

污染区对部分打开井井底压力响应的影响¹⁾

欧阳伟平 刘曰武²⁾ 万义钊

(中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

摘要 钻井造成的污染区对部分打开井的影响不同于裸眼井. 为了分析污染区对部分打开井井底压力响应的影响, 建立了一种部分打开井的二维轴对称渗流模型, 模型考虑了真实的污染区以及储层渗透率各向异性特征. 利用有限元数值方法对模型进行求解, 获得了部分打开井的井底压力响应及储层压力分布. 根据压力响应及压力分布特征, 将部分打开井的压力响应过程划分为 5 个流动阶段, 其中早期局部径向流动和椭球流动是该类井最典型的特征. 对污染区的影响分析表明: 传统方法中的表皮系数 S 并不等于污染区引起的机械表皮系数 S_d ; 无量纲井筒储存系数不能与机械表皮系数组合. 修正了传统方法中部分打开井的井底压力公式, 验证了部分打开井的总表皮计算公式, 为该类井的井底压力响应解释及产能预测提供理论指导.

关键词 部分打开井, 污染区, 椭球流动, 数值试井, 表皮系数

中图分类号: TE353 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-13-183

引言

部分打开井, 又称打开程度不完善井^[1], 是指储层未全部打开, 打开的部分是裸眼完成的油气井. 由于工程、地质等原因, 常采用部分打开的方式完井, 故实际生产中存在大量的部分打开井. 这类井与裸眼井的最大区别在于井筒附近流体聚集到打开段, 渗流有垂直方向的流速, 呈现二维轴对称流动, 但在目前井底压力响应数据的解释中, 常采用一维有效井径模型, 将部分打开的不完善性归结为拟表皮系数. 由于井筒附近流动特征的区别, 利用一维有效井径模型常出现早期井底压力响应特征曲线无法拟合的情况, 且得到的表皮系数会造成井筒周围地层污染严重的假象. 为了更好地进行井底压力响应解释, 正确评价井筒周围的污染程度, 获取准确的储层参数, 针对部分打开井的井底压力响应研究具有重要意义.

国内外对部分打开井的井底压力响应理论展开了一些研究. Gringarten 等^[2]给出了顶部(底部)打开时, 内边界为无限导流边界的非稳态压力解. Abbott 等^[3]利用球形流动非稳态解, 提出了一种部分打开井的球形特征分析方法. Kuchuk^[4]在 Gringarten 研究的基础上考虑了井筒储存效应和表皮效应, 给出

了其非稳态压力解以及总表皮系数的计算式, 但同样只能处理打开位置处于顶部或底部的情形. Yildiz 等^[5-7]给出了打开段位于任意位置的井底压力解并结合实例进行了分析, 且对总表皮系数的计算做了研究. 国内从 20 世纪 80 年代开始, 由张厚清^[8]、刘慈群等^[9-11]、陈方方等^[12]先后研究了双重介质及多重介质部分打开井的井底压力动态, 给出了轴对称二维条件下的压力响应精确解. 王建平等^[13]分析井底压力响应特征及影响因素. 鉴于解析方法的局限性, 目前已有学者^[14-19]开始使用数值方法研究部分打开井等复杂结构井的压力动态响应.

目前考虑井筒储存与表皮系数的研究中, 普遍将两者组合成系数 $C_D e^{2S}$, 然而在部分打开井中, 两者能否组合缺乏论证. 此外, 该类井的井底压力响应研究中, 单独考虑污染区的模型还很少, 通常在 Laplace 空间解中直接引入 S 表示污染区机械表皮系数 S_d , 但表皮系数 S 是否等于污染区机械表皮系数 S_d 并不清楚, 这关系到对储层污染大小的评价.

为了分析污染区对部分打开井井底压力响应的的影响, 且鉴于数值方法在处理非均质性上的优越性, 本文建立了一种考虑污染区的部分打开井的二维轴对称渗流模型, 利用有限元数值方法进行求解, 获得井底压力响应以及储层压力分布. 分析井底压力响应

2013-06-25 收到第 1 稿, 2013-09-28 收到修改稿.

1) 国家重大专项课题“煤层气井生产测试技术”(2011ZX05038-003) 资助项目.

2) 刘曰武, 研究员, 主要研究方向: 渗流力学和油气藏工程的理论研究及矿场应用. E-mail: lywu@imech.ac.cn

特征曲线及储层压力分布特征，讨论无量纲井筒储存系数 C_D 与污染区表皮系数 S_d 能否组合，验证传统解析方法处理污染区表皮系数以及计算总表皮系数公式的正确性。

1 物理模型描述

为了建立数学模型，需作如下假设：

(1) 原始储层为均匀介质，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 ，储层厚度 h 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，遵从达西定律。

(3) 储层部分打开，打开段高度为 h_p ，打开段中心距离下边界 Z_p ，流体只能通过打开段流入井筒，井筒具有无限大导流能力，整个井筒周围存在厚度为 Δr_d 的污染区。

(4) 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。

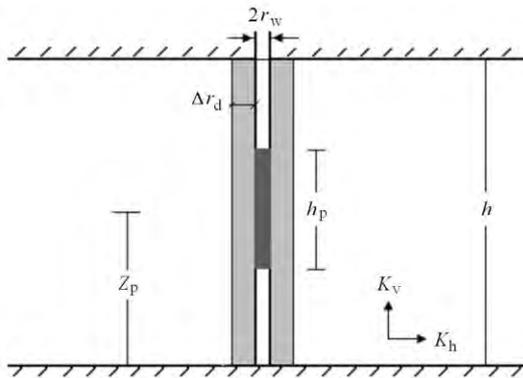


图 1 部分打开井的物理示意图

Fig. 1 Geometry of partially penetrating well

2 数学模型及求解

2.1 数学模型

由物理模型可知，部分打开井的结构具有轴对称性质，可以简化为二维问题，又因模型需考虑真实的污染区，因此建立的模型为非均质、非有效半径的二维轴对称模型。

渗流连续性方程

$$\frac{\partial(\phi\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

达西定律：

$$\text{原始储层区 } \mathbf{V} = -\left(\frac{K_h}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \mathbf{e}_r + \frac{K_v}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \mathbf{e}_z\right) \quad (2)$$

$$\text{污染区 } \mathbf{V} = -\left(\frac{K_{dh}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \mathbf{e}_r + \frac{K_{dv}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \mathbf{e}_z\right) \quad (3)$$

状态方程

$$\phi = \phi_0 [1 + c_\phi (p - p_0)] \quad (4)$$

$$\rho = \rho_0 [1 + c_f (p - p_0)] \quad (5)$$

根据方程 (1)~(5) 并结合无量纲定义可以推导控制方程

$$\frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_D}{\partial r_D} + K_{vD} \frac{\partial^2 p_D}{\partial z_D^2} = \frac{1}{C_D K_{LD}} \frac{\partial p_D}{\partial T_D} \quad (6)$$

$$\text{初始条件 } p_D = 0 \quad (7)$$

边界条件：

井筒内边界总流量等于生产量

$$\sum_{i=1}^N L_{iD} K_{LD} \left(\frac{\partial p_{iD}}{\partial n'}\right) \Big|_{r_{in}} = h_D \left(1 - \frac{dp_{wD}}{dT_D}\right) \quad (8)$$

$$\text{井筒内边界各点的压力相等 } p_{iD} = p_{wD} \quad (9)$$

$$\text{储层外边界封闭 } \left(\frac{\partial p_D}{\partial n'}\right) \Big|_{r_{out}} = 0 \quad (10)$$

无量纲定义

$$p_D = \frac{K_h h (p_i - p)}{1.842 q \mu B}, \quad r_D = \frac{r}{r_w}, \quad z_D = \frac{z}{r_w}$$

$$K_{vD} = \frac{K_v}{K_h} = \frac{K_{dv}}{K_{dh}}, \quad K_{LD} = \frac{K_L}{K}, \quad C_D = \frac{0.159 2C}{\phi h C_t r_w^2}$$

$$T_D = \frac{t_D}{C_D}, \quad t_D = \frac{3.6 \times 10^{-3} K_h t}{\phi \mu C_t r_w^2}, \quad L_{iD} = \frac{L_i}{r_w}$$

$$\frac{\partial p_{iD}}{\partial n'} = -\left(\frac{\partial p_{iD}}{\partial r_D} \cos \alpha + K_{vD} \frac{\partial p_{iD}}{\partial z_D} \cos \beta\right), \quad h_D = \frac{h}{r_w}$$

无量纲量： p_D 为无量纲压力； r_D, z_D 为无量纲坐标； K_{vD} 为无量纲垂向渗透率； K_{LD} 为区域无量纲渗透率，原始储层 $K_{LD} = 1$ ，污染区 $K_{LD} = \frac{K_d}{K}$ ； C_D 为无量纲井筒储存系数； T_D 为无量纲有效时间； t_D 为无量纲时间； N 为井筒内边界离散单元数目； p_{iD} 为内边界离散结点的无量纲压力值； $\frac{\partial p_{iD}}{\partial n'}$ 为内边界修正的无量纲压力法向导数； L_{iD} 为内边界单元无量纲边长； h_D 为无量纲储层厚度； p_{wD} 为井筒无量纲压力值， N 为内边界离散单元数。

有量纲量： B 为体积系数， m^3/m^3 ； C 为井筒储存系数， m^3/MPa ； c_t 为总压缩系数，为流体压缩系数 c_f 和孔隙压缩系数 c_ϕ 之和， MPa^{-1} ； h 为储层有效厚度， m ； K 为原始储层渗透率， mD ； K_L 为区域渗透率， mD ； K_d 为污染区渗透率， mD ； K_v 为垂直方向渗透率， mD ； K_h 为水平方向渗透率， mD ； p 为储层压力， MPa ； p_i 为储层初始压力， 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 ; V 为速度矢量, m/s ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; ϕ 为储层孔隙度; μ 为储层中流体的黏度, $MPa\cdot s$.

2.2 有限元方法求解

利用伽辽金加权余量法^[20], 令其权函数为差值函数 $N_i^e = a_i + b_i r_D + c_i z_D$, $i = 1, 2, 3$, 则有

$$\iint_A N_i^e \left(\frac{\partial^2 p_D^e}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial p_D^e}{\partial r_D} + K_{vD} \frac{\partial^2 p_D^e}{\partial z_D^2} - \frac{1}{C_D K_{LD}} \frac{\partial p_D^e}{\partial T_D} \right) dA = 0$$

其弱表示形式为

$$\iint_A \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial r_D} \frac{\partial p_D^e}{\partial r_D} + K_{vD} \frac{\partial N_i^e}{\partial z_D} \frac{\partial p_D^e}{\partial z_D} - \frac{N_i^e}{r_D} \frac{\partial p_D^e}{\partial r_D} + \frac{N_i^e}{C_D K_{LD}} \frac{\partial p_D^e}{\partial T_D} \right) dA = \int_{\Gamma_{in}} N_i^e \frac{\partial p_D^e}{\partial n'} dl$$

单元压力为

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

其中 p_i^e, p_j^e, p_k^e 为单元节点压力值; 令

$$f_i(N_i^e, N_j^e, N_k^e) = \frac{N_i^e}{r_D} = \frac{N_i^e}{N_i^e r_i^e + N_j^e r_j^e + N_k^e r_k^e}$$

利用高斯积分, 令

$$g_i = \iint_A f_i(N_i^e, N_j^e, N_k^e) dA = A \sum_{l=1}^m \omega^l f_i(N_i^l, N_j^l, N_k^l)$$

推导得到最后的有限元方程

$$\begin{aligned} & AK_{LD} \left(b_i^2 + K_{vD} c_i^2 - b_i g_i + \frac{1}{C_D K_{LD}} \frac{1}{6\Delta T_D} \right) p_i^{e,n+1} + \\ & AK_{LD} \left(b_i b_j + K_{vD} c_i c_j - b_j g_i + \frac{1}{C_D K_{LD}} \frac{1}{12\Delta T_D} \right) p_j^{e,n+1} + \\ & AK_{LD} \left(b_i b_k + K_{vD} c_i c_k - b_k g_i + \frac{1}{C_D K_{LD}} \frac{1}{12\Delta T_D} \right) p_k^{e,n+1} - \\ & \frac{L_{iD} K_{LD}}{3} \frac{\partial p_i^{e,n+1}}{\partial n'} - \frac{L_{iD} K_{LD}}{6} \frac{\partial p_{j/k}^{e,n+1}}{\partial n'} = \\ & \frac{A}{C_D} \frac{1}{6\Delta T_D} p_i^{e,n} + \frac{A}{C_D} \frac{1}{12\Delta T_D} p_j^{e,n} + \frac{A}{C_D} \frac{1}{12\Delta T_D} p_k^{e,n} \end{aligned} \quad (11)$$

内边界条件

$$\sum_{i=1}^n \frac{L_{iD} K_{LD}}{H_D} \frac{\partial p_{iD}^{e,n+1}}{\partial n'} + \frac{1}{\Delta T_D} p_{wD}^{e,n+1} = 1 + \frac{1}{\Delta T_D} p_{wD}^{e,n} \quad (12)$$

$$p_{iD} = p_{wD} \quad (13)$$

只有当三角形的两个节点落在内边界上且 i 节点在内边界上时式 (11) 左端的最后两项才存在. 联立方程 (11)~(13), 由单元刚度矩阵组装成总刚度矩阵, 求解总刚度矩阵, 既可得到任意网格点 $n+1$ 时刻的压力值.

3 计算结果及分析

根据所建立的二维轴对称模型以及有限元求解方法, 计算得到部分打开井的井底压力响应特征曲线以及储层压力分布图. 对井底压力响应特征及影响因素进行分析, 并着重研究污染区的影响.

3.1 井底压力响应及储层压力分布特征

考虑污染区厚度 $\Delta r_d = r_w$, 即污染区半径 $r_d = 2r_w$, 污染区渗透率比 K_d/K 分别为 1, 0.4094, 0.2574. 根据机械表皮系数的计算公式 (14) 可知 S_d 分别为 0, 1, 2. 图 2 为计算得到的部分打开井的井底压力响应曲线, 所取的计算参数在图中已列出, 其中 H_D 为修正的无量纲储层厚度, 计算式为式 (15).

$$S_d = \left(\frac{K}{K_d} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_d}{r_w} \right) \quad (14)$$

$$H_D = h_D \sqrt{\frac{1}{K_{vD}}} \quad (15)$$

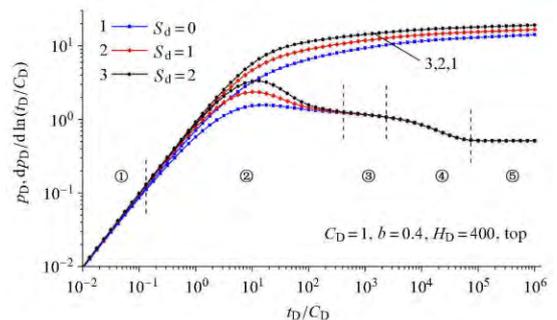


图 2 部分打开井的压力响应特征曲线

Fig. 2 Pressure response type curves of partially penetrating well

根据压力响应特征曲线及压力分布特征, 可将部分打开井的压力响应过程分为 5 个不同的流动阶段, 分别为:

(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, 表现为压力和压力导数曲线均为斜率为 1 的直线段, 井筒储存越大, 这阶段持续时间越长.

(2) 过渡阶段, 随着井筒压力的降低, 在储层与井筒间的压差作用下, 储层中的流体穿过污染区,

从打开段流入到井筒中, 井筒储存的影响逐渐减小.

(3) 早期局部径向流动阶段, 流体围绕着打开段径向流动, 产生短时间的径向流动, 受下部小量流体向上流动的影响, 此阶段的压力导数曲线的水平段有点倾斜. 如图 3(a) 中压力场分布所示, 压力在打开段上部以径向传播, 在打开段下端小范围内发生椭球流动.

(4) (半) 椭球流动阶段, 随着上端压力值逐渐减小, 打开段下端的流体向上流动, 由于垂向渗透率不等于水平渗透率, 使得流体形成围绕打开段的椭球流动. 在压力导数曲线上会出现负斜率的直线段. 如图 3(b) 的压力分布所示, 此时的压力波以椭球方式传播, 直至遇到下边界.

(5) 系统径向流动阶段, 在封闭下边界的作用下, 远离井筒处, 流体的流动逐渐趋向径向流动, 最终达到水平方向的系统径向流, 如图 3(c) 所示, 在远离井筒处, 压力等值线逐渐趋于垂直方向, 说明流体的流动方向为水平方向.

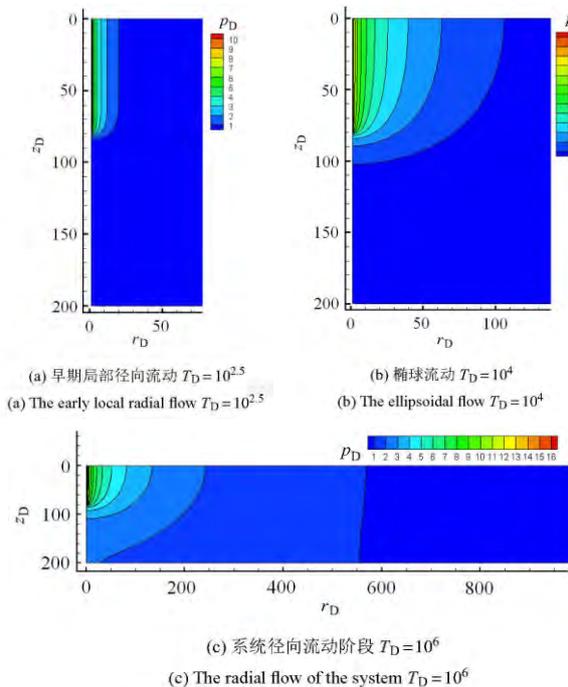


图 3 不同时刻的压力分布图 ($S_d = 1$)

Fig. 3 Pressure field of different time ($S_d = 1$)

曲线 1~3 分别代表不同污染程度的井底压力动态响应, 通过对比发现, 在第 1 和第 2 流动阶段后, 三者的压力导数曲线重合. 说明污染区的存在并不会掩盖早期径向流动及椭球流动的特征. 污染区表皮系数越大的, 第 2 阶段的驼峰越大, 压力与压力

导数曲线的开口越大.

早期径向流动和椭球流动是部分打开井最典型的特征, 两者的特征段越明显, 越有利于井底压力响应数据的解释. 通常早期径向流动阶段很难见到, 只是在无量纲储层厚度 H_D 很大时, 特征才比较明显. 这是因为 H_D 较大, 即垂向渗透率很低, 早期几乎没有垂向流动, 使得打开段的水平径向流动不受干扰. 另外两阶段的特征可能均不明显, 如无量纲井筒储存系数 C_D 较大时, 井筒储存会掩盖早期径向流动特征, 严重时甚至掩盖椭球流动特征, 这增加了解释的多解性.

3.2 与传统方法对比

传统的 Kuchuk 方法等^[4]和 Yildiz 等^[5]方法都给出了具有表皮系数的井底无量纲压力解, 即

$$p_{wD}(t_D) = L^{-1} \frac{s\bar{p}_D(s) + S}{s[1 + sC_D(s\bar{p}_D(s) + S)]} \quad (16)$$

文献中均将表达式中的 S 看作为污染区机械表皮系数 S_d , 由于解析分析上的局限性, 并没有证实两者的关系. 为了验证上式中 S 与 S_d 的关系, 将采用真实污染区计算得到的数值解与 Kuchuk 方法和 Yildiz 方法的解对比, 如图 4 所示. 数值模型采用的污染区所折算的机械表皮系数 $S_d = 1$, 但当传统方法取 $S = 2.5$ 时, 得到的曲线与本文数值解才基本一致. 说明 S 并不是机械表皮系数 S_d , 由于此时的打开厚度比 $b = 0.4$, 说明了 $S = S_d/b$ 的关系. 关于这一关系, 接下来还会进行较为详细的验证. 长期以来将上式表达式中的 S 看成 S_d , 会造成解释得到的污染区表皮系数 S_d 偏大, 从而过高地估计了钻井造成的污染程度. 式 (16) 修改成

$$p_{wD}(t_D) = L^{-1} \frac{s\bar{p}_D(s) + S_d/b}{s[1 + sC_D(s\bar{p}_D(s) + S_d/b)]} \quad (17)$$

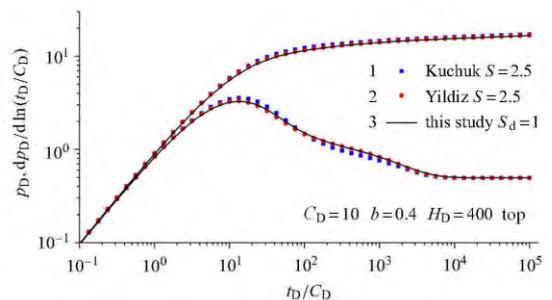


图 4 压力响应曲线的对比图

Fig. 4 Comparison of pressure response type curves

从图 4 可知, Yildiz 方法计算的结果与本文的数值解吻合的比 Kuchuk 方法更好, 尤其在压力导数曲线上, 由此可知 Yildiz 方法的精度要高于 Kuchuk 方法. 笔者还发现 Kuchuk 方法在表皮系数较小时, 早期容易出现发散, 解的稳定性也没有 Yildiz 方法好. 此外, 将图 4 与图 2 对比可知, 井筒储存系数 C_D 增加了, 使得图 4 的早期径向流动阶段被井筒储存掩盖, 说明井筒储存的影响不同于污染区的影响.

3.3 井筒储存系数与表皮系数

在 Gringarten 图版中, 无量纲井筒储存系数 C_D 与表皮系数 S 组合成 $C_D e^{2S}$, 从而使得压力响应解释效率大大提升. C_D 与 S 之所以能够组合成一个参数, 是因为对于裸眼井, 组合系数不变, 任意改变两者的值, Gringarten 图版中的压力响应特征曲线不变. 在部分打开井的井底压力响应研究中, 很多学者 [4,13-14] 也将 C_D 与表皮系数 S 组合成 $C_D e^{2S}$ (S 应该是 S_d/b).

为了说明两者能否组合, 取相同的组合系数, 取不同的 C_D 和 S_d , 计算结果如图 5 所示. 由图可知, 两曲线在井筒储存阶段和系统径向流动阶段基本重合, 但是在过渡阶段和椭圆流动阶段差别很大. 井筒储存系数大的, 椭圆流动特征不明显. 由此说明了在部分打开井中, C_D 与 S_d 不能组合, 两者对井底压力响应的影响不相同. 目前部分打开井模型中普遍利用的组合系数 $C_D e^{2S}$ 是一个误区, 这种分析方法可能存在较大误差. 井底压力响应曲线图版应该单独考虑 C_D 与 S , 此外井底压力响应还受无量纲储层厚度 h_D 和打开程度系数 b 及打开位置的影响, 即部分打开井的井底压力响应曲线由这 5 个因素决定.

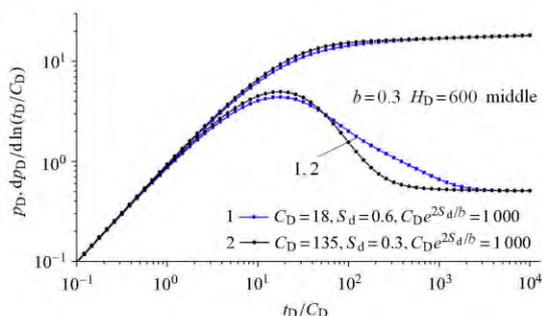


图 5 相同组合系数下的压力响应特征曲线
Fig. 5 Pressure response type curves under same combination coefficient

3.4 总表皮系数计算

具有污染区的部分打开井总表皮系数 S_t , 由两

部分组成, 一部分是由于部分打开造成的表皮系数 S_{pp} , 另外一部分是井周污染区所带来的机械表皮系数 S_d . 根据系统径向流动阶段时, 无量纲井底压力与无量纲时间的关系 $p_{wD} = (\ln t_D + 0.80907)/2 + S_t$, 可以计算总表皮系数. 当模型设定没有污染区时, 总表皮系数 $S_t = S_{pp}$, 利用此方法可以计算得到 S_{pp} . 传统计算表皮系数 S_{pp} 的方法很多, 比较常用的方法主要有 Kuchuk 方法 [4]、Papatzacos 方法 [20] 和 Vrbik 方法 [21], 其中 Kuchuk 方法只能计算打开位置在顶部或者底部的情况. 将这些方法计算的结果与本文数值方法计算的结果进行对比, 如图 6 所示. 由图可知, 在第 1 种计算参数下 ($h_D = 400$, 顶部或底部), 各种方法计算的结果基本上一致, Vrbik 方法计算的值更加接近本文数值方法计算的值. 在第 2 种参数组合下 ($h_D = 100$, 正中部), 由于 Kuchuk 方法不能计算位于中部的情形, 故只列出了本文与另外两种方法的结果. 此时, Papatzacos 方法与数值解偏差较大, 而 Vrbik 方法依旧与数值解相差较小, 由此可知 Vrbik 方法精度更高.

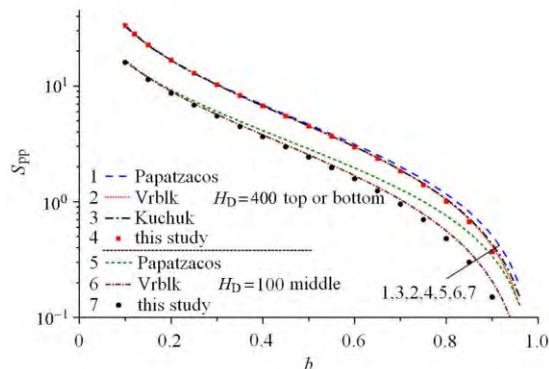


图 6 不同计算方法得到的表皮系数 S_{pp} 对比图

Fig. 6 Comparison of skin factor S_{pp} using different methods

在具有污染区条件下的总表皮系数, 很多学者 (Odeh [22], Vrbik [21]) 认为是两部分表皮相加, 即

$$S_t = S_{pp} + S_d \tag{18}$$

同时也有学者 (Jones [23], Saidikowski 等 [24]) 认为上述计算公式低估了污染区对总表皮系数的影响, 并提出的 S_t 计算公式如下

$$S_t = S_{pp} + S_d/b \tag{19}$$

本文的数值方法能够很好地判断哪个公式更接近实际情况. 数值模型中考虑污染区时的总表皮系数 S_t 减去不考虑污染区时的表皮系数 S_{pp} , 即可得

到由于污染区使得总表皮系数的增加量. 图 7 为不同参数组合下的 $S_t - S_{pp}$ 与 S_d/b 之间的关系, 图中所有的点都在对角线附近, 说明了 $S_t - S_{pp} = S_d/b$ 的关系较为准确, 从而也验证了式 (19) 是计算总表皮系数较可靠的公式.

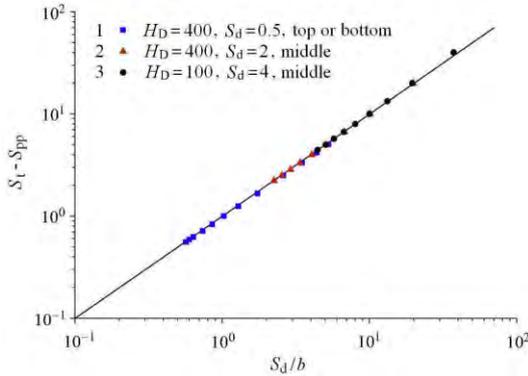


图 7 总表皮系数公式的验证图

Fig. 7 Verification diagram of the total skin factor formula

4 结论

(1) 根据部分打开井轴对称的特点, 本文建立了一种具有污染区的部分打开井二维轴对称数值渗流模型. 利用有限元数值方法对模型进行求解, 获得了部分打开井的井底压力响应及储层压力分布. 对 5 个不同流动阶段进行了较为详细的分析, 并研究了污染区对井底压力响应的影响, 为部分打开井的井底压力响应解释及产能预测提供理论指导.

(2) 通过与传统方法对比分析, 发现传统方法压力表达式中的表皮系数 S 并不等于机械表皮系数 S_d . 根据数值计算结果, 确定了两者的关系并修正了传统方法的计算公式. 传统方法中 Yildiz 方法的精度及适用性要高于 Kuchuk 方法.

(3) 数值计算结果表明: 污染区对部分打开井井底压力响应的影响不同于井筒储存, 无量纲井筒储存系数 C_D 与表皮系数 S_d 不能组合, 目前常将两者组合为 $C_D e^{2S}$ 是不正确的, 两者应单独考虑.

(4) 部分打开表皮系数 S_{pp} 的计算结果对比发现 Vibik 方法最接近本文的数值解, 故 Vibik 方法是一种精度很高且计算简单的方法. 通过大量不同参数组合下的总表皮系数计算分析表明, 式 (19) 是计算总表皮系数更准确的方法.

参 考 文 献

1 葛家理. 现代油藏渗流力学原理. 北京: 石油工业出版社, 2003 (Ge Jiali. The Modern Mechanics of Fluids Flow in Oil Reservoir.

Beijing: Petroleum Industry Press, 2003 (in Chinese))

- 2 Gringarten AC, Ramey JR, Henry J. An approximate infinite conductivity solution for a partially penetrating line-source well. *SPE Journal*, 1975, 15(2): 140-148
- 3 Abbott WA, Collins T, Tippie DB. Practical application of spherical flow transient analysis. SPE Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, 1978-10-1-3
- 4 Kuchuk FJ, Klrwan PA. New skin and wellbore storage type curves for partially penetrated wells. *SPE Formation Evaluation*, 1987, 2(4): 546-554
- 5 Yildiz T, Bassiouni Z. Transient pressure analysis in partially penetrating wells. SPE International Technical Meeting, Calgary, Alberta, 1990-06-10-13
- 6 Yildiz T, Cinar Y. Inflow performance and transient pressure behavior of selectively completed vertical wells. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 1998, 5(1): 467-475
- 7 Yildiz T. Assessment of total skin factor in perforated wells. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 2006, 9(1): 62-76
- 8 张厚清. 双重介质内气体向不完善井渗流问题的分析解. 石油学报, 1982, 3(2): 51-62 (Zhang Houqing. An analytical solution of gas flow towards a partially penetrated well in double porous media. *Acta Petrolei Sinica*, 1982, 3(2): 51-62 (in Chinese))
- 9 刘慈群. 轴对称二维定常和不定常渗流. 力学学报, 1983, 15(2): 103-110 (Liu Ciqun. Axisymmetrical two-dimensional steady and unsteady flow through porous media. *Acta Mechanica Sinica*, 1983, 15(2): 103-110 (in Chinese))
- 10 刘慈群, 韩得礼. 用数值反演研究多重介质不完善井的压力变化性质. 石油勘探与开发, 1983, 10(1): 49-54 (Liu Ciqun, Han Deli. A study of characteristics of the pressure build-up curves of a partially penetrated well in multiple porosity media by a method of numerical inversion of Laplace transforms. *Petroleum Exploration and Development*, 1983, 10(1): 49-54 (in Chinese))
- 11 刘慈群, 杨玠. 底水灰岩油藏中不完善井的压力动态. 石油钻采工艺, 1989, 11(1): 47-52 (Liu Ciqun, Yang Jie. The pressure behavior in imperfect well in bottom water limestone oil reservoir. *Oil Drilling & Production Technology*, 1989, 11(1): 47-52 (in Chinese))
- 12 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. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(6): 87-90 (Chen Fangfang, Jia Yonglu, Zhang Xiangfu. Partial perforated filtration model and the typical curve of well test for dual media. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2008, 27(6): 87-90 (in Chinese))
- 13 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. 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. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2007, 26(3): 65-67 (in Chinese))
- 14 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. 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. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(4): 513-518 (in Chinese))
- 15 欧阳伟平, 刘曰武. 射孔完井参数对试井理论曲线的影响. 石油学报, 2013, 34(3): 528-534 (Ouyang Weiping, Liu Yuewu. Effects

- of perforating parameters on well test type curves. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 528-534 (in Chinese)
- 16 刘立明, 廖新维. 油水两相渗流改进 IMPES 解法. *力学与实践*, 2003, 25(4): 20-22 (Liu Liming, Liao Xinwei. The modified IMPES solution to oil-water flow in porous media. *Mechanics in Engineering*, 2003, 25(4): 20-22 (in Chinese))
- 17 陈慧新, 刘曰武. 非均质油藏试井分析理论的研究进展. *力学进展*. 2005, 35(2): 249-259 (Chen Huixin, Liu Yuewu. Advance of well test analysis for heterogenous reservoirs. *Advance in Mechanics*, 2005, 35(2): 249-259 (in Chinese))
- 18 牛丛丛, 刘曰武, 蔡强等. 煤层气井气水两相分布不稳定试井模型. *力学与实践*, 2013, 35(5): 35-41 (Niu Congcong, Liu Yuewu, Cai Qiang, et al. Transient well test model for the well with gas and water distributed in coalbed. *Mechanics in Engineering*, 2013, 35(5): 35-41 (in Chinese))
- 19 蔡建超, 郁伯铭. 多孔介质自发渗吸研究进展. *力学进展*, 2012, 42(6): 735-754 (Cai Jianchao, Yu Boming. Advances in studies of spontaneous imbibition in porous media. *Advance in Mechanics*, 2012, 42(6): 735-754 (in Chinese))
- 20 张涤明, 蔡崇喜, 章克本等. 计算流体力学. 广州: 中山大学出版社, 1991 (Zhang Diming, Cai Congxi, Zhang Keben, et al. *Computational Fluid Dynamics*. Guangzhou: Sun Yat-Sen University Press, 1991 (in Chinese))
- 21 Papatzaco P. Approximate partial-penetration pseudoskin for infinite conductivity wells. *SPE Reservoir Engineering*, 1987, 2(2): 227-234
- 22 Vrblk J. A simple approximation to the pseudoskin factor resulting from restricted entry. *SPE Formation Evaluation*, 1991, 6(4): 444-446.
- 23 Odeh AS. Steady-state flow capacity of wells with limited entry to flow. *SPE Journal*, 1968, 8(1): 43-51
- 24 Jones LG, Watts JW. Estimating skin effect in a partially completed damaged well. *Journal of Petroleum Technology*, 1971, 23(2): 249-252
- 25 Saidikowski RM. Numerical simulations of the combined effects of wellbore damage and partial penetration. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Nevada, 1979-09-23-26

(责任编辑: 周冬冬)

EFFECTS OF FORMATION DAMAGE ZONE ON BOTTOM-HOLE PRESSURE RESPONSE OF PARTIALLY PENETRATING WELLS¹⁾

Ouyang Weiping¹⁾ Liu Yuewu²⁾ Wan Yizhao

(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The effect of formation damage zone due to well drilling on partially penetrating wells is different from that on open-hole wells. In order to analyze the effect of damage zone on pressure response at the well bottom, this paper presents a 2D axial symmetry porous flow model for partially penetrating well. The model considers the actual formation damage zone around the wellbore and reservoir permeability anisotropy. The bottom-hole pressure response curves and pressure fields of partially penetrating wells are obtained by using the FEM method. The analysis of the pressure response curves and pressure fields shows that five flow regimes may appear in the pressure response process of partially penetrating wells. The early-time radial flow and the ellipsoidal flow are typical characteristics of partially penetrating wells. The effect of damage zone is studied. It shows that the skin factor S in traditional methods is not the mechanical skin factor S_d due to the formation damage. The dimensionless wellbore storage coefficient cannot combine with the mechanical skin factor. The wellbore pressure obtained from traditional methods is modified. The formula for total skin factor of partially penetrating wells is verified. Those conclusions provide theoretical guidance for the transient pressure data interpretation and productivity prediction of partially penetrating wells.

Key words partially penetrating wells, formation damage zone, ellipsoidal flow, numerical well test, skin factor

Received 25 June 2013, revised 24 September 2013.

1) The project was supported by the National S&T Major Project of China (2011ZX05038-003).

2) Liu Yuewu, professor, research interests: fundamental research and applications of fluid flow mechanics in porous media and reservoir engineering. E-mail: lywu@imech.ac.cn