

射孔井产率比及其影响因素数值分析

薛世峰, 王斐斐, 王海静

(中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266555)

摘要:射孔完井是油田普遍采用的一种完井方式。为了能够更好地研究射孔完井中各因素对射孔井产率比的影响规律,实现射孔工艺优选,建立了包括射孔参数(孔深、孔径、孔密、相位角)、射孔压实厚度和压实程度、钻井污染厚度和污染程度等因素的射孔井产率比计算的3D有限元模型,采用COMSOL软件与MATLAB软件连接编程方法,对290个含有不同参数的模型进行了系统模拟与分析。得到了孔深、孔密、相位角、射孔压实程度对射孔井产率比的影响规律,并能够实现射孔井近孔眼附近的压力场、速度场和流线规律的研究。结合油田工程实践,提出了计算油田射孔井产率比的简易方法,建立了任意供油半径射孔井与对应的有限元模型之间产率比的关系,为射孔完井产能评价和射孔参数优选提供有效参考。

关键词:射孔完井 产率比 影响因素 有限元模型 射孔参数

中图分类号:TE257.1

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2012)02-0102-04

射孔完井是中外油田使用最为广泛的一种完井方式,产率比是衡量射孔完井效果的重要指标,也是进行射孔参数和射孔工艺优化的重要依据。许多学者对此进行了研究^[1-9],以期在实际生产中获得最高产率比。

目前,对射孔井产率比的研究方法主要有电模拟实验法和数值算法2类。孙艾因等进行了射孔完井电模拟研究^[10],Joseph等用ANSYS进行了三维模拟^[11-12],唐愉拉等编写了射孔井产率比计算的有限元程序^[13]。一般油藏供油半径达数百米,受计算机水平和模型复杂程度的限制,采用有限元模拟技术来分析整个油藏—孔眼系统是难以实现的,只能对井筒周围数十米范围进行分析。因此,许多研究者采用数据拟合的方法,得到适合任意供油半径射孔井的产率比回归公式。这类公式形式简捷,其精确程度取决于回归过程中的试验次数、基础数据选择、拟合方法和数值模拟结果等的合理程度或准确性,对现场应用人员要求也较高。为此,笔者在以上研究的基础上,推导了计算射孔井产率比的3D模型,选用非结构化网格划分方式,并应用COMSOL软件与MATLAB软件连接编程方法,对290个含有不同参数的模型进行了系统的数值模拟和数据分析;同时,建立了计算油田工程中数百米供油半径射孔井产率比的简易方法。

1 射孔井产率比3D有限元模型

1.1 数理模型

射孔完井主要有套管射孔和尾管射孔2种完井方式^[14]。射孔弹射穿油层套管、水泥环并穿透油层至某一深度,建立起油流通道。对于射孔井,射孔孔眼是沟通产层和井筒的惟一通道。射孔井的生产能力主要受产层压力、产层性质、射孔参数和射孔质量的影响。

对于射孔完井,油藏—孔眼系统的流动形式为流体在多孔介质中的渗流问题,考虑稳态分析,其运动规律满足的渗流方程和边界条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_{xx}}{\mu_o} \times \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_{yy}}{\mu_o} \times \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_{zz}}{\mu_o} \times \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0 \\ p|_{r=r_e} = p_i \\ p|_{\text{孔壁}} = p_w \\ \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为油藏沿水平面的方向; K_{xx} 为油藏 x 方向的渗透率 m^2 ; μ_o 为地层原油粘度 $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p 为油藏压力 Pa ; y 为油藏厚度方向; K_{yy} 为油藏 y 方向的渗透率 m^2 ; z 为油藏宽度方向; K_{zz} 为油藏 z 方向的渗

收稿日期:2012-01-10。

作者简介:薛世峰,男,教授,博士,从事工程力学方面的教学与科研工作。联系电话:13905461200, E-mail: xuesf@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“中东鲁卜哈里盆地B区块地应力研究及变形介质产能评估技术”(2008ZX05031-002-003-001)。

透率 m^2 ; r 为任意供油半径, m ; r_c 为射孔井供油半径, m ; p_i 为地层原始压力, Pa ; p_w 为流动压力, Pa ; r_w 为油井半径, m 。

1.2 有限元模型

所建模型主要考虑了 3 方面的影响: 孔密、孔深和孔径等射孔因素, 射孔压实程度、压实厚度、钻井污染厚度和钻井污染程度等工程因素以及油井半径和供油半径等地质因素。基于这些因素取值的不同, 系统模拟和分析了 290 个含有不同参数的模型。

射孔作业后, 每个孔眼的几何形状、半径及孔深等可能不同, 甚至有的孔眼可能会被聚能弹碎片堵塞。孔眼压实带的形状和厚度也可能不一样, 使得建模无从下手, 因此, 为了理论分析和研究的必要, 对实际情况简化或者假设如下: ①各个孔眼畅通, 无堵塞; ②各个孔眼均为圆柱形; ③各个孔眼的直径和长度均相同; ④射孔压实带和钻井污染带厚度均匀。

根据以上假设, 建立了包含孔眼、井筒、压实带和污染带的 3D 有限元模型, 模型中供油半径为 4 m, 地层渗透率为 $1 \mu m^2$, 地层原油粘度为 $10 mPa \cdot s$, 地层原油密度为 $850 kg/m^3$, 初始压力为 10 MPa, 井底压力为 9 MPa, 井筒半径为 0.1 m, 污染程度为 0.5, 污染深度为 165 mm, 压实程度为 0.01 ~ 0.5, 压实厚度为 12 mm, 孔眼直径为 10 mm, 孔密分别为 8, 12, 16, 20, 24 和 32 孔/m, 相位角分别取 0° , 90° , 120° 和 180° 。

在模型有限元计算方面, 由于地层与射孔孔眼尺寸相差悬殊, 需要实现两者在计算过程中的协调, 因此, 井筒周围(射孔区域)的 3D 网格划分极为复杂。笔者从网格尺寸和网格密度 2 方面考虑, 对模型的网格敏感性进行了分析, 得到了适用于所建模型的合理网格划分方式(图 1), 选用拉格朗日二次单元, 射孔孔眼压实带最大单元尺寸取为 0.01 m, 井筒周围钻井污染带最大单元尺寸取为 0.04 m, 其中近井筒地层区域最大单元尺寸取为 0.1 m, 外围地层区域最大单元尺寸取为 1 m。

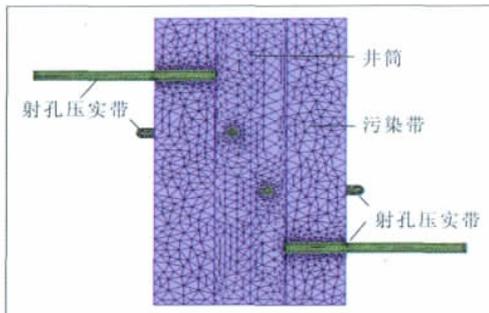


图 1 模型孔眼和污染带网格划分

2 影响产率比的射孔因素

2.1 孔深和孔密

由射孔井产率比随孔深的变化(图 2)可见, 射孔井产率比随着孔深的增大而增大, 特别是当孔深穿过钻井污染带以后, 射孔井产率比增幅加快。当孔密为 8 ~ 20 孔/m 时, 增大孔密, 产率比明显提高; 当孔密为 24 ~ 32 孔/m 时, 随着孔密的增大, 产率比增大趋势变缓。但是孔密过大会引起套管抗挤压强度降低, 因此, 应综合考虑套管强度和产率比提高效果来选择合理的孔密。

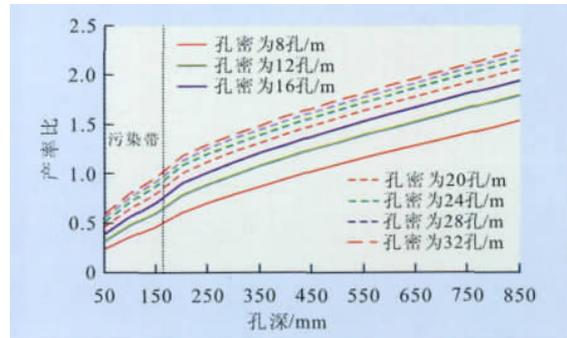


图 2 孔密、孔深与产率比的关系

2.2 相位角

由工程常用 4 种相位角(0° , 90° , 120° 和 180°)下的射孔产率比(图 3)可以看出: 在各向同性地层中, 0° 时的产率比最小, 90° 时最大, $90^\circ \sim 180^\circ$ 时变化幅度渐小。因此, 在满足其他地层条件和施工条件的前提下, 相位角为 90° 时获得的产率比最大。

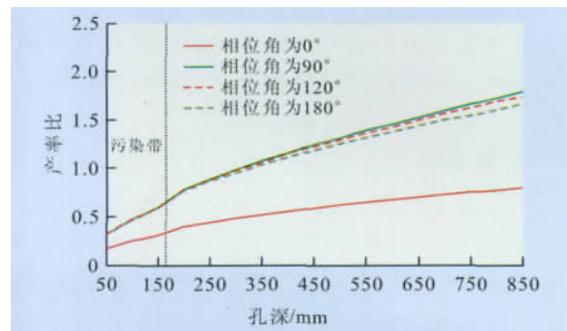


图 3 相位角、孔深与产率比的关系

2.3 射孔压实程度

在射孔过程中, 岩石颗粒的破碎和压在射孔孔眼周围造成一个压实破碎带, 其渗透率远远低于地层原始渗透率, 从而在射孔孔眼周围形成限制流体流动的屏障。当射孔压实厚度一定, 压实程度分别为 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 和 0.5 时, 由产率比与

孔深的关系(图4)可以看出,对于同一孔深,压实程度越小,产率比越小。因此,在射孔过程中,在条件允许情况下应减轻对孔眼周围地层的压实。

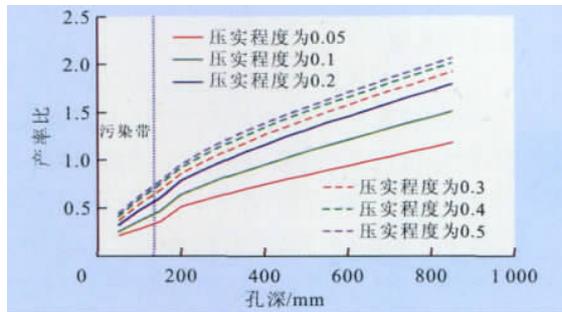


图4 不同压实程度下孔深与产率比的关系

3 实际供油半径下的产率比计算方法

3.1 供油半径对产率比的影响

根据完善井产率计算公式和射孔井产率计算公式可以得到射孔井产率比计算公式^[15] 即

$$PR(r) = \frac{\ln \frac{r}{r_w}}{\ln \frac{r}{r_w} + S} \quad (2)$$

式中: PR 为射孔井产率比; S 为总表皮系数。

当射孔井井筒半径和表皮系数一定时,射孔井产率比随供油半径变化而变化。当井筒半径为 0.1 m,总表皮系数分别为 -1 和 5 时,分析产率比随供油半径的变化(图5)可知,当供油半径小于 100 m 时,产率比随供油半径的增大而显著变化;随着供油半径的增大,产率比随供油半径变化逐渐变缓并最终趋于稳定。由于数值方法难以实现数百米油藏的计算,所以,实现有限元模型产率比向任意供油半径射孔井产率比的转换是有必要的。

3.2 计算方法

在油田生产中,多数生产井的供油半径达数百米,为了能够获得其射孔井产率比来衡量射孔效率,笔者通过模拟有限元模型,建立了与模型射孔参数和地层伤害参数相同时任意供油半径射孔井产率比的计算方法。

首先,建立射孔参数和地层伤害参数一定、特定供油半径下的有限元模型,通过数值计算可以得到模型的产率比;然后,通过产率比计算公式可以计算出模型的总表皮系数,并且依据表皮系数的定义可知,表皮系数仅与射孔参数、污染和压实参数有关,与供油半径无关,因此,模型的表皮系数与含有相同

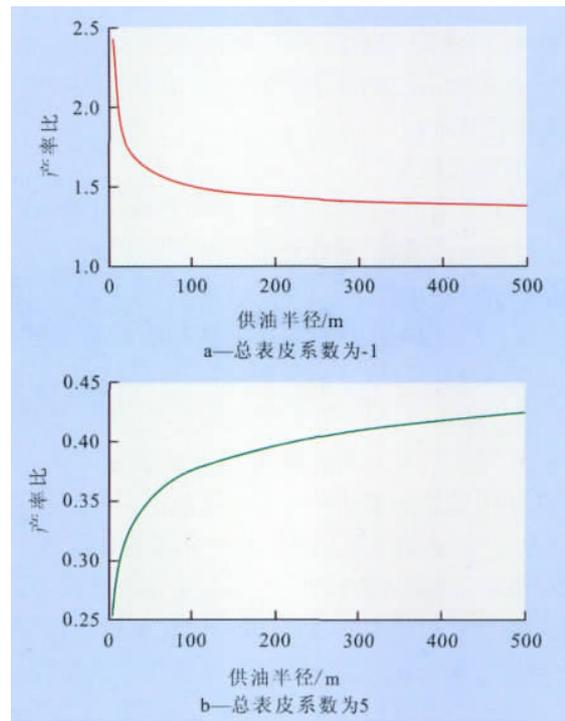


图5 射孔井产率比与供油半径的关系

射孔参数和地层伤害参数的任意供油半径下的射孔井总表皮系数是相同的,也即得到了射孔井总表皮系数;最后,结合产率比计算公式,即可计算出任意供油半径下的射孔井产率比。

3.3 算例

假设油田 1 口射孔井的供油半径为 100 m,孔密为 8 孔/m,采用螺旋布孔方式,相位角为 90°,其余射孔参数和地层参数参照 1.2 中模型参数。

选择供油半径为 4 m 的有限元模型,模型中的射孔参数和地层参数按照上述射孔井的参数设置进行数值计算,可以得到模型的产率比,代入射孔井产率比计算公式可以求得模型的总表皮系数,进而求得供油半径为 100 m 的油田射孔井的产率比。为了进行规律对比和分析,笔者还进行了孔密为 12 孔/m 的模型产率比向油田射孔井产率比的转换,并将计算结果绘制成曲线。

由图 6 可以看出,孔深未穿透污染带时,油田射孔井产率比大于有限元模型产率比,两者产率比随孔深、孔密的变化规律基本一致;孔深穿透污染带后,油田射孔井产率比逐渐小于有限元模型产率比,随着孔深的增大,前者增大的趋势比后者平缓,同时,孔密增大对于前者的影响比后者偏小。由此可见,油井产能随孔深的增加而增大,但当孔深增加到一定程度后,产能上升的幅度越来越小,从经济角度看,无限追求深穿透是不合理的,同时,这一规律也

验证了该方法的可行性。

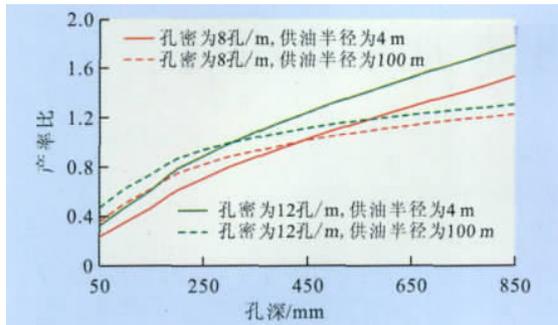


图6 供油半径为4和100 m时产率比随孔深、孔密的变化规律

4 结论

建立的射孔井产率比计算的3D有限元模型,采用COMSOL软件与MATLAB软件连接编程方法,能够精确实现包含不同射孔参数和地层伤害参数的模型产率比的计算。

对包含不同参数的模型进行数值分析得到了4个重要射孔参数对产率比的影响规律:射孔井产率比随孔深增加而增大,但当孔深增加到一定程度后,产能上升的幅度变小,提高穿透深度可获得较大产率比,但不能盲目追求深穿透;产率比随孔密增加而增大,但增加到一定程度后产率比也不再显著提高,无限追求高孔密是不合理的;在各向异性不显著的地层中,采用90°相位角射孔所得的产率比最大;预防和减少射孔压实可以有效提高产率比。

分析了供油半径对产率比的影响,建立了任意供油半径射孔井产率比与含有相同射孔参数和地层伤害参数有限元模型产率比之间的转换关系,提出了油田射孔井产率比的简易计算方法,可以实现油田工程中射孔井产率比的方便计算,为产能评价和

射孔优化提供有效参考。

参考文献:

- [1] Bell W T, Brieger E F, Harrigan J W. Laboratory flow characteristics of gun perforations [C]. SPE 3444, 1972.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Hong K C. Productivity of perforated completions in formations with or without damage [C]. SPE 4653, 1975.
- [5] 司大志. 底水油藏水平井开发优化设计[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(1): 93-95.
- [6] 虞建业, 沈飞, 顾庆宏, 等. 水平井射孔参数对压裂起裂压力的影响[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(1): 105-107, 110.
- [7] Stanley Lock. An advanced method for predicting the productivity ratio of a perforated well [C]. SPE 8804, 1981.
- [8] 冀登武, 蓝强, 李公让, 等. 地层伤害建模研究进展[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(3): 98-102.
- [9] 杨满平, 高超, 闫栋栋, 等. 特低渗透油藏单井产量递减规律及其影响因素——以长庆油田盘古梁6油藏为例[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(4): 68-71.
- [10] 孙艾因, 冯跃平, 林琪, 等. 射孔完井电模拟研究[J]. 石油钻采工艺, 1988, 13(6): 99-107.
- [11] Joseph Ansah, Mark A Proett, Mohamed Y Soliman, et al. Advances in well completion design: A new 3D finite - element wellbore in-flow model for optimizing performance of perforated completions [C]. SPE 73760, 2002.
- [12] 练章华, 孟英峰, 董敏. 射孔完井有限元模型的建立及网格划分[J]. 西南石油学院学报, 2000, 22(2): 46-49.
- [13] 唐愉拉, 潘迎德. 有限元方法在射孔完井中的应用[J]. 石油学报, 1989, 10(3): 48-58.
- [14] 张琪. 采油工程原理与设计[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000: 380-405.
- [15] 朱九成, 郎兆新, 张丽华, 等. 射孔油井产率比计算模型[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(5): 65-69.

编辑 常迎梅

欢迎广大科技人员踊跃投稿

application of each method; we also discuss key problems in decline method such as selection of decline mode, original point, decline rate and production unit, determining of stable production period and abandoned point, and the reasons for using of 2-stage-prediction method and decline method. These skills can provide important reference for SEC reserves evaluation and analysis, domestic reserves calculation and recoverable reserves calibration, and provide the proof of oilfield stable production.

Key words: reserve; dynamic evaluation; decline analysis; decline rate; reserve estimation method

Wang Shuhua, Exploration and Development Department, SINOPEC, Beijing City, 100728, China

Zhang Shoupeng, Teng Jianbin. Acidification technology and implementation of substep elutriation for low permeability reservoir—case of Xia 463 well in Linnan depression. *PGRE*, 2012, 19(2):95–97.

Abstract: After stimulation, different well achieves different productivity for the low permeability sandstone reservoir. The key is that the stimulation scheme is not formulated based on the reservoir characteristics. Using the rock sections, cast sections, X diffraction analysis and mineral dissolution experiment techniques, we can accurately understand the characteristics of reservoir rock minerals, and then formulating the corresponding acidification techniques of sub-step elutriation. Using this technique for the low permeability reservoir of Xia 463 well herein, the microcosmic test content and methods for low permeability reservoir are discussed on how to correctly formulate process of acidification technique, as well as the field surveillance. Acidification scheme is proved successful by field operation. It is proved that this technique is not only important for production maintenance, but also for the control of water saturation in low permeability reservoir over a long period of time.

Key words: low permeable sand reservoir; matrix acidification; sub-step elutriation; interparticle material; compatibility

Zhang Shoupeng, Geoscience Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China

Wang Shihu, Zhang Zhiang, Wang Lei et al. MATLAB hydraulic fracture propagation simulation technique. *PGRE*, 2012, 19(2):98–101.

Abstract: Hydraulic fracture simulation technique plays an important role in fracture design and evaluation. It has been developed for many years, however, it is mainly paying more attention to time efficiency and so on, petroleum engineers usually choose 2D or p-3D model for simulation. As we all know, with low accuracy step by step, finite difference method can not satisfy the requirement. What we want to do in this paper is just trying to establish a real 3D hydraulic fracture simulation technique in MATLAB with finite element method. And, then we compare it with the results of the mature commercial software such as GOHFER to improve the accuracy of the simulation and give more reference.

Key words: hydraulic fracture; finite element method; real 3D model; fracture propagation; numerical simulation

Wang Shihu, Oil Production Technology Research Institute, Shengli Oilfield Company, Dongying City, Shandong Province, 257000, China

Xue Shifeng, Wang Feifei, Wang Haijing. Numerical study of productivity ratio and factors of perforated well. *PGRE*, 2012, 19(2):102–105.

Abstract: Perforated completion is widely used, in order to study the effect of perforation factors on perforation productivity ratio and get better perforation process selection, 3D finite element models with factors of perforation parameters (perforation depth, diameter, density and phase), compaction and damage for productivity ratio (PR) calculation in perforation completion are established in this paper. The code connecting software COMSOL and MATLAB are used to simulate and analyze 290 different models with their specific parameters. The effect of perforation depth, diameter, density, phase and compaction on perforation productivity ratio is obtained, and the flow pattern near perforation can be observed by the model. Considering oilfield practice, a simple method of PR calculation and the relationship of well PR and model PR are provided, which will be useful for evaluation of productivity and optimizing perforation completion design.

Key words: perforation completion; productivity ratio; influence factors; finite element model; perforation parameters

Xue Shifeng, College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266555, China

Liu Ming, Zhang Shicheng, Mou Jianye. Dissolution pattern of radial wormhole model in carbonate acidizing. *PGRE*, 2012, 19(2):106–110.

Abstract: In response to the questions of wormholing during carbonate acidizing, this paper derives a radial two-scale continuum model based on former researches, and studies the dissolving pattern and the effect of some key factors on it, and gets the conditions of the occurrence of wormholes. The results show that: the conclusions got from the models accord well with the experiments conducted by former researchers perfectly; with the rise of diffusion efficiency and decrease of injection rate, the diffusion effect becomes stronger relatively and it is easier to form face dissolution; with the decrease of diffusion efficiency and increase of injection rate, the convection effect becomes more apparent relatively, and it is easier to form uniform dissolution; the wormhole, which can provide adequate permeability and minimize the injection volume of acid at most, is formed when the effect of convection and diffusion is equivalent; the magnitude of heterogeneity has an optimal value, below which the wormhole density and breakthrough volume decrease under more heterogeneity, above which the wormhole density and breakthrough volume become insensitive to the heterogeneity.

Key words: carbonate; acidizing; wormhole; radial model; breakthrough volume; heterogeneity

Liu Ming, MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China