

# 水平井变密度射孔调剖方法

王海静<sup>1</sup>, 薛世峰<sup>2</sup>, 高存法<sup>1</sup>

(1.南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016;

2.中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266555)

**摘要:**产液剖面不均衡是水平井开发过程中亟待解决的问题。基于源函数法和势的叠加原理,根据油藏—井筒耦合关系,建立了均质各向异性盒式油藏水平井产液剖面的计算模型及方法。在储层均衡开采的情况下,水平井生产段跟端和趾端流量高,中间流量低,产液剖面呈对称的U型。在实际笼统射孔条件下,受井筒内压力损失影响,生产段跟端流量高,趾端流量低;孔密或孔深越大,产液剖面的均衡性越差。以储层均衡开采为目标,提出了均质各向异性盒式油藏水平井变密度射孔调剖方法。采用该方法对水平井孔密分布进行优化后,孔密从生产段趾端到跟端逐渐下降;趾端孔密越高,跟端孔密的降幅越大。与笼统射孔相比,变密度射孔可明显改善水平井产液剖面的均衡性;孔密越大,变密度射孔的调剖效果越理想。

**关键词:**水平井 射孔 变密度 产液剖面 均衡性

**中图分类号:** TE257.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-9603(2012)06-0087-04

产液剖面不均衡是水平井开发过程中面临的重要问题,轻则引起油藏动用不均衡,重则导致边底水过早突破,影响油藏的最终采收率。调整产液剖面成为水平井开发中亟待解决的问题。目前,关于水平井射孔段打开程度和打开位置优化的研究较多,而关于射孔参数优化调整产液剖面的研究较少<sup>[1-8]</sup>,且对孔眼的处理存在算法过于复杂或者数学模型过于简化等问题。为此,笔者首先根据油藏—井筒耦合关系,建立了任意边界条件下各向异性盒式油藏水平井产液剖面的计算模型及方法,定量分析了均衡产液剖面的特点以及笼统射孔情况下产液剖面的变化规律及影响因素;然后,以储层均衡开采为目标,提出了均质各向异性盒式油藏水平井变密度射孔调剖方法,定量分析了该方法的调剖效果及影响因素,以期改善水平井产液剖面,提高储层动用程度,防止局部边底水过早突破,延长无水采油期,提高水平井开发效果。

## 1 产液剖面计算方法

流体在生产段井筒内的流动为变质量管流,从趾端到跟端,流量逐渐增大,压力逐渐降低,生产段各点生产压差不等。流体在油藏内的流动为多孔

介质渗流,生产段相当于线汇。由于组成线汇的各点间相互干扰,生产段跟端和趾端采液指数大,中间采液指数小。产液剖面是井筒变质量流与油藏渗流耦合作用的结果,需要对这2类方程同时求解。但由于这2类方程的强非线性特征,通常无法得到产液剖面的解析解。为此,借鉴偏微分方程的离散解法,将一个连续变量的求解转化为有限个离散变量的求解。

### 1.1 数学模型

将水平井生产段离散为 $n$ 个长度为 $\Delta l$ 的井筒微元,从跟端开始依次编号( $i=1, 2, \dots, n$ )。假设每个井筒微元的比流量(单位长度径向流入量) $q_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )均匀分布(图1)。

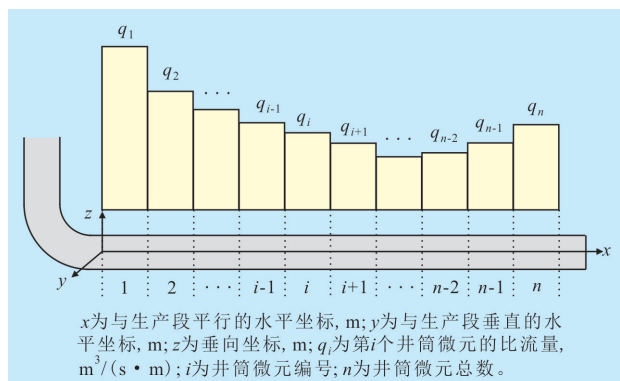


图1 水平井的离散模型

收稿日期:2012-09-04。

作者简介:王海静,女,在读博士研究生,从事油气田地下工程力学研究。联系电话:15020025183, E-mail: lnsywhj@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“优化射孔技术研究”(2011ZX05006-002)。

将各井筒微元看作是强度均匀的线汇,取各微元中心井壁上一点  $M_i$  作为该井筒微元的压力计算点。基于源函数法和势的叠加原理,建立的第  $i$  个井筒微元的压力计算公式为

$$p_{w,i} = p_0 - \frac{\mu q_i}{2\pi \sqrt{K_y K_z}} S_{t,i} - \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{\phi c} \int_0^t G_j(M_i, \tau) d\tau \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1$$

其中

$$S_{t,i} = \frac{K}{K_{d,i}} S_{p,i} + S_{d,i} + S_{cz,i} \quad (2)$$

式中:  $p_{w,i}$  为第  $i$  个井筒微元中点处的压力, Pa;  $p_0$  为油藏初始压力, Pa;  $\mu$  为地层流体粘度, Pa·s;  $K_y$  和  $K_z$  分别为  $y$  和  $z$  方向的渗透率,  $m^2$ ;  $S_{t,i}$  为考虑射孔几何、钻井污染和孔道压实等因素影响的第  $i$  个井筒微元的总表皮系数;  $q_j$  为第  $j$  个井筒微元的比流量,  $m^3/(s \cdot m)$ ;  $\phi$  为孔隙度;  $c$  为压缩系数,  $Pa^{-1}$ ;  $t$  为时间, s;  $G_j$  为第  $j$  个井筒微元线汇的瞬时源函数<sup>[9]</sup>,  $m^{-2}$ ;  $M_i$  为第  $i$  个井筒微元的压力计算点;  $\tau$  为时间积分变量;  $K$  为油藏渗透率,  $m^2$ ;  $K_{d,i}$  为第  $i$  个井筒微元的污染带渗透率,  $m^2$ ;  $S_{p,i}$  为第  $i$  个井筒微元的射孔几何表皮系数<sup>[10]</sup>;  $S_{d,i}$  为第  $i$  个井筒微元的污染表皮系数<sup>[11]</sup>;  $S_{cz,i}$  为第  $i$  个井筒微元的射孔压实表皮系数<sup>[11]</sup>。

通过一维基本瞬时源函数和 Newman 乘积原理,可得到任意边界条件下各向同性盒式油藏中平行于边界的任意线汇的瞬时源函数表达式。对于各向异性油藏,在计算源函数之前,需通过坐标变换<sup>[12]</sup>将其转化成等效各向同性系统,等效井筒半径取椭圆形井筒截面 2 个半轴长的平均值。

生产段井筒内的流体流动为质量逐渐增大的变质量管流,其压力损失由摩擦压降和加速压降组成。据动量守恒,2 个相邻的井筒微元间的压差为

$$p_{w,i} - p_{w,i+1} = -\frac{\rho f}{2d} \left[ \frac{A}{3q_{i+1}} (v_{i,i+1}^3 - v_{i+1}^3) + \frac{A}{3q_i} (v_i^3 - v_{i,i+1}^3) \right] - \frac{\rho}{2} (\alpha_i v_i^2 - \alpha_{i+1} v_{i+1}^2) \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1$$

其中

$$v_{i,i+1} = \sum_{j=i+1}^n q_j \frac{\Delta l}{A} \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (4)$$

$$v_i = \frac{\Delta l}{A} \left( \sum_{j=i}^n q_j - 0.5q_i \right) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为流体密度,  $kg/m^3$ ;  $f$  为孔眼径向入流条件下的管壁摩擦系数<sup>[13]</sup>;  $d$  为套管内径, m;  $A$  为套管的横截面积,  $m^2$ ;  $v_{i,i+1}$  为第  $i$  与  $i+1$  个井筒微元交点处的截面平均流速, m/s;  $v_i$  为第  $i$  个井筒微元中点处的截面平均流速, m/s;  $\alpha_i$  为第  $i$  个井筒微元的动量修正系数<sup>[14]</sup>;  $\Delta l$  为井筒微元长度, m。

当油井以定产量生产时,有

$$\sum_{i=1}^n q_i \Delta l = BQ \quad (6)$$

式中:  $B$  为体积系数;  $Q$  为地面流量,  $m^3/s$ 。

式(1)、式(3)和式(6)构成了水平井产液剖面计算模型,该模型适用于任意边界条件下均质各向异性盒式油藏水平井产液剖面的计算。模型共包含  $2n$  个方程和  $2n$  个未知量,即  $q_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 和  $p_{w,i}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 模型有惟一解。

## 1.2 求解方法

式(1)为线性方程,式(3)为比流量的非线性方程,鉴于两者的弱耦合关系,可采用顺序迭代法求解。求解之前,用第  $i$  个井筒微元的压力减去第  $i+1$  个井筒微元的压力,则式(1)变为

$$p_{w,i} - p_{w,i+1} = \frac{\mu(q_{i+1} S_{t,i+1} - q_i S_{t,i})}{2\pi \sqrt{K_y K_z}} + \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{\phi c} \int_0^t G_j[(M_{i+1}, \tau) - G_j(M_i, \tau)] d\tau \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1$$

同时,根据式(6),将第  $n$  个井筒微元的比流量  $q_n$  用总流量与其他微元的比流量来表示。从而,原产液剖面计算模型变为式(3)和式(7),未知量变为  $q_i$  ( $i=1, 2, \dots, n-1$ ) 和  $p_{w,i} - p_{w,i+1}$  ( $i=1, 2, \dots, n-1$ ), 方程、未知量数量皆为  $2(n-1)$  个,方程组有惟一解。

采用顺序迭代法求解该模型的步骤包括:①假设各井筒微元的比流量相同,即  $q_i = q_{i+1}$  ( $i=1, 2, \dots, n-1$ );②将  $q_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 代入式(3),计算相邻井筒微元间的  $p_{w,i} - p_{w,i+1}$  ( $i=1, 2, \dots, n-1$ );③将  $p_{w,i} - p_{w,i+1}$  ( $i=1, 2, \dots, n-1$ ) 代入式(7),计算各井筒微元的比流量  $q_i$  ( $i=1, 2, \dots, n-1$ );④重复步骤②—③,直到前后 2 次计算的比流量  $q_i$  ( $i=1, 2, \dots, n-1$ ) 满足给定误差,循环结束,得到产液剖面分布。

## 2 笼统射孔产液剖面均衡性分析

假设一均质盒式底水油藏的长度、宽度和厚度

分别为700, 300和10 m, 初始压力为10 MPa, 水平渗透率为 $1 \mu\text{m}^2$ , 垂向渗透率为 $0.3 \mu\text{m}^2$ , 孔隙度为0.3。地层原油粘度为 $10 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , 密度为 $850 \text{ kg/m}^3$ , 体积系数为1.25, 压缩系数为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ 。1口水平井位于油藏中心, 与油层底部边界距离为8 m, 井筒半径为0.1 m, 套管内径为0.1 m, 管壁相对粗糙度为0.01, 污染带厚度为0.6 m, 污染带渗透率与油藏渗透率之比为0.4。射孔段长度为400 m, 孔深为0.4 m, 孔径为0.01 m, 射孔相位角为 $90^\circ$ , 射孔压实带厚度为0.02 m, 压实带渗透率与油藏渗透率之比为0.1。油井以定产量 $800 \text{ m}^3/\text{d}$ 生产。采用新建产液剖面计算方法, 分别计算了孔密为12, 24和36孔/m笼统射孔条件下的真实产液剖面和理想无限导流裸眼完善井的均衡产液剖面(图2)。

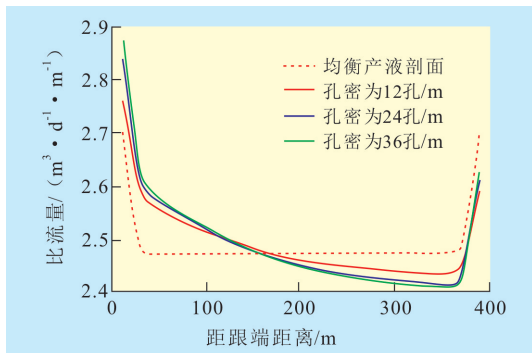


图2 笼统射孔条件下的产液剖面

分析图2发现, 在均衡开采情况下, 生产段跟端和趾端流量高, 中间流量低, 产液剖面呈对称的U型; 在实际笼统射孔条件下, 受井筒内压力损失影响, 产液剖面呈现斜U型, 跟端流量大于趾端流量, 且孔密越大, 跟端与趾端的流量差异也越大, 即产液剖面的均衡性越差。当孔密为36孔/m时, 趾端比流量约为跟端比流量的90%。

为了定量评价产液剖面的不均衡性, 定义无因次不均衡系数为

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - q_{i,u})^2}{q_{\text{avg}}}} \quad (8)$$

式中:  $\gamma$ 为无因次不均衡系数;  $q_{i,u}$ 为均衡开采情况下第*i*个井筒微元的比流量,  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ;  $q_{\text{avg}}$ 为整个生产段的平均比流量,  $\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。

保持其他参数不变, 分别改变孔密和孔深, 计算得到笼统射孔条件下的产液剖面不均衡系数随孔密和孔深的变化规律(图3)。结果表明, 随着孔密和孔深的增大, 产液剖面的不均衡系数逐渐增大, 即不均衡性逐渐增强。这是由于在定产量生产条件下, 井筒压力损失基本保持不变; 而孔密和孔

深的增加, 降低了生产压差, 间接增大了井筒压力损失的影响。

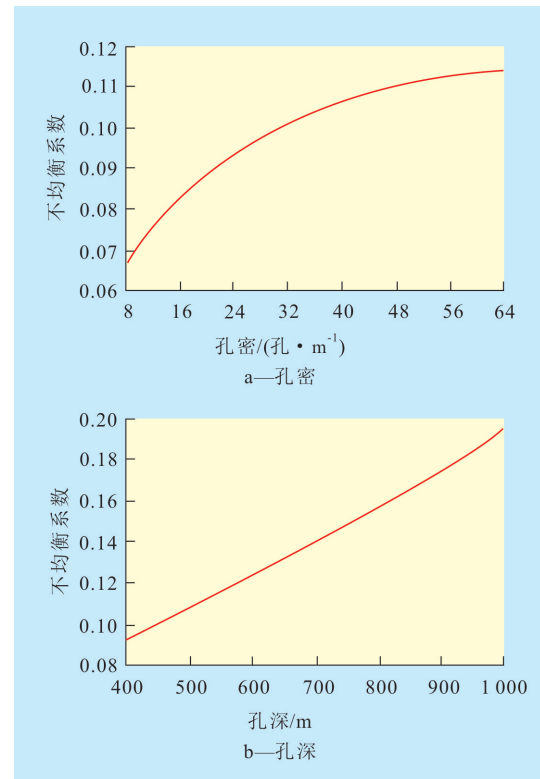


图3 笼统射孔条件下孔密和孔深对不均衡系数的影响

### 3 变密度射孔调剖方法

通过变密度射孔方式, 即孔密沿井筒梯级变化方式可解决水平井产液剖面不均衡问题。该调剖方法的本质在于通过改变射孔节流压降, 来调节生产压差, 进而调整产液剖面, 达到储层均衡开采的目的。

#### 3.1 模型及求解方法

最优的孔密应在满足现有射孔器性能和实际工程要求的前提下, 使生产段流量分布达到均衡, 即 $q_i = \bar{q}_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )。这类优化问题可归结为最小值问题, 即

$$\begin{cases} \min & f(DEN) = \sum_{i=1}^n (q_i - q_{i,u})^2 \\ \text{s.t.} & DEN_{\min} \leq DEN \leq DEN_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$DEN = (DEN_1, DEN_2, \dots, DEN_n)^T \quad (10)$$

式中:  $f(DEN)$ 为目标函数, (孔/m)<sup>2</sup>;  $DEN$ 为决策变量, 即井筒微元的孔密, 孔/m;  $DEN_{\min}$ 和  $DEN_{\max}$ 为约束条件, 即孔密的最小值和最大值, 孔/m。

孔密优化问题是一个非线性规划问题,目标函数 $f(DEN)$ 是决策变量 $DEN$ 的隐性函数,涉及到产液剖面计算模型,即非线性方程组的求解。鉴于目标函数的特殊性,可先确定该优化问题的最优解,再将最优解代入产液剖面计算模型,联合约束条件,建立以孔密为未知量的方程组,求解方程组以获得最优孔密。具体步骤包括:①根据计算精度要求和工程需要(如射孔枪长度限制等),将生产段井筒离散为 $n$ 个等长度微元(图1);②不考虑射孔、地层损害和井筒压力损失的影响,即令 $S_{Li}=0$ , $p_{w,i}-p_{w,i+1}=0$  ( $i=1,2,\dots,n$ ),求解式(6)和式(7)构成的线性方程组,得到理想无限导流裸眼完善水平井的产液剖面,即均衡产液剖面 $\bar{q}_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ),令 $q_i=q_{i,u}$  ( $i=1,2,\dots,n$ );③考虑射孔、地层损害和井筒压力损失的影响,将 $q_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )代入式(3)和式(7),得到以孔密 $DEN_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )为未知量的 $n-1$ 个非线性方程,再结合孔密约束条件,共 $n$ 个方程, $n$ 个未知量,方程组有惟一解。采用迭代法求解方程组,将计算结果取整,即得各井筒微元的孔密最优值。

### 3.2 算例分析

利用所建模型和参数,以均衡产液剖面为目标,分别对最大孔密为12,24和36孔/m时水平井的孔密进行优化。由优化结果(图4)可以看出,从趾端到跟端,孔密逐渐下降,且趾端孔密越高,跟端孔密的降幅越大。

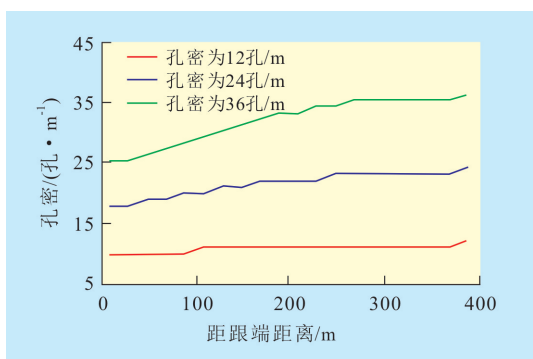


图4 优化后的孔密分布

优化后的产液剖面(图5)显示,孔密优化后,跟端附近的流量降低,趾端附近的流量增大,产液剖面的均衡性明显提高。受孔密优化结果取整时舍入误差的影响,最大孔密为12孔/m时的产液剖面略有波动,但仍较笼统射孔情况(图2)有明显改善。孔密越大,优化后舍入误差的影响越小,最大孔密为36孔/m时的产液剖面几乎与理想产液剖面重合,改善效果十分明显。与优化前(图3)相比,优

化后的产液剖面不均衡系数明显降低(图6)。孔密越大,产液剖面不均衡系数越低,即均衡性越好。

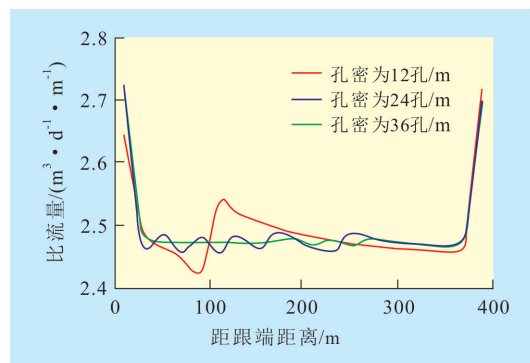


图5 优化后的产液剖面

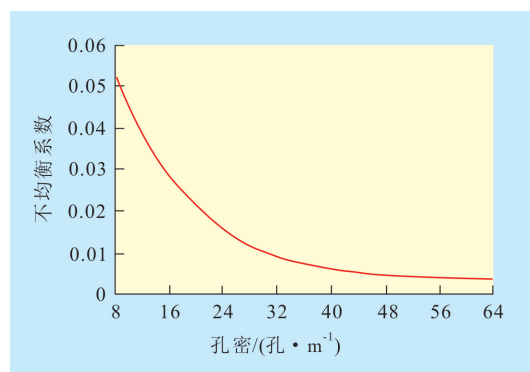


图6 优化后的不均衡系数分布

## 4 结论

建立了均质各向异性盒式油藏水平井产液剖面的计算模型及方法。在储层均衡开采情况下,生产段跟端和趾端流量高,中间流量低,产液剖面呈对称的U型;在实际笼统射孔条件下,受井筒内压力损失影响,生产段跟端流量高,趾端流量低。随着孔密和孔深的增大,产液剖面不均衡性逐渐增强。

提出了以储层均衡开采为目标的均质各向异性盒式油藏水平井变密度射孔调剖方法。采用该方法后,孔密从生产段趾端到跟端逐渐下降;趾端孔密越高,跟端孔密的降幅越大。与笼统射孔相比,变密度射孔可明显改善水平井产液剖面的均衡性。孔密越大,变密度射孔调剖效果越理想。该方法具有求解方便,计算效率高的特点,适用于任意边界条件下各向异性盒式油藏水平井调剖。

### 参考文献:

- [1] Landman M J, Goldthorpe W H. Optimization of perforation distribution for horizontal wells[C]. SPE 23005, 1991.