

水平井变密度射孔技术优化及应用

王峙博¹, 孟凡圣²

(1. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石化股份胜利油田分公司 东辛采油厂, 山东 东营 257094)

摘要: 由于水平井水平段物性差异、井斜角变化、水平段内摩擦损失等因素造成水平段开发不均衡。根据渗流力学和油藏工程理论, 建立了油藏渗流模型、孔眼紊流模型、水平井井筒流动模型; 基于流体的不同流动状态之间边界处压力及流量相等, 根据质量守恒方程, 建立了油藏—水平井井筒流动耦合模型。并利用油藏—水平井井筒流动耦合模型分析了井斜角、渗透率、水平段距底水的距离、原油粘度对孔密优化的影响。结果表明, 井斜角小于等于90°时, 从跟端到趾端需增加孔密, 井斜角大于90°时, 从跟端到趾端需减小孔密; 渗透率大的井段, 渗流阻力小, 向渗透率大的方向降低孔密; 距离底水越近孔密差异越大。应用油藏—水平井井筒流动耦合模型对11口水平井进行变密度射孔优化, 优化后平均单井初期产液量为32.9 m³/d, 产油量为29 t/d, 平均单井累积增油量为5 246 t, 与2008—2009年投产的同类型相邻油藏水平井相比, 平均含水率上升速度减缓, 开发效果有所改善。

关键词: 水平井 油藏—水平井井筒流动耦合 变密度射孔 均衡开发

中图分类号: TE34

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2012)06-0100-04

水平井与直井相比具有含水率上升慢、单井产量高、累积产量高的特点^[1-2], 是油田稳产、增产的重要手段^[3-5]。但由于储层非均质性、水平段井斜角变化、水平段内摩擦损失等均会造成水平段产液剖面不均衡, 所以有必要对水平段射孔进行优化, 应用不均匀的射孔方式匹配油藏开发的非均质性, 以实现油藏均衡开发的目的。前期研究多是考虑油藏渗流与水平井井筒管流之间的耦合, 并未考虑井眼处紊流造成的压降, 笔者在3种不同流动形态的基础上, 基于压力及流动的连续性, 建立了油藏—水平井井筒流动耦合模型, 依据建立的模型, 分析了射孔优化过程中井斜角和渗透率等参数的影响, 建立了合理、科学的水平井变密度射孔优化方法。

1 模型的建立

水平井生产时, 流体在流动过程中其状态不断变化, 每个阶段按照不同的流动规律产生相应的压降, 引起压力场分布的变化; 同时由于压力和流体的连续性, 流体的不同流动状态之间边界处压力及流量相等, 并且不同流动状态产生的压力场变化会相互影响。根据流体的不同状态可将流体从油藏

到水平井井筒的渗流过程分为油藏渗流模型、孔眼紊流模型和水平井井筒流动模型。

1.1 油藏渗流模型

结合东辛油区断块油藏的实际特点和类型, 以厚层底水油藏为例, 建立泄油边界到井筒的压降公式^[6]为

$$\Delta p_r = \frac{\mu_o B q_L}{2\pi K h} \times \left\{ \ln \left[\frac{a + \sqrt{a^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}}{\frac{L}{2}} \right] + \frac{\beta h}{L} \ln \left[\frac{\left(\frac{\beta h}{2}\right)^2 - \beta^2 \delta^2}{\frac{\beta \pi h r_w}{2}} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: Δp_r 为泄油边界到井筒的压降, MPa; μ_o 为地面原油粘度, mPa·s; B 为原油体积系数; q_L 为水平井产量, m³/s; K 为油藏渗透率, 10⁻³ μm²; h 为油层厚度, m; a 为水平井泄油椭圆的长半轴, m; L 为水平井水平段长度, m; β 为渗透率各向异性系数; δ 为井眼偏心距, m; r_w 为井筒半径, m。

1.2 孔眼紊流模型

对于射孔完井水平井, 可认为井筒径向流终止于孔眼末端。由于井筒在孔眼以外区域是封闭的, 流体在孔眼处汇聚, 可近似认为孔眼附近的汇聚流为径向流^[7-8]。每个孔眼径向流区域包括地层损害

收稿日期: 2012-09-12。

作者简介: 王峙博, 男, 从事石油地质研究。联系电话: 13780750938, E-mail: 63325724@qq.com。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2011ZX05051)。

区和射孔压实区。对于每个井简单元,可认为孔眼是均匀分布的。

流体由油藏平面径向流的内边界线性汇聚于孔眼,在孔眼汇聚流区域对 Forchhermer 方程进行积分,可得单个孔眼的紊流压降公式为

$$\Delta p_s = \frac{8\mu_o q}{K\pi} \left[\frac{1}{d^3} - \frac{1}{(d+r_c)^3} \right] + \frac{64\lambda\rho q^2}{\pi^2} \left[\frac{1}{d^5} - \frac{1}{(d+r_c)^5} \right] \quad (2)$$

式中: Δp_s 为流体在孔眼处的紊流压降,MPa; q 为单个孔眼的流量, m^3/s ; d 为水平井井筒半径, m ; r_c 为井筒径向流边界距离井筒的距离, m ; λ 为紊流系数, m^{-1} ; ρ 为地层流体密度, kg/m^3 。

1.3 水平井井筒流动模型

流体在射孔段的压降包括:流体在井筒内流动时产生的摩擦阻力引起的压降;储层流体由孔眼进入水平井井筒后与井筒内流体混合时,引起的混合压力降;由于径向流体的流入,整个井段为变质量流,存在加速度,进而产生加速压降;另外,当水平井具有倾角时,还要考虑由重力引起的压降。因此水平井井筒的流动压降为

$$\Delta p_{w,i} = \sum_{i=1}^m (\Delta p_{f,i} + \Delta p_{a,i} + \Delta p_{m,i} + \Delta p_{g,i}) \quad (3)$$

式中: $\Delta p_{w,i}$ 为井筒第 i 个射孔单元与第 $i-1$ 个射孔单元的压差,MPa; i 为井筒的射孔单元序号; $\Delta p_{f,i}$ 为井筒第 i 个射孔单元的摩擦压降,MPa; $\Delta p_{a,i}$ 为井筒第 i 个射孔单元的加速压降,MPa; $\Delta p_{m,i}$ 为井筒第 i 个射孔单元的混合压降,MPa; $\Delta p_{g,i}$ 为井筒第 i 个射孔单元的重力压降,MPa。

1.4 油藏—水平井井筒流动耦合模型

基于油藏渗流、孔眼紊流和水平井井筒流动模型,根据水平段井壁处压力和流量连续性原则^[9-10],由油藏渗流压降和孔眼紊流压降使井壁处压力等于井筒内的流动压力,建立油藏—水平井井筒流动耦合模型。将水平井水平段划分为 n 个单元,其中射孔井段单元 n_1 个、非射孔井段单元 n_2 个,依次从水平井趾端到根端进行编号(图1)。相邻射孔单元的井筒压降,即油藏—水平井井筒流动耦合模型为

$$\Delta p_{w,i} = (\Delta p_{r,i-1} - \Delta p_{r,i}) + (\Delta p_{s,i-1} - \Delta p_{s,i}) \quad (4)$$

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

式中: $\Delta p_{r,i-1}$ 为渗流边界到井筒第 $i-1$ 个射孔单元的压降,MPa; $\Delta p_{s,i-1}$ 为井筒第 $i-1$ 个射孔单元的紊流压降,MPa。

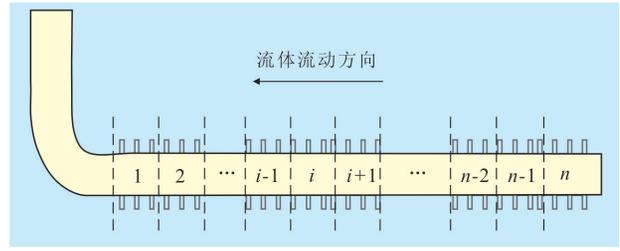


图1 水平井射孔单元划分示意

2 水平井均衡开发射孔优化思路

由油藏—水平井井筒流动耦合模型研究可知,水平段产液剖面受油藏渗流、孔眼紊流和井筒管流等多种因素影响。其中,近井地带储层非均质性和井筒压力损失是引起水平井流入剖面不均衡的主要原因。传统的均匀射孔方式没有考虑射孔密度(孔密)与井筒压力变化以及油藏非均质性的匹配关系,极易造成水平井流入剖面不均衡。在油藏—水平井井筒流动耦合模型中,射孔参数的影响体现在孔眼紊流压降上。水平井变密度射孔方法旨在通过调整孔密来调节孔眼紊流压降,进而调整射孔段的生产压差,使井筒跟端或高渗透区生产压差降低,流量减少,井筒趾端或低渗透区生产压差升高,流量增加,确保流入剖面达到均衡。优化过程中,给定水平井产液量和趾端孔密,计算全水平段孔密。

3 射孔参数影响因素

以某油区厚层底水油藏高部位部署的1口水平井为例,储层厚度为12 m,渗透率为 $1500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,水平段长度为200 m,地层泄油面积为 0.04 km^2 ,地面原油粘度为 $125 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,地面原油密度为 $0.9 \text{ g}/\text{cm}^3$,井筒外径为139.7 mm,孔眼直径为10 mm,投产初期产液量为 $50 \text{ m}^3/\text{d}$ 。以油藏—水平井井筒流动耦合模型为依据,以实现水平段均衡出液为目的,分析井斜角、渗透率、水平段距底水的距离和原油粘度对射孔参数的影响。

3.1 井斜角

在其他参数相同的条件下,方案1、方案2和方案3的井斜角分别为 85° 、 90° 和 95° 。水平段井斜角不同,重力和摩阻对射孔优化产生重要影响(图2)。当井斜角小于 90° 时,跟端重力较趾端高,同时受摩阻影响,生产压差向趾端降低,为保证水平段均衡开发,需增大趾端的孔密,以减小流入阻力;当井斜角等于 90° 时,受井筒摩阻影响,生产压差向趾

端降低,需增大孔密,但增幅小于方案1;当井斜角大于90°时,跟端较趾端低,重力作用大于摩擦阻作用,生产压差向趾端增加,需降低孔密。

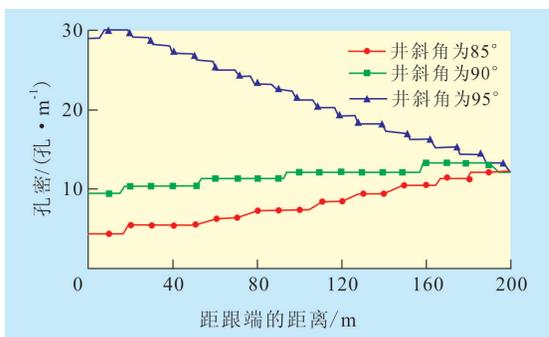


图2 不同井斜角下的孔密曲线

3.2 渗透率

横向渗透率 方案1,横向渗透率由跟端向趾端逐步变小,渗透率为 $1\ 500 \times 10^{-3} \sim 2\ 500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 方案2,均质油藏,渗透率为 $1\ 500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 方案3,横向渗透率由跟端向趾端逐步变大,渗透率为 $500 \times 10^{-3} \sim 1\ 500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。研究结果(图3)表明,渗透率大的井段,渗流阻力小,向渗透率大的方向降低孔密;渗透率均匀的井段,受摩擦阻影响,向趾端增大孔密;渗透率小的井段,渗流阻力大,向渗透率小的方向增大孔密。

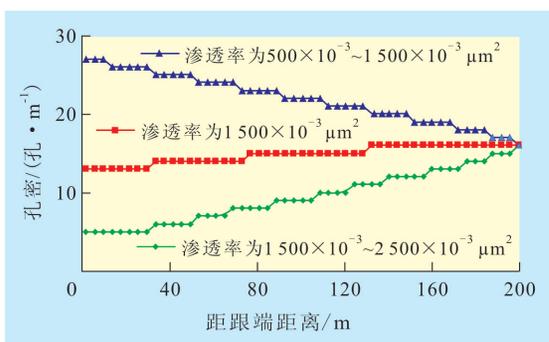


图3 不同横向渗透率下的孔密曲线

纵向渗透率 方案1,渗透率由油层顶端到底端逐步变大,为 $500 \times 10^{-3} \sim 3\ 500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 方案2,均质油藏,渗透率为 $1\ 500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 方案3,渗透率由油层顶端到底端逐步变小,为 $500 \times 10^{-3} \sim 3\ 000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。根据模型计算分析可知,纵向渗透率对水平段流入剖面趋势不产生影响,但对不同纵向渗透率之间水平段流入剖面略有影响。这是因为从跟端到趾端油藏为平面径向流,纵向上的渗透率并没有引起各单元油藏渗流阻力的增加,因此,纵向渗透率差异对射孔参数优化的影响较小。

3.3 水平段距底水的距离

方案1、方案2和方案3水平段距底水的距离分

别为10,15和20 m(图4)。水平段距底水的距离影响各段流量,距底水越近,跟端与趾端的差异越大,油藏渗流阻力越小,在油藏—水平井井筒流动耦合模型中,水平井管流阻力和紊流阻力作用越大。因此需要差异更大的变密度射孔去解决管流阻力和紊流阻力对不均衡生产的影响;相反,距离底水越远,各段的差异越小,孔密差异越小。与渗透率等其他影响因素一样,水平井跟端比流量较高,孔密较低。

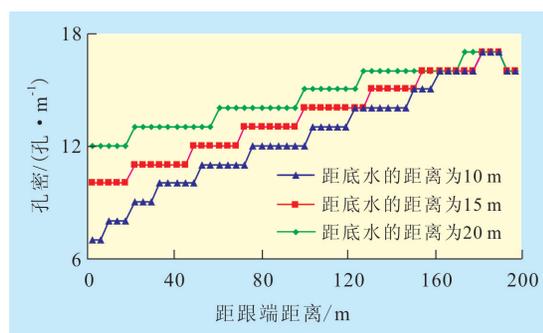


图4 水平段距底水不同距离下的孔密优化曲线

3.4 原油粘度

对比了原油粘度分别为20,50和100 mPa·s时水平段的比流量,结果表明,3个方案流入剖面变化趋势基本一致。原油粘度对流入剖面趋势影响不大,但是随着粘度的增大,水平段的比流量下降明显,流动能力下降。

4 应用效果

2010年对某水平井进行了孔密优化,筛选了不同的射孔方案,利用建立的油藏—水平井井筒流动耦合模型对孔密进行优化,结合目前的射孔工艺水平,为保障优化精度,采用每2 m为1个优化单元,设计产液量为50 m³/d,趾端孔密分别为16,48,60,72,84和96孔/m共6种不同的方案。计算结果表明,方案1,产液量为34.15 m³/d,优化率达到90.75%;方案2,产液量为45.55 m³/d,优化率达到97.34%;方案3,产液量为47.16 m³/d,优化率达到98.29%;方案4,产液量为48.29 m³/d,优化率达到98.97%;方案5,产液量为49.14 m³/d,优化率达到98.75%;方案6,产液量为49.80 m³/d,优化率达到98.88%;综合对比不同方案,方案4为最优方案。按照方案4实施后,产液量达到设计要求,含水率上升速度与周围邻井相比明显减缓。

应用笔者建立的油藏—水平井井筒流动耦合模型,对11口水平井进行孔密优化,优化后平均单

井初期产液量为 32.9 m³/d,产油量为 29 t/d,截至 2011 年 12 月,平均单井累积增油量为 5 246 t,与 2008—2009 年投产的同类型相邻油藏水平井相比,优化后 11 口水平井平均含水率上升速度减缓(图 5),开发效果有所改善。今后将优化井位开展水平井产液剖面监测,进一步对比评价变密度射孔对改善产液剖面、提高采收率的影响。

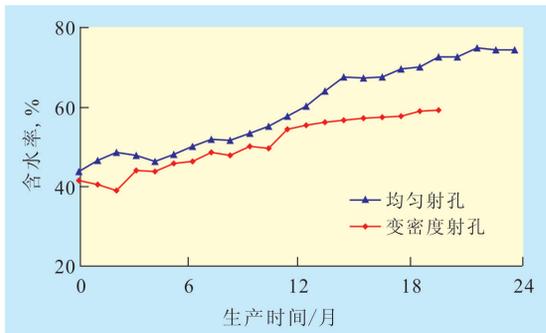


图5 水平井变密度射孔与均匀射孔含水率变化对比

5 结论

基于油藏渗流、孔眼紊流和水平井井筒管流 3 种流动模型,考虑井壁处的压力和流量的连续性,建立了油藏—水平井井筒流动耦合模型。在跟端生产压差相同的情况下,井斜角、横向非均质性、水平段距底水距离对水平井均衡开发下孔密分布的影响较大,当井斜角小于等于 90°时,从跟端到趾端需增加孔密,当井斜角大于 90°时,从跟端到趾端需减小孔密;渗透率大的井段,渗流阻力小,向渗透率

大的方向降低孔密;距离底水越近孔密差异越大;纵向非均质性、原油粘度对水平井均衡开发下孔密分布的影响较小。建立了以水平井均衡开发为目标,以非均质的射孔方式匹配油藏开发非均质性的水平井变密度射孔技术优化方法,实现水平井均衡开发。

参考文献:

- [1] 孟红霞,陈德春,海会荣,等.水平井分段射孔完井方案优化[J].油气地质与采收率,2007,14(5):84-87.
- [2] 胡东晖,鄢捷年.水平井产能的影响因素[J].石油勘探与开发,1994,21(5):44-52.
- [3] 高春光,王晓冬,刘和甫,等.底水驱油藏单管采水抑锥射孔方案优化[J].油气地质与采收率,2006,13(1):71-73.
- [4] 刘想平,蒋志祥.射孔完井的水平井向井流动态关系[J].石油勘探与开发,1999,26(2):71-76.
- [5] 刘景三,司连收,张东荣,等.大孔径、高孔密防砂射孔技术在草 13 块的应用[J].油气地质与采收率,2003,10(1):79-80.
- [6] 刘想平.底水驱油藏水平井三维稳态解产能公式[J].江汉石油学院学报,1998,20(1):54-57.
- [7] 周生田.射孔水平井孔眼分布优化研究[J].石油大学学报:自然科学版,2002,26(3):52-54.
- [8] 汪志明,徐静,王小秋.水平井两相流分段射孔模型研究[J].石油大学学报:自然科学版,2005,29(3):65-69.
- [9] 刘远亮,焦巧平,李君,等.吉林油田大情字井探区射孔与压裂匹配技术可行性研究[J].油气地质与采收率,2003,10(5):77-78.
- [10] 单东柏.水平井筛选方法研究——水平井产能预测和产量递减规律分析[D].北京:中国石油勘探开发研究院,2003.

编辑 武云云

(上接第 99 页)

- [12] Burman E, Fernández M A. Stabilization of explicit coupling in fluid-structure interaction involving fluid incompressibility[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2009, 198(5/8):766-784.
- [13] Ng Y T, Min C, Gibou F. An efficient fluid-solid coupling algorithm for single-phase flows[J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(23):8 807-8 829.
- [14] Atthies H G, Niekamp R, Steindorf J. Algorithms for strong coupling procedures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(17/18):2 028-2 049.
- [15] 闫相祯,王志刚,杨秀娟,等.油藏降压过程中压力分布的流固耦合数值模拟[J].油气地质与采收率,2009,16(4):90-92.
- [16] 路士华,牛乐琴,苏玉亮,等.油层出砂导致地层伤害数值模拟研究[J].中国矿业大学学报,2003,22(4):462-465.
- [17] 程紫燕.胜利油田稠油热采数值模拟研究进展[J].油气地质与采收率,2010,17(6):71-73,77.
- [18] Zhang Y Y, Lin G, Roberts P. Numerical modelling of deformation and fluid flow in the Shuikoushan district, Hunan Province, South China[J]. Ore Geology Reviews, 2007, 31(1/4):261-278.
- [19] 黄荣樽,邓金根.流变地层的粘性系数及其影响因素[J].岩石力学与工程学报,2000,19(S1):836-839.
- [20] 路保平,张传进,鲍洪志.油气开发过程中岩石力学性质变化规律实验研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(S1):878-881.
- [21] 贺德才,张宏,张来斌.注水开发油田泥岩层套管蠕变损坏机理研究[J].石油机械,2005,33(6):17-20.
- [22] 冯恩山,朱苏清,黄晓荣.岩石特性与套管损坏关系研究[J].钻井工艺,2005,28(3):4-6.
- [23] 祁林,韩广玲,张惠.松辽盆地喜山运动期地应力场演化对油气运聚的影响[J].石油与天然气地质,1992,13(4):398-406.
- [24] 葛荣峰,张庆龙,解国爱,等.庐庐断裂带北段及邻区现代地震活动性与应力状态[J].地震地质,2009,31(1):141-154.

编辑 常迎梅