

文章编号: 0253-2697(2013)03-0528-07 DOI:10.7623/syxb201303016

射孔完井参数对试井理论曲线的影响

欧阳伟平 刘曰武

(中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘要:射孔完井是石油天然气开采过程中最常用的完井方式之一。对于确定的油气储层,完井方式决定了单井产能大小。一般常用二维裸眼井模型来进行射孔井的试井资料解释及单井产能的确定,但这种方法分析的结果可能存在较大的误差。因此根据射孔完井的特征以及储层渗透率各向异性特征,建立了一种适合于射孔井的三维数值试井模型。利用三维有限元数值方法求解该模型,获得了射孔井的试井理论曲线和压力分布场。通过分析试井理论曲线的特征及压力分布场中的流体三维流动特征,明确了试井理论曲线的6个流动阶段:井筒储存阶段;第一过渡阶段;早期局部径向流阶段;第二过渡阶段;系统径向流阶段;外边界作用阶段。其中,围绕射孔的早期局部径向流阶段是该类井的主要特征。分析了射孔完井参数射孔密度、射孔长度、射孔相位角以及渗透率各向异性等因素对试井理论曲线的影响,为射孔完井设计以及射孔井的试井分析提供理论指导。射孔井的总表皮系数计算结果表明,在一定参数条件下,射孔井可以成为超完善井,深度射孔是提高产量较有效的手段。

关键词:射孔井;数值试井;表皮系数;三维有限元;射孔密度;射孔长度;渗透率各向异性

中图分类号:TE353.1

文献标识码:A

Effects of perforated completion parameters on well test type curves

OUYANG Weiping LIU Yuewu

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

Abstract: Perforated completion is one of the most commonly used completion methods in oil and gas development. The single well productivity is largely determined by the completion method for a given oil-gas well. The well test analysis and single well productivity calculation are normally realized by using a 2-D open hole model, however, this approach may cause large errors. Based on properties of perforated completion and permeability anisotropy of reservoirs, a three-dimensional numerical well test model was proposed to analyze the transient flow in perforated vertical wells. With the model, well test type curves and pressure fields of perforated wells are obtained by using the 3-D finite element method (FEM). Through analyses of well test type curves and the three-dimensional flow in the pressure field, six flow phases can be recognized on well test type curves of perforated wells, i. e. wellbore storage, the first transition, early-time partly radial flow around the perforation, the second transition, late-time system radial flow and boundary-dominated flow. Among them the early-time partly radial flow around the perforation is the most important characteristic of perforated wells. Effects of perforated completion parameters, such as perforation density, length, phase angle and permeability anisotropy, on the transient pressure and derivative responses were studied, which provides theoretical guidance to design perforating types and analyze well test data of perforated wells. The calculation result of the total skin factor of perforated wells showed that the productivity of a perforated well may be higher than that of an open hole if the perforation is long enough or the perforation density is high enough. Increasing the perforation length is an effective way to enhance the productivity of a perforated well.

Key words: perforated well; numerical well test; skin factor; 3-D FEM; perforation density; perforation length; permeability anisotropy

国外对射孔完井下的射孔井作了大量的研究,其中主要是针对射孔井的产能或者表皮系数的研究^[1-9],对射孔井的试井研究较少。1999年 Yildiz^[10]和 Ozkan^[11]先后建立了射孔完井条件下的垂直井、斜井以及水平井的三维解析试井模型,初步分析了其试

井理论曲线特征及参数的影响。国内李治平等^[12]将射孔深度范围内流体的流动视为管流,建立一种简化模型用于评价射孔井的污染。范学平等^[13]利用边界元的方法求解了射孔井的非稳态渗流方程,为射孔井试井模型提供了一种边界元数值解法。唐愉拉^[14]和

基金项目:国家重大科技专项“煤层气井生产测试技术”(2011ZX05038-003)资助。

第一作者:欧阳伟平,男,1986年10月生,2009年毕业于中山大学理论与应用力学专业,现为中国科学院力学研究所博士研究生,主要从事渗流力学与油气井试井研究。Email:ouyangweiping@imech.ac.cn

通讯作者:刘曰武,男,1965年6月生,1988年毕业于大庆石油学院,现为中国科学院力学研究所研究员,主要从事渗流力学及油气藏工程方面的研究。Email:lywu@imech.ac.cn

李海涛^[15]等利用有限元方法研究了射孔井的产能。此外,有些学者^[16-18]对部分射开井做了试井研究,但是并没有考虑射孔孔道,只是将射开段作为裸眼部分考虑。射孔井与裸眼井最根本的区别在于其渗流的三维性。针对这种情况,笔者建立一种射孔井的三维数值试井模型,并利用三维有限元数值计算求得模型的数值解,获得射孔井的试井理论曲线及三维压力分布场,从试井理论曲线和地层压力场分布上分析了射孔井的试井理论曲线特征以及渗流特征,并研究了射孔密度、射孔长度、相位角、渗透率各向异性等因素对试井理论曲线以及产能的影响。

1 物理模型描述

建立数学模型作如下假设:①储层为均匀介质,渗透率在垂直方向与水平方向异性,储层厚度均匀,上、下边界均为不渗透边界。②储层中的流体为弱可压缩、定常黏度的单相牛顿流体,流体在储层中的流动为层流状态,遵从达西定律,且流体只能通过射孔流入到井筒。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,射孔为具有一定半径 r_p 和一定长度 L_p 的圆柱形(图 1)。④所有的射孔未堵塞,具有无限大导流能力,即各射孔的压力值均等于井筒压力。⑤不考虑井筒附近的污染以及射孔压实作用的影响,忽略重力和温度变化对流动的影响,且不考虑其他物理化学的影响。

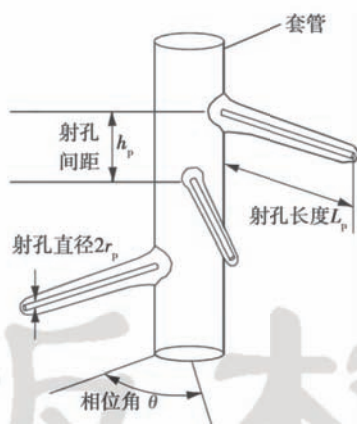


图 1 射孔井的物理示意图^[8]

Fig. 1 Geometry of perforated vertical well

2 数学模型及其求解

2.1 数学模型

射孔均具有无限大导流能力且流体只能通过射孔流入井筒,故可将射孔作为模型的内边界。射孔中各点的流量不相等,故内边界的压力法向导数值是未知的,但是各点的压力值是相等的,且射孔的流量总和是

一定的。因此,将压力导数作为未知数,并令射孔各点的压力相等,联立方程组。其中,控制方程为

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial x_D^2} + \frac{\partial^2 p_D}{\partial y_D^2} + K_{vD} \frac{\partial^2 p_D}{\partial z_D^2} = \frac{1}{C_D} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} \quad (1)$$

初始条件:

$$p_D = 0 \quad (2)$$

内边界条件:

$$\sum_{j=1}^N A_{jD} \left(\frac{\partial p_{jD}}{\partial n^j} \right) \Big|_{r_{in}} = 2\pi h_D \left(1 - \frac{dp_{wD}}{dT_D} \right) \quad (3)$$

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

外边界条件:

$$\text{定压边界: } p_D|_{r_{out}} = 0 \quad (5)$$

$$\text{封闭边界: } \frac{\partial p_D}{\partial n} \Big|_{r_{out}} = 0 \quad (6)$$

定义如下无量纲量:

$$p_D = \frac{K_h h (p_i - p)}{1.842 q \mu B}; T_D = \frac{t_D}{C_D}; t_D = \frac{3.6 \times 10^{-3} K_h t}{\phi \mu C_t r_w^2};$$

$$C_D = \frac{0.1592 C}{\phi \mu C_t r_w^2}; x_D = \frac{x}{r_w}; y_D = \frac{y}{r_w}; z_D = \frac{z}{r_w};$$

$$K_{vD} = \frac{K_v}{K_h}; A_{jD} = \frac{A_j}{r_w^2}; h_D = \frac{h}{r_w}; \frac{\partial p_{jD}}{\partial n^j} =$$

$$- \left(\frac{\partial p_{jD}}{\partial x_D} \cos \alpha + \frac{\partial p_{jD}}{\partial y_D} \cos \beta + K_{vD} \frac{\partial p_{jD}}{\partial z_D} \cos \gamma \right); L_{pD} = \frac{L_p}{r_w};$$

$$h_{pD} = \frac{h_p}{r_w} = \frac{1}{\rho_p r_w}; r_{pD} = \frac{r_p}{r_w}$$

式中: p_D 为无量纲压力; T_D 为无量纲有效时间; t_D 为无量纲时间; C_D 为无量纲井筒存储系数; x_D, y_D, z_D 为无量纲坐标; K_{vD} 为无量纲垂向渗透率; A_{jD} 为无量纲内边界离散单元面的面积; h_D 为无量纲储层厚度; L_{pD} 为无量纲射孔长度; h_{pD} 为无量纲射孔间距; r_{pD} 为无量纲射孔孔径; N 为内边界离散单元面数; A_j 为射孔内边界网格单元面的面积, m^2 ; B 为体积系数, m^3/m^3 ; C 为井筒存储系数, m^3/MPa ; C_t 为总压缩系数, $1/MPa$; h 为地层有效厚度, m ; h_p 为射孔间距, m ; L_p 为射孔长度, m ; K_v 为垂直方向的渗透率, mD ; K_h 为水平方向的渗透率, mD ; p 为地层压力, MPa ; p_i 为地层原始压力, MPa ; p_w 为井底压力, MPa ; q 为总流量, m^3/d ; r_w 为井筒半径, m ; r_p 为射孔半径, m ; t 为时间, h ; ρ_p 为射孔密度, $孔/m$; ϕ 为地层孔隙度; μ 为地层中流体的黏度, $mPa \cdot s$ 。

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,其权函数为差值函数:

$$N_i = a_i + b_i x_D + c_i y_D + d_i z_D$$

则有

$$\iiint_V N_i \left(\frac{\partial^2 p_D}{\partial x_D^2} + \frac{\partial^2 p_D}{\partial y_D^2} + K_{vD} \frac{\partial^2 p_D}{\partial z_D^2} - \frac{1}{C_D} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} \right) dV = 0$$

其中, $i=1,2,3,4$, 弱表示形式为

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

单元压力为

$$p_D^e = p_i^e N_i^e + p_j^e N_j^e + p_k^e N_k^e + p_m^e N_m^e$$

其中, $p_i^e, p_j^e, p_k^e, p_m^e$ 为单元节点压力值, 离散后得到有限元方程为

$$\begin{aligned} & V \left(b_i^2 + c_i^2 + K_{vD} d_i^2 + \frac{1}{C_D} \frac{1}{10\Delta T_D} \right) p_i^{e,n+1} + \\ & V \left(b_i b_j + c_i c_j + K_{vD} d_i d_j + \frac{1}{C_D} \frac{1}{20\Delta T_D} \right) p_j^{e,n+1} + \\ & V \left(b_i b_k + c_i c_k + K_{vD} d_i d_k + \frac{1}{C_D} \frac{1}{20\Delta T_D} \right) p_k^{e,n+1} + \\ & V \left(b_i b_m + c_i c_m + K_{vD} d_i d_m + \frac{1}{C_D} \frac{1}{20\Delta T_D} \right) p_m^{e,n+1} - \\ & \frac{A}{6} \frac{\partial p_i}{\partial n'} - \frac{A}{12} \frac{\partial p_{j,k,m}}{\partial n'} - \frac{A}{12} \frac{\partial p_{k,m,j}}{\partial n'} = \frac{V}{C_D} \frac{1}{10\Delta T_D} p_i^{e,n} + \\ & \frac{V}{C_D} \frac{1}{20\Delta T_D} p_j^{e,n} + \frac{V}{C_D} \frac{1}{20\Delta T_D} p_k^{e,n} + \frac{V}{C_D} \frac{1}{20\Delta T_D} p_m^{e,n} \end{aligned} \quad (7)$$

由内边界总流量等于生产量得到

$$\sum_{j=1}^N A_{jD} \left(\frac{\partial p_{jD}}{\partial n'} \right) \Big|_{r_{in}} + \frac{1}{\Delta T_D} p_{wD}^{e,n+1} = 1 + \frac{1}{\Delta T_D} p_{wD}^{e,n} \quad (8)$$

内边界各点的压力相等, 即

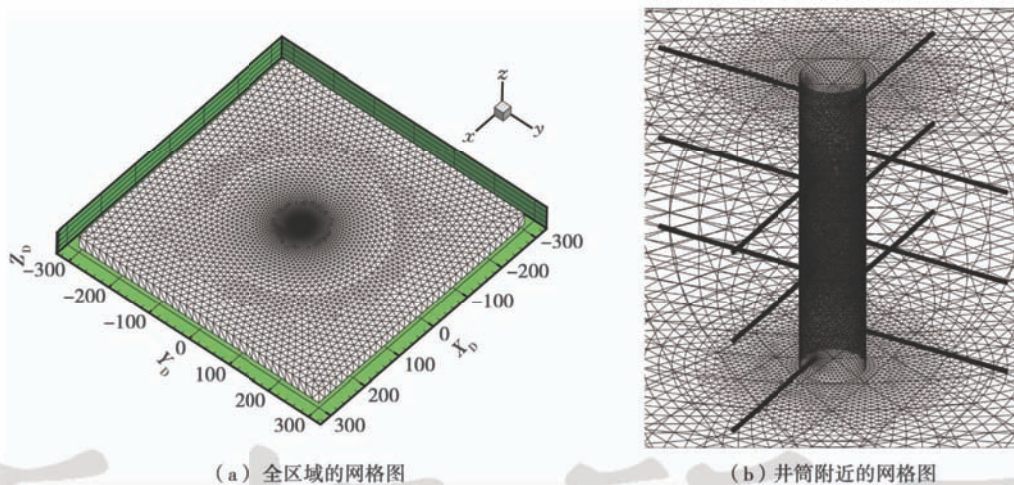
$$p_{jD} = p_{wD} \quad (9)$$

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}; \quad b_i = -\frac{1}{6V} \begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_m & z_m \end{vmatrix};$$

$$c_i = \frac{1}{6V} \begin{vmatrix} 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_k & z_k \\ 1 & x_m & z_m \end{vmatrix}; \quad d_i = -\frac{1}{6V} \begin{vmatrix} 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \\ 1 & x_m & y_m \end{vmatrix}$$

A 为四面体其中一个面的面积, 可以利用海伦公式求得。联立式(7)–(9), 由单元方程组装系统方程组, 求解系统方程组, 既可得到任意网格点 (x_D, y_D, z_D) 上 $n+1$ 时刻的压力值 $p_D(x_D, y_D, z_D)$ 。

为了进行有限元计算, 须对计算区域进行离散, 利用 Gambit 网格划分软件得到四面体网格, 外边界可为不同规则的边界。以矩形外边界为例, 整个无量纲计算区域为 $600 \times 600 \times 10$, 该区域大小已足够达到系统径向流, 划分的网格如图 2(a) 所示, 井筒附近的区域放大图如图 2(b) 所示。



(a) 全区域的网格图 (b) 井筒附近的网格图

图 2 储层的四面体网格图

Fig. 2 Tetrahedral meshes chart of reservoir

3 计算结果及分析

3.1 试井理论曲线及压力场分布特征

图 3 为射孔井的试井理论曲线。从图 3 可以看出, 射孔井的试井过程可分为 6 个不同的流动阶段:

(1) 井筒储存阶段。在此阶段井筒中流体的压缩性起了决定性作用, 压力和压力导数曲线表现为斜率均为 1 的直线段, 井筒储存系数 C_D 决定了这一阶段的延续时间。

(2) 第 1 过渡阶段。随着井筒压力的降低, 在地层与井筒的压差作用下, 地层中的流体流入到射孔孔道中, 井筒储存的影响逐渐减小, 流动从井筒储存阶段过渡到早期局部径向流阶段。

(3) 早期局部径向流动阶段。地层中的流体在垂直方向上以径向流动的方式流入到射孔孔道中, 形成射孔局部区域内的径向流动。在试井理论曲线上压力导数为水平直线段, 压力导数的值及局部径向流持续的时间会受到射孔长度和密度等因素的影响。图 4 为

Yildiz^[10]描述此阶段流动形态的示意图,其并没有得到压力分布图来证实早期径向流的存在。图 5(a)为本文计算得到此阶段的压力分布图,可以清晰地看到压力围绕着射孔径向向外传播,更好地说明了围绕着射孔的径向流动。此阶段为射孔井的主要特征。

(4) 第 2 过渡阶段。随着压力的传播,在射孔间干扰及上、下封闭顶底板的作用下,压力导数曲线上翘,流动由垂直方向流动逐渐过渡为水平方向流动。

(5) 系统径向流动阶段。经历完第 2 过渡阶段,系统达到水平方向的径向流动,整个流动为朝着井筒的水平方向流动。从图 5(b)的压力分布图可以看到,远离射孔处截面上的压力等值线为垂向分布,说明流动为水平径向流动。

(6) 外边界作用阶段。压力传播至外边界,在封闭外边界的作用下,压力及压力导数曲线上翘,最终两者均为斜率为 1 的直线;在定压外边界的作用下,压力曲线变平,压力导数曲线下掉。

不同参数下得到的试井理论曲线的特征可能有所不同。在某些参数的组合下,有些流动阶段的特征会不明显甚至完全被掩盖,例如,井筒储存严重的情况下可能会掩盖早期的局部径向流特征。此外,当射孔密度低或射孔长度短,早期局部径向流动阶段的特征也很难体现。

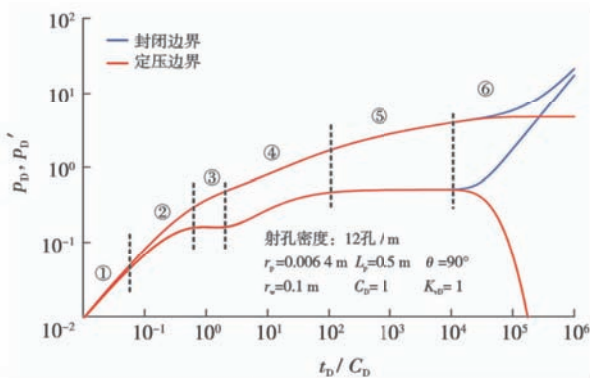


图 3 射孔井的试井理论曲线

Fig. 3 Well test type curve of perforated wells

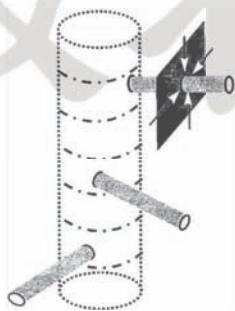
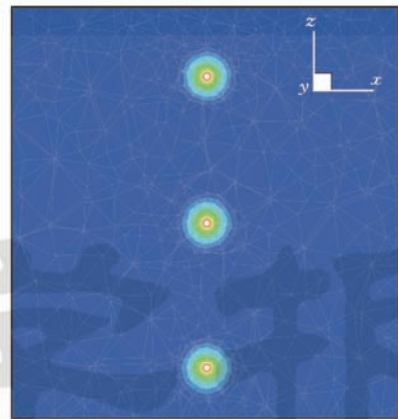
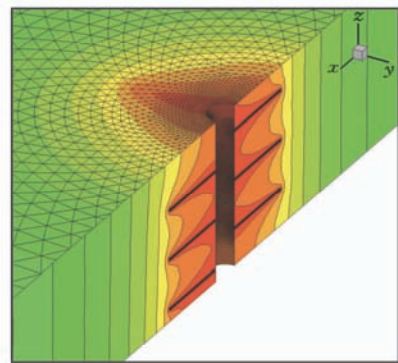


图 4 Yildiz 描述早期径向流的流动形态^[10]

Fig. 4 Early time radial flow stated by Yildiz^[10]



(a) 早期局部径向流



(b) 晚期系统径向流

图 5 射孔井的压力分布截面

Fig. 5 Pressure fields of perforated well

3.2 射孔密度的影响

图 6 为不同射孔密度下的试井理论曲线。从图 6 中可以看到,当射孔密度为 4 孔/m 时,其试井理论曲线没有见到早期压力导数曲线为水平直线的特征。这是由于射孔密度较小时,围绕着射孔局部径向流动特征被井筒储存效应所掩盖。而射孔密度为 16 孔/m 时,径向流动阶段持续的时间很短且特征不是很明显。这是由于射孔密度很大时,射孔间距较小,射孔间产生干扰的时间很早,使得径向流动阶段出现后就立即进入第 2 过渡阶段。在这 4 种射孔密度中,12 孔/m 的径向流动特征最明显。这是由于射孔间距以及射孔总

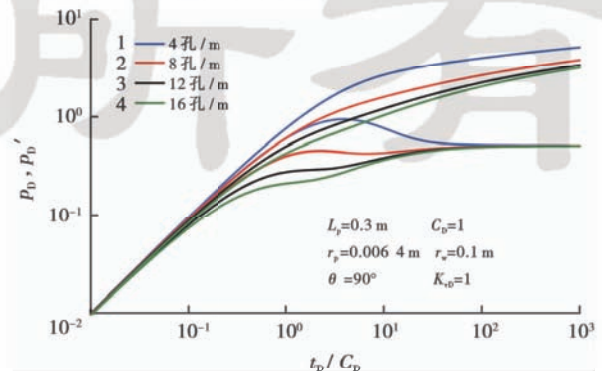


图 6 不同射孔密度的试井理论曲线

Fig. 6 Well test type curves of different perforation density

长度都处于较为合适的值,既可以保证径向流动阶段的时间,又可以不被井筒储存效应所掩盖。

射孔密度的增加,能够降低无量纲压力值,即减小井底渗流阻力,提高产能。已知径向流动阶段的无量纲井底压力公式为

$$p_{wD} = (\ln t_D + 0.80907)/2 + S_i \quad (10)$$

根据计算得到的径向流动阶段无量纲压力值,可以得到射孔井的总表皮系数,从而可以分析射孔井的产能。计算得到曲线1—4的射孔拟表皮见表1,将其与工程上常用的Karakas方法^[5]进行对比,对比发现Karakas方法在低射孔密度时的计算值偏

小。这是由于Karakas方法是一种半解析的方法,有一定的适用范围。除了射孔密度为4孔/m的表皮大于0以外,其余的都小于0,即后三者的产能要大于裸眼井($S=0$)的产能,说明一定参数下射孔完井后的射孔井可以成为超完善井。增加射孔密度可以增加油气井的产能,但从图6中可以看出,射孔密度对产能的贡献随着射孔密度的增加而减弱,如曲线3的表皮系数为-0.48,而曲线4的表皮系数为-0.68,两者差别并不大。此外,射孔数的增多会降低套管的强度^[20],故给定条件下的射孔密度存在一个最优值。

表1 不同射孔完井参数下的射孔井表皮系数及对比较验证

曲线	射孔密度		射孔长度		射孔相位角		渗透率各向异性	
	本文方法	Karakas法	本文方法	Karakas法	本文方法	Karakas法	本文方法	Karakas法
曲线1	1.29	1.02	1.06	1.05	-0.94	—	-0.73	-0.71
曲线2	-0.05	-0.11	-0.48	-0.49	-1.08	-1.11	-0.92	-0.93
曲线3	-0.48	-0.49	-1.07	-1.09	-1.07	-1.09	-1.07	-1.09
曲线4	-0.68	-0.68	-1.45	-1.47	-0.86	-0.86	-1.21	-1.22

3.3 射孔长度的影响

图7为相同射孔密度不同射孔长度的试井理论曲线图。从图7可知,同射孔密度类似,射孔长度较短时,射孔的局部径向流动特征被井筒储存效应所掩盖,如曲线1的情形。不同在于射孔长度增加,并不会缩短射孔局部径向流的时间,这是由于射孔之间的间距没有改变,射孔间的干扰没有提前。射孔长度的增加,同样能够降低井底附近的渗流阻力。利用同3.2节类似的方法可以获取这4种不同射孔长度下的射孔井表皮系数(表1),计算得到的表皮系数与Karakas方法计算的一致。根据得到的表皮系数以及图6与图7的对比发现,在一定阶段后,增加射孔长度对产能的提高量要高于增加射孔密度的提高量,说明增加射孔长度是提高产量的更有效手段。

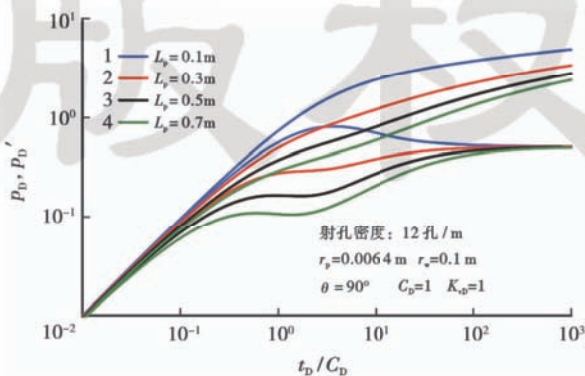


图7 不同射孔长度的试井理论曲线

Fig. 7 Well test type curves of different perforation length

3.4 射孔相位角的影响

射孔相位角是射孔施工中需要确定的一个量,它决定了射孔在地层中的分布。图8为不同射孔相位角的试井理论曲线图。从试井理论曲线可知,同射孔密度和射孔长度相比,射孔相位角的影响相对较小。射孔相位角太小或者太大时,早期径向流动特征都不明显。这是由于射孔密度相同的条件下,相位角太小会造成左右相邻射孔间的干扰提前,而太大会造成上下射孔间的干扰提前。射孔间的干扰同时也增加了射孔周围的流动阻力,计算曲线1—4的射孔井表皮系数见表1,相位角为60°和90°的表皮系数基本一致,而相位角为30°和180°的表皮要大,说明相位角取60°~90°左右的比较合适。另外计算得到的射孔井表皮系数与Karakas方法的一致,由于Karakas方法只能计算6

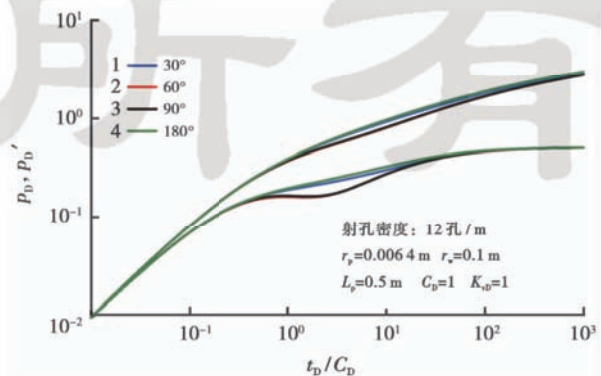


图8 不同射孔相位角的试井理论曲线

Fig. 8 Well test type curves of different phase angle

种特定的相位角,分别为 360° 、 180° 、 120° 、 90° 、 60° 和 45° ,故 30° 时采用 Karakas 方法无法计算。

3.5 渗透率各向异性的影响

在裸眼井中,由于渗流方向为水平方向,垂向渗透率不影响其流动。而在射孔井的井筒附近,流体以竖直方向流入到射孔孔道内,在这种情形下,地层垂向渗透率的影响很大。图9为不同无量纲垂向渗透率的试井理论曲线图。从图9中可以看到,垂向渗透率越大,无量纲压力值越小,说明流动阻力越小。 $K_{vD}=1$ 时,早期径向流动特征最明显; K_{vD} 偏离1越大,即垂向渗透率与水平方向渗透率相差越大时,早期径向流动特征越不明显。垂向渗透率还影响着射孔局部径向流动阶段的压力导数值,故早期径向流动段是确定垂向渗透率有效的方法。计算得到4种不同垂向渗透率条件下的射孔拟表皮见表1,笔者计算的表皮系数与 Karakas 方法的计算值一致。从表皮系数的计算值可知,垂向渗透率对射孔井的表皮有较大的影响。对于垂向渗透率特低储层,例如页岩气储层,垂向渗透率会大大影响射孔井的产量,应尽量避免以射孔完井的方式完井。

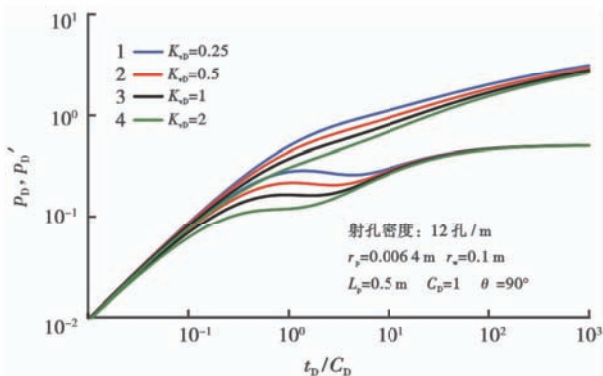


图9 不同垂向渗透率的试井理论曲线

Fig. 9 Well test type curves of different vertical permeability

4 结论

(1) 建立了一种射孔井的数值试井模型,利用三维有限元方法对模型进行求解,获得了射孔井的试井理论曲线以及压力分布场,并分析了其特征。

(2) 射孔密度是影响试井理论曲线及产能的重要参数。在低射孔密度或者高射孔密度条件下,射孔局部区域的径向流动特征很难在试井曲线上得到清晰的反映。随着射孔密度的增加,射孔间的干扰作用加剧,射孔密度对产能的贡献随着射孔密度的增加而减小。射孔数的增加会降低套管的强度,故给定条件下的射孔密度存在一个最优值。

(3) 射孔长度对试井理论曲线及产能起着关键的

作用。射孔长度越长,早期径向流动特征越明显。由于增加射孔长度不会导致射孔间干扰的加剧,故增加射孔长度有着比增加射孔密度更好的效果。

(4) 同射孔密度和射孔长度相比,射孔相位角的影响相对较小。在确定的射孔密度下,射孔相位角决定了射孔间距,故射孔相位角存在一个最优值。计算结果表明,射孔相位角在 $60^\circ\sim 90^\circ$ 左右的表皮系数最小,且早期径向流动特征最明显。

(5) 垂向渗透率与水平方向渗透率相差越大,射孔局部早期径向流动特征越不明显。垂向渗透率影响着径向流动阶段的压力导数值,故早期径向流动段是确定垂向渗透率有效的方法。

(6) 通过射孔井表皮系数的对比发现,传统计算射孔井表皮系数的 Karakas 方法在计算低射孔密度时,得到的表皮系数偏小,其他情况下 Karakas 方法与本文三维数值计算方法计算的结果一致。

参考文献

- [1] Harris S D. The effect of perforating on well productivity[J]. Journal of Petroleum Technology, 1966, 18(4): 518-528.
- [2] 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.
- [3] Locke S. An advanced method for predicting the productivity ratio of a perforated well[J]. Journal of Petroleum Technology, 1981, 33(12): 2481-2488.
- [4] 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.
- [5] Karakas M, Tariq S M. Semianalytical productivity models for perforated completions[J]. SPE Production Engineering, 1991, 6(1): 73-82.
- [6] Yildiz T. Assessment of total skin factor in perforated wells[J]. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2006, 9(1): 62-76.
- [7] Hagoort J. An analytical model for predicting the productivity of perforated wells[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56(4): 199-218.
- [8] Atkinson C, Monmont F, Zazovsky A. Flow performance of perforated completions[J]. Transport in Porous Media, 2009, 80(2): 305-328.
- [9] 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.
- [10] Yildiz T, Ozkan E. Pressure-transient analysis for perforated wells[J]. SPE Journal, 1999, 4(2): 167-176.
- [11] Ozkan E, Yildiz T. Pressure-transient analysis of perforated slant and horizontal wells[R]. SPE 56421, 1999.
- [12] 李治平, 赵必荣. 评价射孔完井污染的试井分析方法研究[J]. 天

- 然气工业,1991,11(3):30-34.
Li Zhiping, Zhao Birong. An investigation of well testing analysis for evaluating the damage to perforation completion[J]. Natural Gas Industry, 1991, 11(3): 30-34.
- [13] 范学平, 黄建民, 唐榆拉, 等. 用边界元方法分析射孔完井非稳定渗流问题[J]. 西南石油学院学报, 1996, 18(3): 59-69.
Fan Xueping, Huang Jianmin, Tang Yula, et al. Analysis of transient flow of perforated well with boundary element algorithm [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1996, 18(3): 59-69.
- [14] 唐榆拉, 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 Petroluem Sinica, 1989, 10(3): 48-58.
- [15] 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 Petroluem Sinica, 2001, 22(5): 63-67.
- [16] 王建平, 王晓冬, 马世东. 各向异性部分射开直井不稳定渗流理论研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(3): 65-67.
Wang Jianping, Wang Xiaodong, Ma Shidong. Unstable filtration theory study on straight well penetrating in various parts[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(3): 65-67.
- [17] 陈方方, 贾永禄, 张福祥. 双重介质部分射开渗流模型与试井样板曲线[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(6): 87-90.
Chen Fangfang, Jia Yonglu, Zhang Fuxiang. Partial perforated filtration model and the typical curve of well test for dual media [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(6): 87-90.
- [18] 姚军, 吴明录. 部分射开井流线数值试井解释模型及压力响应[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(4): 513-518.
Yao Jun, Wu Minglu. Streamline numerical well testing interpretation model and pressure response for partially perforated wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4): 513-518.
- [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.
Zhang Diming, Cai Congxi, Zhang Keben, et al. Computational fluid dynamics[M]. Guangzhou: Sun Yat-sen University Press, 1991.
- [20] 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.

(收稿日期 2012-11-04 改回日期 2013-03-29 责任编辑 黄小娟)

《石油学报》2013 年第 4 期部分文章预告(II)

低渗裂缝性油藏调剖选井的无因次 PI 值决策方法	冯其红等
胜利超稠油油藏蒸汽驱三维物理模拟与应用	曹嫣缤等
含水凝析气相态特征及非平衡压降过程产液特征	王长权等
防砂水平井旋转水射流解堵工艺参数优化实验	董长银等
全井钻柱系统多体动力学模型	程载斌等
深水脐带缆敷设系统动力学分析及试验	毕国军等
热重分析仪求取稠油高温氧化动力学参数	唐君实等
页岩气开发综述	张东晓等
依靠自主设备 开发深海油气	张 抗