合。复杂结构井分段耦合模型能够充分体现油藏渗流和井筒变质量流的相互影响,改进后的数值模拟软件可以满足复杂结构井生产动态模拟的需求。

参考文献:

- [1] 韩国庆,吴晓东,李相方,等. 国外非常规井模型研究进展[J]. 石油钻采工艺, 2004,26(1):47-51.
HAN Guo-qing, WU Xiao-dong, LI Xiang-fang, et al. Summary of present studies on modeling of non-conventional wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2004,26(1):47-51.
- [2] 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.
- [3] 郭肖,杜志敏. 非均质性对水平井产能的影响[J]. 石油勘探与开发, 2004,31(1):91-93.
GUO Xiao, DU Zhi-min. Impacts of permeability heterogeneity on horizontal well productivity[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004,31(1):91-93.
- [4] 范玉平,韩国庆,杨长春. 鱼骨井产能预测及分支井形态优化[J]. 石油学报, 2006,27(4):101-104.
FAN Yu-ping, HAN Guo-qing, YANG Chang-chun. Production forecast for herringbone well and optimum configuration of lateral holes[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006,27(4):101-104.
- [5] 王晓冬,于国栋,李治平. 复杂分支水平井产能研究[J]. 石油勘探与开发, 2006,33(6):729-733.
WANG Xiao-dong, YU Guo-dong, LI Zhi-ping. Productivity of horizontal wells with complex branches[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006,33(6):729-733.
- [6] 刘想平,张兆顺,崔贵香,等. 鱼骨型多分支井向井流动态关系[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.
- [7] 安永生,吴晓东,韩国庆. 基于混合PEBI网格的复杂井数值模拟应用研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008,31(6):60-63.
AN Yong-sheng, WU Xiao-dong, HAN Guo-qing. Application of numerical simulation of complex well based on hybrid PEBI grid[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,31(6):60-63.
- [8] OUYANG, Liang-biao, AZIZ Khalid. A simplified approach to couple wellbore flow and reservoir inflow for arbitrary well configuration[R]. SPE 48936, 1998.
- [9] DING Y, JEANNIN L. New numerical schemes for near-well modeling using flexible grids [R]. SPE 87679, 2004.
- [10] 韩大匡,陈钦雷,闫存章. 油藏数值模拟基础[M]. 北京:石油工业出版社, 1993:83-94.

(编辑 李志芬)