



CSTAM 2012-B03-0085

一种计算射孔井产率比的三维有限元新方法

欧阳伟平，刘曰武

中国科学院力学研究所

第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

一种计算射孔井产率比的三维有限元新方法¹⁾

欧阳伟平*, 刘曰武*,²⁾

* (中国科学院力学研究所, 北京海淀区 100190)

摘要 为了更准确更全面地计算射孔井的产率比, 本文建立了一种射孔井的三维稳态渗流模型, 模型考虑了射孔自身结构、射孔压实区、储层渗透率各向异性 and 井筒周围污染区的影响。推导了模型的三维有限元求解方法, 采用高密度的四面体网格并且使用并行计算, 获得了模型的数值解。通过与传统计算射孔井产率比的方法对比发现: Karakas 方法的精度要明显高于 Hagoort 方法, 但 Karakas 方法也存在一定的误差, 尤其在特定的参数下。分析了各种参数对射孔井产率比的影响, 结果表明增加射孔长度能不断的提高产能, 而射孔密度存在一个最优值。射孔压实作用会严重降低射孔井的产能, 但可以提高射孔密度来弥补其产能的损失。射穿井筒周围的污染区是减小污染区对射孔井产能影响的最有效手段。

关键词 射孔井, 产率比, 拟表皮系数, 三维有限元, 稳态渗流

引言

射孔完井是油气井最常用的一种完井方式, 目前绝大多数的油气井为射孔井。在给定的油气储层, 射孔完井参数和储层特征决定了射孔井的产能, 射孔完井参数包括射孔长度、射孔密度、射孔相位角和射孔孔径。储层特征是指渗透率各向异性、射孔造成的压实区和井筒周围的污染区的特征。射孔井产率比是相同储层条件下射孔井产能与裸眼井产能之比, 它是表征射孔完井效果最重要的参数。计算射孔井产率比最有效的方法是先计算射孔井的拟表皮系数, 再折算为产率比。如何快速精确地计算不同射孔完井参数下的射孔井产率比是研究射孔井产能的重要内容, 这也为寻求最优化的射孔完井设计提供技术支撑。

国外对射孔井产能已有大量的研究^[1-4], Locke^[1]利用Ansys软件首次准确地描述了射孔的几何分布, 并通过软件对射孔井模型进行了三维有限元方法的求解。Tariq^[2]同样是利用Ansys软件, 但他指出Locke使用的网格量不够使得其计算产率比偏大。Karakas和Tariq^[3]在结合数值解和解析分析方法的基础上, 提出了一种计算射孔拟表皮系数的半解析方法, 并提供了详细的计算步骤, 这种方法成为了工程中最常用的方法, 本文简称其为Karakas方法。最近Hagoort^[4]提出了一种计算射孔表皮系数的解析

方法, 并认为在各向异性储层中Karakas方法不适用, 此结论有待于验证。

国内从上世纪八十年代以来开始对射孔井产能进行了研究^[5-7], 孙艾茵等^[5]利用电模拟的方法分析了射孔完井参数对产率比的影响。唐愉拉与潘迎德^[6]推到了射孔井模型的有限元求解方法, 此后的大部分研究都是利用有限元软件对射孔井产率比进行数值研究。

为了获得精度更高的产率比并验证传统计算产率比方法的准确性, 本文建立一种射孔井稳态渗流的模型。利用三维有限元方法计算得到模型的数值解, 为了确保数值解的精度, 采用高密度的四面体网格, 并利用并行化的SuperLU线性方程求解器求解, 从而能达到快速求解的目的。通过将得到的井底无量纲压力值换算得到射孔表皮系数, 从而可以得到产率比。将计算得到的产率比与传统方法计算的值进行对比, 验证传统方法的准确性, 为高精度计算射孔井产率比提供参考。

1 物理模型

(1) 储层全部钻开, 下套管射孔完井, 其射孔方式为螺旋均匀布孔, 相位角 θ 一定, 射孔为具有一定直径 r_p 一定长度 L_p 的圆柱型, 井筒周围是厚度为 L_{fd} 的污染区, 射孔压实区的半径为 r_{pd} , 如图1所示。

1) 基金资助项目: 国家重大专项课题的资助 (课题编号 2011ZX05038-003)

2) Email: lywu@imech.ac.cn

Karakas方法^[3]是工程中最常用的计算方法,而Hagoort^[4]提出了另外一种计算方法,其计算的值与Karakas方法计算的值相差较大。为了验证这两种方法的准确性,取相同的计算实例,其计算参数见表1。

表1 射孔完井参数及储层参数

井筒半径 r_w	11.1cm	压实区半径 r_{pd}	1.91cm
泄流半径 r_o	227m	压实区 k_{pd}/k	0.2
射孔半径 r_p	0.635cm	井筒污染区厚度	15.2cm
射孔长度 L_p	30.5cm	污染区 k_{fd}/k	0.4
射孔密度	13.1孔/m	各向异性 k_{VD}	0.2
射孔相位角 θ	90°		

根据给定的参数,计算得到射孔井表皮系数以及产率比,将其与另外两种计算方法得到的值进行对比,得到这两者的误差,见表2所示。由计算结果对比可知Karakas方法计算得到的产率比偏大,平均偏大值为0.01。Hagoort方法计算得到的产率比偏小,平均偏小量为0.04,其误差均要大于Karakas方法的误差,故Karakas方法计算精度要优于Hagoort方法。

表2 不同方法计算得到表皮系数及产率比

不同的情形	本文	Karakas	Hagoort
不考虑PD FD A	1.06	1.07	1.04
考虑PD	0.94	0.93	0.9
考虑FD	1.03	1.04	1.03
考虑A	0.97	0.98	0.94
考虑PD FD	0.88	0.86	0.85
考虑PD A	0.81	0.86	0.73
考虑FD A	0.92	0.94	0.91
考虑PD FD A	0.74	0.78	0.64
误差	/	0.01	-0.04

PD—射孔压实区 FD—污染区 A—渗透率各向异性

3.1 射孔长度的影响

为了验证各参数下Karakas方法的准确性以及获得精度更高的产率比,需计算各种参数的影响。图3为射孔密度为12孔/m,不同射孔长度下的产率比。从图中可以看出,在射孔长度较短时($L_p \leq 10\text{cm}$),Karakas所计算的产率比与本文数值解能够保持一致。当射孔长度

较大时($L_p > 10\text{cm}$),Karakas计算的误差逐渐加大,最后的误差为0.01,并基本稳定。误差可能是由于Karakas所基于的有限元方法使用的网格不够,造成计算的压力值偏小,即而表皮系数偏小,造成产率比偏大。随着射孔长度的增加,产率比不断的增加,当射孔长度约为21cm时,即每米储层中的射孔总长度为252cm,射孔产率比达到1,此时射孔井的产能与裸眼井的产能相同。增加射孔长度能够大大增加产能,且在后期的效果并没有太大的减弱。说明了深度射孔技术是增加油气井产能的重要手段。

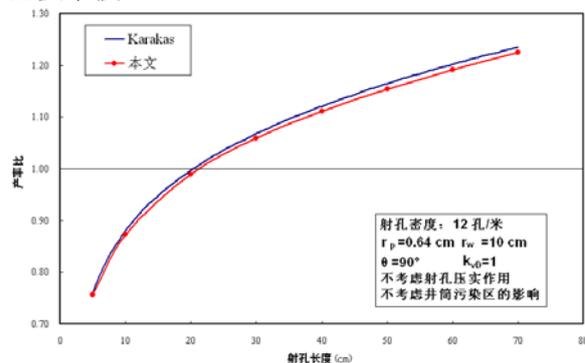


图3 不同射孔长度下的产率比

3.2 射孔密度的影响

图4为不同射孔密度下的产率比,从图可知,Karakas方法计算的产率比同样是偏大,且在射孔密度较小时,其产率比误差值更大,达到了0.025,在射孔密度大于10孔/米时的误差值均在0.01之下。随着射孔密度的增加,产率比增加,但产率比的增加值在逐渐减小,这是由于射孔密度的增加,使得射孔间的间距减小,射孔间的干扰加大,从而影响了产能的提高。射孔密度为8孔/米时的产率比为1,计算其每米储层中射孔总长度为240cm,而3.1中所计算的值为252cm,由此也可以说明,相同产能条件下,射孔密度越大所需要的射孔总长度越大,故增加射孔长度有着比增加射孔密度更好的效果。此外,增加射孔密度会降低套管的强度,文献^[21]分析认为在射孔密度小于20孔/米时,射孔密度变化对套管最大Mises应力影响比较小。根据射孔产率比的计算值可知,射孔密度在大于20孔/米后增加射孔密度对产能的贡献很小,因此推荐实际工程中应采用射孔密度为20孔/米左右。

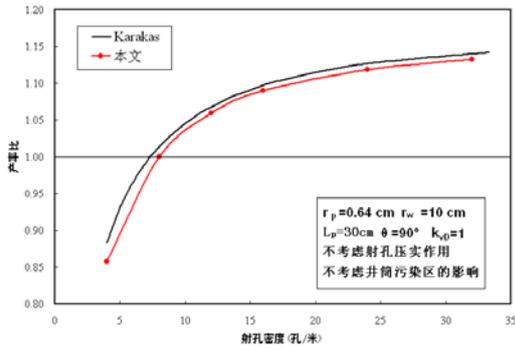


图4 不同射孔密度下的产率比

3.3 射孔压实作用的影响

射孔造成围绕着射孔孔道的局部压实区在很大程度上限制了流体流入孔道，增加了渗流阻力，从而降低了射孔井的产能。射孔区的半径以及射孔区的渗透率主要取决于储层的岩石力学性质，图 5 为不同压实区渗透率的产率比。从图可知，Karakas 方法在低渗透率时，计算的结果偏小，而在较高渗透率时，计算的结果偏大。压实区的渗透率对产能的影响很明显，射孔孔道都被压实区所包围，压实区的渗流特征决定了射孔井的产能。从计算结果可知，没有压实区存在时产率比为 1.06，而存在压实区半径为 1.901cm，渗透率为原始渗透率的 0.1 时，产率比 0.84，产率比减小了 21%。射孔压实区的存在会减弱射孔间的干扰作用，故可以加大射孔密度来提高产能。

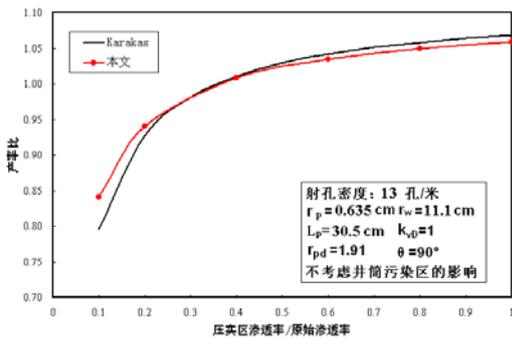


图5 不同压实区渗透率比的产率比

3.4 井筒周围污染区的影响

由于钻井过程给储层造成的污染，使得井筒周围普遍存在一定厚度的圆形污染区。图 9 为存在污染区和不存在污染区时，不同射孔长度的产率比，由于 Karakas 并没有给出计算相位角为 90°，射孔没能射穿污染区时的计算方法，故图 6 只给出了本文数值方法计算的值。污染区的厚度为 15cm，射孔长度小于或等于

15cm 时，射孔没有射穿污染区，即图中虚线左边的情形，而射孔长度大于 15cm 时，射孔射穿了污染区，即图中虚线右边的情形。由图可知，两条曲线分别代表有污染区和没有污染区情况下的产率比，两曲线的数值差代表的是污染区使得产率比的损失值。计算结果表明，在没射穿污染区时，两曲线的差值是巨大的，而射穿了污染区后，随着射孔长度的增加，差值在逐渐减小，最后有两者的产率比基本一致。这说明没有射穿污染区时污染区对产能的影响很大，而射穿了污染区后，污染区的影响会大大降低，射孔长度超出一定值后，其影响甚至可以忽略。由此可知，射穿污染区是减小污染区对产能影响的最有效的手段。

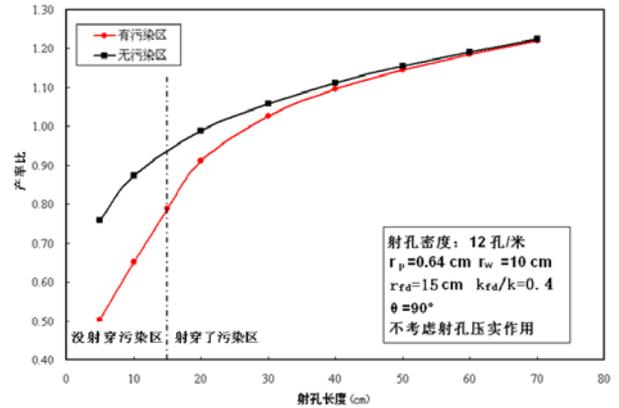


图6 污染区对产率比的影响

4 结 论

(1) 建立了一种射孔井的三维稳态渗透模型，推导了模型的有限元解法，采用了高密度的四面体网格，利用并行化的线性方程组求解，使得该方法能够更快速更准确地计算各种射孔参数组合下的射孔井产率比，为射孔完井设计以及射孔井产能评价提供指导。

(2) 通过与传统计算产率比方法的对比，验证了 Karakas 方法计算的精度要明显高于 Hagoort 方法，但 Karakas 方法在一些特定的参数组合下，其计算误差会比较大。

(3) 射孔完井参数和储层特征对产能具有重要的影响。射孔长度是提高射孔井产能的关键参数。射孔密度存在最优值，射孔压实作用会降低射孔井的产能，减弱射孔间的干扰，故可以提高射孔密度来弥补产能的损失。此外对于井筒周围污染区的影响，应加大射孔长度，射穿污染区会大大降低污染区对产能的影响。

参考文献

- 1 Locke S. An Advanced Method for Predicting the Productivity Ratio of a Perforated Well. *Journal of Petroleum Technology*, 1981.33 (12): 2481-2488.
- 2 Tariq S.M., Evaluation of Flow Characteristics of Perforations Including Nonlinear Effects with the Finite-Element Method. *SPE Production Engineering*, 1987. 2(2): 104-112.
- 3 Karakas M. and Tariq S.M. Semianalytical productivity models for perforated completions. *SPE Production Engineering*, 1991. 6(1): p. 73-82.
- 4 Hagoort J. An analytical model for predicting the productivity of perforated wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007. 56(4): 199-218.
- 5 孙艾茵, 冯跃平等. 射孔完井电模拟研究. *石油钻采工艺*, 1988(6): 99-107.
- 6 唐愉拉与潘迎德. 有限元方法在射孔完井中的应用. *石油学报*, 1989(3): 48-58.
- 7 薛世峰, 王斐斐与王海静. 射孔井产率比及其影响因素数值分析. *油气地质与采收率*, 2012(2): 102-105+118.
- 8 唐汝众等. 射孔参数对套管强度影响的有限元分析. *石油机械*, 2010(1): 32-34.

A NEW 3D FINITE ELEMENT METHOD FOR CALCULATING THE PRODUCTIVITY RATIO OF A PERFORATED WELL

OUYANG Weiping LIU Yuewu

(Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

Abstract In order to get more accurate and more comprehensive productivity ratios than that of previous methods, this paper presents a steady seepage model for perforated wells. The model considers perforation own structure, crushed zone, reservoir permeability anisotropy and formation damaged zone. A new 3D finite element method for solving the model is proposed. The numerical solution of the model is obtained by using high density tetrahedral meshes and parallel computing method. Comparing the calculated results with the results of the traditional method shows that precision of Karakas method is higher than that of Hagoort method. However, the Karakas method also has some errors, especially at some specific perforating parameters. The effects of perforating parameters and reservoir characteristic on productivity ratios are studied. It shows that increasing perforation length can constantly increase the productivity of perforated wells. The perforation density and perforation phase angle have an optimal value. The crushed zone will seriously reduce the productivity of perforated wells. In this situation, increasing the perforation density can make up for the productivity loss. Shot through the damage zone around the wellbore is the most effective way to reduce the effect of the damage zone on productivity of perforated wells.

Key words perforated wells, productivity ratio, pseudo-skin, 3-D FEM, steady seepage