

文章编号: 1000-4750(2014)06-0250-07

计算射孔井产率比的三维有限元新方法

欧阳伟平, 刘曰武, 万义钊

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要: 为了更精确更全面地计算射孔井的产率比, 该文建立了一种射孔井的三维无量纲稳态渗流模型, 推导了模型的三维有限元求解方程, 采用高密度四面体网格并使用并行计算, 获得了模型的数值解。与传统计算射孔井产率比方法的对比发现: Karakas 方法的精度要明显高于 Hagoort 方法, 但 Karakas 方法在一些参数下存在一定误差且不能计算特定条件下的产率比; 该文提供的有限元方法在相位角、污染区影响等方面更具普适性。分析了射孔几何结构、井周污染区、射孔压实区和储层渗透率各向异性等因素对射孔井产率比的影响, 结果表明: 增加射孔长度能不断地提高产能; 射孔密度和相位角均存在一个最优值; 射穿污染区是减小污染区影响产能的有效手段; 射孔压实区和低垂向渗透率都会严重降低射孔井的产能。该研究为射孔井的完井设计、产能预测提供理论指导。

关键词: 稳态渗流; 产率比; 三维有限元; 表皮系数; 完井设计; 产能预测

中图分类号: TE319 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.12.0975

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

OUYANG Wei-ping, LIU Yue-wu, WAN Yi-zhao

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to get more accurate and comprehensive productivity ratios, this paper presents a 3D steady dimensionless porous flow model for perforated wells. A new 3D finite element modeling method is developed. The numerical solution is obtained using fine tetrahedral meshes and a parallel computing method. By comparing the calculated results with the results of the traditional methods, it shows that precision of Karakas method is higher than that of Hagoort method. However, the Karakas method still has some variable-dependent errors, meaning that it cannot be used under certain conditions and with specific values of some parameters. The proposed finite element method is more useful than the Karakas method in calculating the productivity ratios of certain perforated wells with specific phase angles or impacts from pollution. The effects of actual perforation geometry, formation damaged zones, perforation compacted zones, and reservoir permeability anisotropy on productivity ratios were also analyzed, and the results show that increasing perforation length tends to increase productivity. Additionally, there are optimal values for both perforation density and perforation phase angle, and shooting through the formation damaged zone around the wellbore is the most effective way to reduce the effect of damaged zones on productivity. Perforation compacted zones and those with low vertical permeability dramatically reduce productivity. This study provides theoretical guidance to improve the completion design and predict the productivity of perforated wells.

Key words: steady seepage; productivity ratio; 3D FEM; skin factor; completion design; productivity prediction

收稿日期: 2012-12-17; 修改日期: 2013-06-01

基金项目: 国家重大专项课题“煤层气井生产测试技术”项目(2011ZX05038-003)

通讯作者: 刘曰武(1965), 男, 山东人, 研究员, 博士, 从事渗流力学及油气藏工程方面的研究(E-mail: lywu@imech.ac.cn).

作者简介: 欧阳伟平(1986), 男, 江西人, 博士生, 从事渗流力学与油气井试井及产能研究(E-mail: ouyangweiping@imech.ac.cn);

万义钊(1988), 男, 湖北人, 硕士生, 从事渗流力学与油气井试井研究(E-mail: wanyizhao@imech.ac.cn).

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属于射孔井。对于确定的油气储层,射孔完井参数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、射孔造成的压实区厚度及损伤程度、井周污染区的厚度及污染程度等。计算不同参数组合下的产率比是射孔完井设计和产能预测的重要内容。射孔井产率比是指相同储层条件下射孔井产能与无污染裸眼井产能之比,它是衡量射孔完井效果的一个重要参数。计算射孔井产率比最有效的方法是先计算射孔井的总表皮系数,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理论依据。

国外对射孔井产能已有较多的研究^[1-11], Muskat^[1]首次分析了射孔井的产能问题,孔道被看作为螺旋分布在井筒上的面源,即认为孔道并没有延伸至储层中。McDowell 和 Muskat^[2]利用电解槽实验研究了孔道延伸到储层后的产能,发现如果射孔长度足够,射孔井的产能将高于裸眼井的产能。Harris^[3]首次利用有限差分法研究了射孔井产能,但是由于有限差分处理不规则边界的局限性,模型将孔道作为平面楔形状处理,使得射孔几何描述不够准确。Klotz^[4]利用二维有限元方法分析了射孔压实作用以及井周污染区的影响。Locke^[5]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计算。Tariq^[6]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^[7]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井表皮系数的半解析方法,并给出了详细的计算步骤,本文简称其为 Karakas 方法,这种方法成为了工程中最常用的方法,但其只能计算六种特定相位角且不能计算除 180° 相位角以外的未射穿污染区的情形,此外其精度有待验证。最近 Hagoort^[9]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,此结论也有待于验证。

国内从 20 世纪 80 年代开始对射孔井产能进行了研究^[12-18],孙艾茵等^[12]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^[13]推导了射孔井渗流模型的有限元求解方法,此后的大部分研究^[16-18]都是利用有限元软件对射孔井产

率比进行数值研究。国内对产率比研究还不够系统,各方法计算得到的产率比没有进行对比,缺乏对不同射孔完井参数下产率比精度的研究,对所选用的射孔相位角太过单一,没有研究储层渗透率各向异性对产率比的影响。

为了获得各种条件下高精度的产率比,验证传统计算方法的精度,本文建立一种射孔井无量纲稳态渗流模型。利用三维有限元方法计算获得模型的数值解,为了确保数值解的精度,采用高密度的四面体网格并要求网格量达到数值解对网格不敏感,利用并行化 SuperLU 线性方程组求解器求解,求解速度大大提升。将得到的井底无量纲压力值转换为总表皮系数,再换算得到产率比。通过得到的产率比与传统方法计算得到的值进行对比,验证并比较 Karakas 方法与 Hagoort 方法的精度,为高精度计算射孔井产率比提供有效的手段。

1 物理模型描述

为了建立数学模型,需基于下列假设:

1) 原始储层为均匀等厚水平板状,渗透率在垂直方向与水平方向异性,垂向渗透率为 K_v ,水平方向渗透率为 K_h ,上下边界均为不渗透边界。

2) 储层中的流体为弱可压缩、定常粘度的单相牛顿流体,流体在储层中的流动为层流状态,遵从达西定律,且流体只能通过孔道流入到井筒。

3) 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,射孔间距 h_p 一定,孔道为具有半径 r_p 长度 L_p 的圆柱型,围绕孔道的压实区半径为 r_{pd} ,井筒周围是厚度为 L_{fd} 的污染区,如图 1 所示。

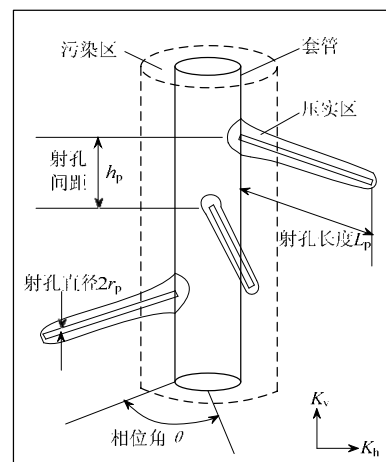


图 1 射孔分布示意图

Fig.1 Geometry of perforated well

4) 所有的孔道均未堵塞且具有无限大导流能力, 即各孔道的压力均等于井筒压力。

5) 为了计算方便, 模型外边界为圆形定压边界, 忽略重力和温度变化对流动的影响。

2 数学模型及求解

2.1 数学模型

所有的孔道均具有无限大导流能力且流体只能通过孔道流入井筒, 故将孔道作为模型的内边界。孔道中各点的流量不相等, 即内边界的压力法向导数值未知, 但是各点的压力相等, 且孔道的流量总和一定。因此将压力导数作为未知量, 并令孔道各点的压力相等, 联立方程组。

无量纲控制方程:

$$K_{ID} \left(\frac{\partial^2 p_D}{\partial x_D^2} + \frac{\partial^2 p_D}{\partial y_D^2} + K_{vD} \frac{\partial^2 p_D}{\partial z_D^2} \right) = 0 \quad (1)$$

初始条件: $p_D = 0$ (2)

边界条件:

内边界条件: $\sum_{j=1}^N K_{ID} A_{jD} \left(\frac{\partial p_{jD}}{\partial n'} \right) \Big|_{\Gamma_i} = 2\pi h_D$ (3)

$$p_{jD} = p_{wD} \quad (4)$$

外边界条件: $p_D|_{r_o} = 0$ (5)

无量纲量: 在不考虑渗透率各向异性时, K_{ID} 为区域无量纲渗透率, 在考虑渗透率各向异性时, K_{ID} 为区域水平方向无量纲渗透率。当处于污染区时, $K_{ID} = K_{id}/K$, 当处于压实区时, $K_{ID} = K_{pd}/K$, 当处于原始储层区, $K_{ID} = 1$; K_{vD} 为无量纲垂向渗透率, $K_{vD} = K_v/K_h$; p_D 为无量纲压力, $p_D = \frac{K_h h(p_i - p)}{1.842 q \mu B}$;

x_D, y_D, z_D 是无量纲坐标 $x_D = x/r_w, y_D = y/r_w, z_D = z/r_w$;

A_{jD} 为内边界离散单元面的面积; $\frac{\partial p_{jD}}{\partial n'}$ 为内边界修正的无量纲压力法向导数; p_{jD} 为内边界离散结点的无量纲压力; h_D 为无量纲储层厚度 $h_D = h/r_w$; p_{wD} 为井筒无量纲压力, N 为内边界离散单元面数。

有量纲量: B 是体积系数; $C_i/(1/\text{MPa})$ 是总压缩系数; h/m 是储层有效厚度; K/mD 是原始储层渗透率; K_v/mD 是垂直方向的渗透率; K_h/mD 是水平方向的渗透率; K_{id}/mD 为污染区的渗透率; K_{pd}/mD 为压实区的渗透率; p/MPa 是储层压力; p_i/MPa 是储层原始压力; p_w/MPa 是井底压力; $q/(m^3/d)$ 是总流量; r_w/m 是井筒半径; $\mu/(mPa \cdot s)$ 是储层中流体

的粘度。

2.2 有限元方法求解

利用伽辽金加权余量法^[19], 选取四面体为其基本单元, 单元差值函数 $N_i^e = a_i + b_i x + c_i y + d_i z, i=1, 2, 3, 4$, 则有:

$$\iiint_V N_i^e K_{ID} \left(\frac{\partial^2 p_D^e}{\partial x_D^2} + \frac{\partial^2 p_D^e}{\partial y_D^2} + K_{vD} \frac{\partial^2 p_D^e}{\partial z_D^2} \right) dV = 0$$

其弱表示形式为:

$$\iiint_V K_{ID} \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial x_D} \frac{\partial p_D^e}{\partial x_D} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y_D} \frac{\partial p_D^e}{\partial y_D} + K_{vD} \frac{\partial N_i^e}{\partial z_D} \frac{\partial p_D^e}{\partial z_D} \right) dV = \oint_{S^+} N_i^e K_{ID} \frac{\partial p_D^e}{\partial n'} dS$$

单元压力为: $p_D^e = p_i^e N_i^e + p_j^e N_j^e + p_k^e N_k^e + p_l^e N_l^e$,

其中, $p_i^e, p_j^e, p_k^e, p_l^e$ 为单元节点值, 代入得到方程:

$$\begin{aligned} & K_{ID} V (b_i^2 + c_i^2 + K_{vD} d_i^2) p_i^e + \\ & K_{ID} V (b_i b_j + c_i c_j + K_{vD} d_i d_j) p_j^e + \\ & K_{ID} V (b_i b_k + c_i c_k + K_{vD} d_i d_k) p_k^e + \\ & K_{ID} V (b_i b_l + c_i c_l + K_{vD} d_i d_l) p_l^e = \\ & \frac{K_{ID} A}{6} \frac{\partial p_i}{\partial n'} + \frac{K_{ID} A}{12} \frac{\partial p_{jkl}}{\partial n'} + \frac{K_{ID} A}{12} \frac{\partial p_{klj}}{\partial n'} \end{aligned} \quad (6)$$

由内边界总流量等于生产量知:

$$\sum_{j=1}^N A_{jD} K_{ID} \left(\frac{\partial p_{jD}}{\partial n'} \right) \Big|_{\Gamma_i} = 2\pi h_D \quad (7)$$

内边界各点的压力相等: $p_{jD} = p_{wD}$ (8)

V 是四面体体积, A 为四面体其中一个面的面积。式(6)中等式右端项在网格边为内边界时才有, 联立上列式(6)~式(8), 编制程序, 由单元方程组装系统方程组, 求解系统方程组, 既可得到任意网格结点的压力。

图 2 为利用 Gambit 软件离散的计算区域网格

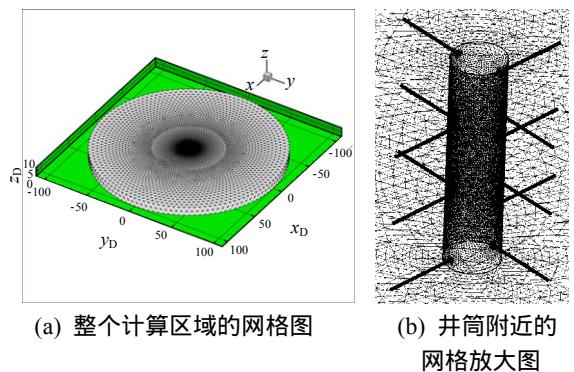


图 2 储层四面体离散网格图

Fig.2 Tetrahedral mesh image of reservoir

图,外边界为圆形定压边界,半径 $R_D=100$,这足够达到系统径向流阶段,计算的储层厚度 $h_D=12h_p$ 。为了尽量消除网格引起的数值误差,确保数值解对网格不敏感,采用的四面体网格量在 80 万~150 万范围内,这大大超过了以往所使用的网格量,从而保证了计算的精度。在井筒附近的压力梯度大于远离井筒处,故在井筒附近区域的网格密度要远大于远离井筒处。

3 计算结果及分析

在计算产率比之前,先验证本文方法的准确性。由于射孔井内边界复杂,目前无法得到其稳态渗流时井底无量纲压力的解析解,但已知裸眼井的解析解为 $p_{wD}=\ln R_{eD}$,其中 R_{eD} 为外边界无量纲半径。为了验证本文方法的准确性,对内边界做特殊处理,将圆柱形裸眼内边界代替复杂的孔道内边界,由于裸眼井与射孔井除了内边界形状不同外,并无本质区别,故这种处理并不会影响本文方法的验证。将计算得到不同外边界半径下的井底无量纲压力值与裸眼井解析解对比,如图 3 所示。从图 3 可知,本文方法计算裸眼井井底压力的结果与解析解一致,验证了本文方法的准确性。

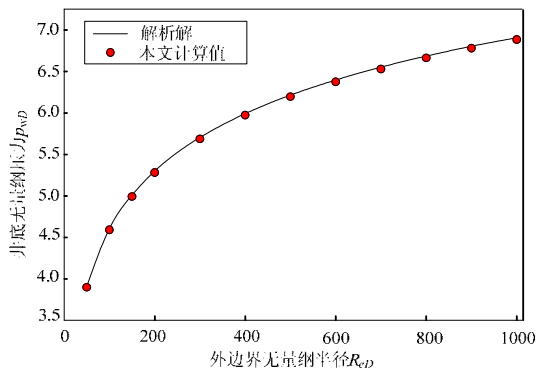


图 3 计算裸眼井井底压力值的对比图

Fig.3 Comparison of open hole well wellbore pressures

根据射孔井模型以及有限元求解方法,计算得到不同参数组合下的井底无量纲压力 p_{wD} 。射孔井的稳态渗流时^[20] $p_{wD}=\ln R_{eD}+S_t$,由此可得射孔井的总表皮系数 S_t 。根据产率比的定义式(9)可得到产率比^[3],式中 r_o 为泄流半径。

$$R = \frac{\ln(r_o / r_w)}{\ln(r_o / r_w) + S_t} \quad (9)$$

Karakas 方法^[7]是工程中最常用的半解析方法,而 2007 年 Hagoort^[9]提出了一种解析方法,其计算的值与 Karakas 方法计算的值相差较大,并归结为

Karakas 方法的误差。为了验证这两种方法的精度,取相同的计算实例^[9],其计算参数见表 1。

表 1 实例的计算参数
Table 1 Parameter calculation

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|----------------|----------|------------------|---------|
| 井筒半径 r_w | 0.111cm | 压实区半径 r_{pd} | 0.0191m |
| 泄流半径 r_o | 227m | 压实区 K_{pd}/K | 0.2 |
| 射孔半径 r_p | 0.00635m | 污染区厚度 L_{fd} | 0.152m |
| 射孔长度 L_p | 0.305m | 污染区 K_{fd}/K | 0.4 |
| 射孔密度 | 13.1 孔/m | 渗透率各向异性 K_{vD} | 0.2 |
| 射孔相位角 θ | | | 90° |

根据给定的参数,计算得到不同情形下的射孔井表皮系数和产率比,将其与另外两种计算方法得到的值进行对比,见表 2 所示。由计算结果对比可知,在不考虑 PD、FD、A 的情况下,Karakas 方法计算得到的表皮系数略小于本文计算的值,从而得到的产率比略偏大,而 Hagoort 计算的表皮偏大较多,计算出的产率比偏小。在考虑 PD、FA、A 条件下,Karakas 得出的误差值加大,而 Hagoort 方法的误差值也加大,但 Karakas 方法的误差值要小于 Hagoort 方法。其它情况下,Hagoort 方法的误差值也要明显大于 Karakas 方法,故 Karakas 方法计算精度要优于 Hagoort 方法。

表 2 不同情形计算得到表皮系数及产率比

Table 2 Skin and productivity ratios under different conditions

| 不同的情形 | 表皮系数 | | | 产率比 | | |
|-------------|-------|---------|---------|------|---------|---------|
| | 本文 | Karakas | Hagoort | 本文 | Karakas | Hagoort |
| 不考虑 PD FD A | -0.43 | -0.49 | -0.27 | 1.06 | 1.07 | 1.04 |
| 仅考虑 PD | 0.50 | 0.61 | 0.81 | 0.94 | 0.93 | 0.90 |
| 仅考虑 FD | -0.22 | -0.30 | -0.19 | 1.03 | 1.04 | 1.03 |
| 仅考虑 A | 0.21 | 0.13 | 0.46 | 0.97 | 0.98 | 0.94 |
| 考虑 PD FD | 1.03 | 1.27 | 1.34 | 0.88 | 0.86 | 0.85 |
| 考虑 PD A | 1.78 | 1.24 | 2.88 | 0.81 | 0.86 | 0.73 |
| 考虑 FD A | 0.63 | 0.52 | 0.78 | 0.92 | 0.94 | 0.91 |
| 考虑 PD FD A | 2.73 | 2.11 | 4.27 | 0.74 | 0.78 | 0.64 |

注: PD 为压实区; FD 为污染区; A 为渗透率各向异性。

3.1 射孔长度的影响

为了验证各参数下 Karakas 方法的精确性,分析各影响因素并获得精度更高的产率比,需计算各种参数对产率比的影响。图 4 为射孔密度为 12 孔/m,不同射孔长度下的产率比。从图 4 可以看出,在射孔长度较短时($L_p < 0.1m$),Karakas 所计算的产率比与本文数值解基本一致。当射孔长度较大时($L_p > 0.1m$),Karakas 计算的误差稍微增加。误差可能是由于 Karakas 所基于的有限元方法使用的网格不够,造成计算的数值偏小,因此表皮系数偏小,造成产率比偏大。此外,随着射孔长度的增加,产率比不断的增加,当射孔长度约为 0.21m 时,即每

米储层中的射孔总长度为 2.52m，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，这说明了深度射孔技术是增加油气井产能的重要手段。

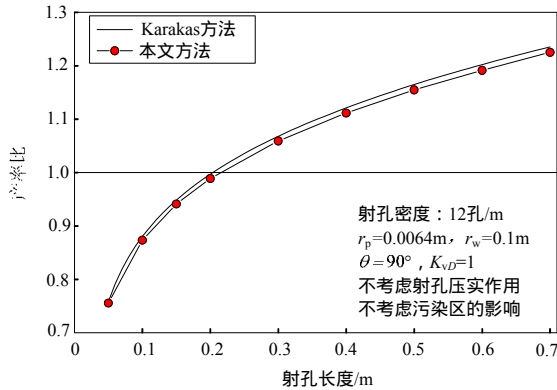


图 4 不同射孔长度下的产率比

Fig.4 Productivity ratios under different perforation length

3.2 射孔密度的影响

图 5 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。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，使得孔道间的间距减小，孔道间的干扰加大，从而影响了产能的提高。射孔密度为 8 孔/m 时的产率比为 1，计算其每米储层中射孔总长度为 2.4m，而 3.1 中所计算的值为 2.52m，由此也可以说明，相同产能条件下，射孔密度越大的，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/m 时，射孔密度变化对套管最大 Mises 应力影响比较小。根据产率比的计算值可知，射孔密度在大于 20 孔/m 后增加射孔密度对

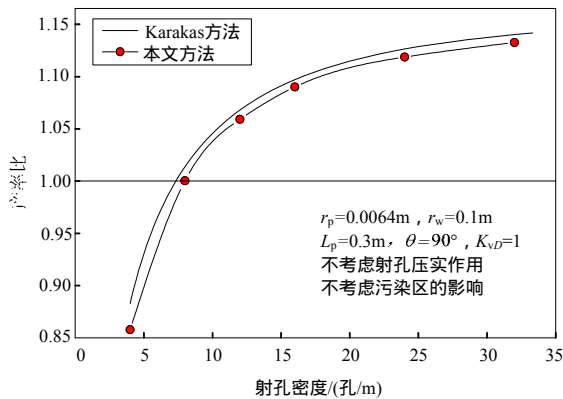


图 5 不同射孔密度下的产率比

Fig.5 Productivity ratios under different perforation density

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/m 左右。

3.3 射孔相位角的影响

图 6 为产率比随射孔相位角的变化曲线，Karakas 方法只能计算 6 种特定的相位角，这是 Karakas 方法的一个缺陷。本文数值方法能计算任意相位角，图中数值方法计算了 13 种相位角，每隔 15°计算一个。由计算结果可知，相位角越小，Karakas 方法存在的误差越大。从该数值计算实例得到的产率比可知，产率比随相位角变化而变化，在 60°~150°变化相对较小，相位角为 135°时产率比最大。在确定的射孔密度下，相位角决定了孔道间的间距，间距越小，孔道间的干扰越大，即产能越小。相位角为 0°时的孔道间距最小，故其产率比最小。最优的相位角，使得孔道空间分布最合理，孔道间干扰作用达到最小。不同射孔密度下的最优相位角有所区别，但是相位角为 90°的产能与最优相位角时的产能差别不是特别大，故工程上为了简便常采用 90°的相位角。

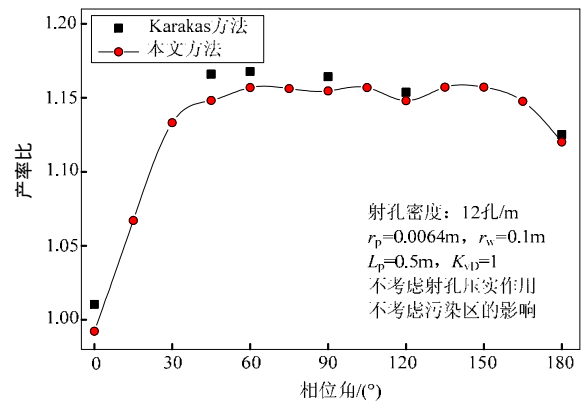


图 6 不同射孔相位角下的产率比

Fig.6 Productivity ratios under different phase angle

3.4 井周污染区的影响

由于钻井会给储层造成污染，使得井筒周围普遍存在一定厚度的污染区。图 7 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 7 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。图中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造成的产率比损失值。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，最后两者的产率比基本一致。这说明在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，增加射孔长度，射穿污染区是减小污染区对产能影响的最有效手段。

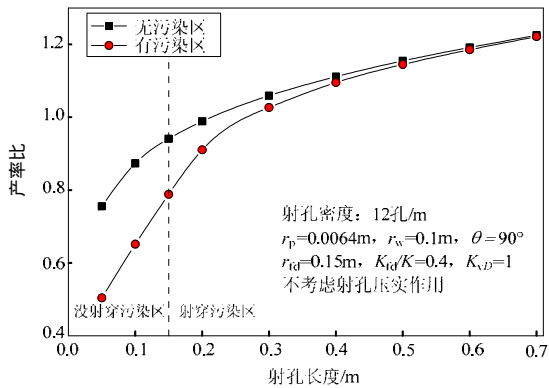


图7 污染区对产率比的影响

Fig.7 Effect of polluted zones on productivity ratio

3.5 射孔压实作用的影响

射孔造成围绕着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。压实区的半径和渗透率主要取决于储层的岩石力学性质，图8为不同压实区渗透率的产率比。从图8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。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0.01901m，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%。射孔压实区的会减弱射孔间的干扰作用，故可以适当加大射孔密度来提高产能。

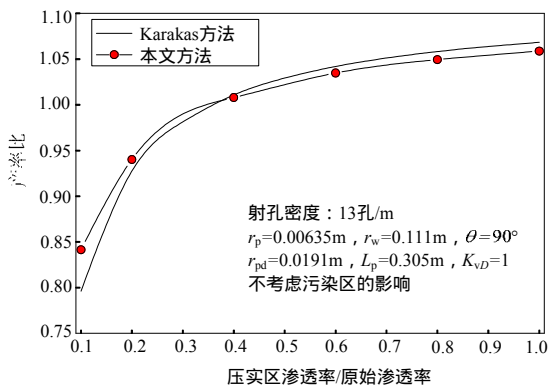


图8 不同压实区渗透率下的产率比

Fig.8 Productivity ratios under different consolidated zone permeability

3.6 渗透率各向异性的影响

在渗透率各向异性储层中，裸眼井的产能并不受垂向渗透率的影响，因为流体的流动方向为水平方向。而射孔井中在井筒附近流体具有垂向流动，故垂向渗透率对射孔井产能影响很大。图9为不同垂向渗透率与水平方向渗透率比值 K_{vD} 的产率比。从图9可知，与3.5分析的结果类似，Karakas方法在渗透率比值 K_{vD} 较小时 ($K_{vD} < 0.1$)，计算得到的产率比偏小，而在 K_{vD} 较大时 ($K_{vD} > 0.2$)，得到的产率比偏大，但平均误差较小，基本上满足工程要求，故Hagoort认为Karakas方法计算渗透率各向异性的产率比误差太大的结论是不正确的。垂向渗透率与水平方向渗透率的比值越小，射孔井的产率比越小。孔道间的干扰作用会随着垂向渗透率的减小而减弱，因此对于垂向渗透率小于水平方向渗透率的储层，同样可以适当加大射孔密度来弥补垂向渗透率低带来的影响。

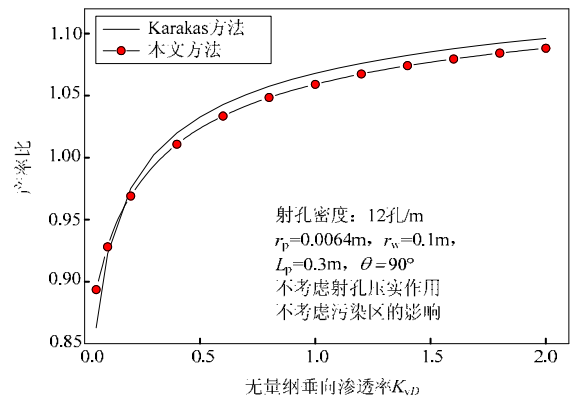


图9 不同无量纲垂向渗透率的产率比

Fig.9 Productivity ratios under different dimensionless vertical permeability

4 结论

(1) 为了更精确更全面地计算射孔井的产率比，建立了一种射孔井的三维稳态渗流模型，推导了模型的三维有限元方程，利用高密度四面体网格下的并行计算方法获得了模型的数值解，使得该方法能够更快速更精确地计算各种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预测提供指导。

(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，但在一些参数下，Karakas方法计算误差会比较大。此外，由于Karakas方法是在数值计算的基础上总结归纳出来的计算方法，只能计算特定的相位角且

不能计算除 180°相位角以外的没有射穿污染区的情况, 本文提供的方法弥补了这些缺陷。

(3) 研究表明: 射孔完井参数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, 因此深度射孔是射孔完井的重要技术。射孔密度和射孔相位角都存在最优值。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。低垂向渗透率和射孔压实作用都会降低射孔井的产能, 但两者都会减弱射孔间的干扰, 在这种情况下射孔密度对孔道间的干扰效应滞后, 故可以适当提高射孔密度来弥补产能的损失。

参考文献:

- [1] Muskat M. The effect of casing perforations on well productivity [J]. Transactions of the AIME, 1943, 151(1): 175-187.
- [2] Mcdowell J M, Muskat M. The effect on well productivity of formation penetration beyond perforated casing [J]. Journal of Petroleum Technology, 1950, 2(11): 309-312.
- [3] Harris S D. The effect of perforating on well productivity [J]. Journal of Petroleum Technology, 1966, 18(4): 518-528.
- [4] Klotz J A, Kruger R F, Pye D S. Effect of perforation damage on well productivity [J]. Journal of Petroleum Technology, 1974, 26(11): 1303-1314.
- [5] Locke S. An advanced method for predicting the productivity ratio of a perforated well [J]. Journal of Petroleum Technology, 1981, 33(12): 2481-2488.
- [6] Tariq S M. Evaluation of flow characteristics of perforations including nonlinear effects with the finite-element method [J]. SPE Production Engineering, 1987, 2(2): 104-112.
- [7] Karakas M, Tariq S M. Semianalytical productivity models for perforated completions [J]. SPE Production Engineering, 1991, 6(1): 73-82.
- [8] Yildiz T. Assessment of total skin factor in perforated wells [J]. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2006, 9(1): 62-76.
- [9] Hagoort J. An analytical model for predicting the productivity of perforated wells [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56(4): 199-218.
- [10] Atkinson C, Monmont F, Zazovsky A. Flow performance of perforated completions [J]. Transport in Porous Media, 2009, 80(2): 305-328.
- [11] Jamiolahmady M, Mahdiyar H, Ghahri P, et al. A new method for productivity calculation of perforated wells in gas condensate reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 77(3/4): 263-273.
- [12] 孙艾茵, 冯跃平, 林琪, 等. 射孔完井电模拟研究[J]. 石油钻采工艺, 1988, 10(6): 99-107.
Sun Aiyin, Feng Yueping, Lin Qi, et al. Electric analog research on perforation completion [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1988, 10(6): 99-107. (in Chinese)
- [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.
Tang Yula, Pan Yingde. Evaluation of perforating completion by finite element method [J]. Acta Petrolei Sinica, 1989, 10(3): 48-58. (in Chinese)
- [14] 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.
Zhu Jiucheng, Lang Zhaoxin, Zhang Lihua, et al. Calculation model for production ratio of perforated oil well [J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(5): 65-69. (in Chinese)
- [15] 李祥贵, 王清河, 李元. 射孔完井模型的数值模拟[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1996, 20(2): 48-53.
Li Xianggui, Wang Qinghe, Li Yuan. Numerical simulation model of perforated well completions [J]. Journal of the University of Petroleum, 1996, 20(2): 48-53. (in Chinese)
- [16] 练章华, 孟英峰, 童敏. 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.
Lian Zhanghua, Meng Yingfeng, Tong Min. Finite element models created and meshed in perforated completion [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2000, 22(2): 46-49. (in Chinese)
- [17] 李海涛, 王永清, 祝渝培, 等. 裂缝性油藏射孔完井产能的有限元分析[J]. 石油学报, 2001, 22(5): 63-67.
Li Haitao, Wang Yongqing, Zhu Yupei, et al. Productivity evaluation and modeling of perforated well in naturally fractured reservoir using finite element method [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(5): 63-67. (in Chinese)
- [18] 薛世峰, 王斐斐, 王海静. 射孔井产率比及其影响因素数值分析[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(2): 102-105.
Xue Shifeng, Wang Feifei, Wang Haijing. Numerical study of productivity ratio and factors of perforated well [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2): 102-105. (in Chinese)
- [19] 张涤明, 蔡崇喜, 章克本, 等. 计算流体力学[M]. 广州: 中山大学出版社, 1991: 346-354, 426-431.
Zhang Diming, Cai Chongxi, Zhang Keben, et al. Computational fluid dynamics [M]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University Press, 1991: 346-354, 426-431. (in Chinese)
- [20] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 298-301.
Kong Xiangyan. Advanced fluid mechanics in porous medium [M]. Hefei: China Science and Technology University Press, 2010: 298-301. (in Chinese)
- [21] 唐汝众, 王同涛, 闫相祯, 等. 射孔参数对套管强度影响的有限元分析[J]. 石油机械, 2010, 38(1): 32-34.
Tang Ruzhong, Wang Tongtao, Yan Xiangzhen, et al. Finite element analysis of effect of perforating parameters on casing strength [J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(1): 32-34. (in Chinese)