

文章编号: 1000-0887(2002) 06-0635-08

低渗透非均质油藏单相渗流敏感系数^{*}

程时清¹, 张盛宗², 黄延章², 朱维耀²

(1. 石油大学(北京)石油天然气工程学院, 北京 昌平, 102249;

2. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 44 信箱, 065007)

(刘慈群推荐)

摘要: 建立了在单相低速非达西渗流条件下反求低渗透油藏参数的敏感系数公式, 给出了各类非均质油藏条件下压力关于渗透率和孔隙度的数值计算结果。认识到井底压力对井底附近的渗透率更敏感, 启动压力梯度的存在, 使生产井附近区域敏感系数变大。观测井敏感系数在两井连线区域受启动压力梯度影响很大。

关键词: 非达西渗流; 渗透率; 孔隙度; 敏感系数; 反问题; 低渗透油藏

中图分类号: TE312 **文献标识码:** A

引 言

敏感系数表示观测数据对模型参数的变化率, 它反映了待求参数对模型的敏感程度, 敏感系数的计算是反问题理论的重要内容。

Jacquard 和 Jian^[1]首次在电模拟基础上提出了用于历史拟合的二维油藏渗透率敏感系数计算方法。Anterion 等人^[2]将梯度模拟器法引入到石油工程中, 通过求有限差分方程的矩阵关于模型参数(如渗透率和孔隙度)的导数, 从而解一个线性系统, 梯度模拟器法的优点对每个模型参数减少了求解多个右边向量, 困难在于假如我们想估计或构造上千个网格块的渗透率和孔隙度, 那么产生几千个右边项, 右边项的数目等于待估计的模型参数数目。尽管 Killough 等人^[3]研究了一个快速迭代程序, 每个敏感系数计算的工作量仍然相当于前模拟的 10%, 计算量很大。

梯度模拟器方法实际获得的是所有网格压力或孔隙度相对于每个模型参数的敏感系数, 对于大多数情形, 由于只有井点的资料, 这是无用信息。事实上, 正是这些无用信息减少了梯度模拟器方法的计算效率。为了避免无用计算, Chu 等人^[4]使用了 Tang 等人^[5]的基本概念, 研究了改进的广义脉冲光谱技术(MGPST), 估计井底压力相对于油藏模拟网格渗透率和孔隙度的敏感系数, 该法产生了精确的渗透率敏感系数, 不幸的是不能产生孔隙度敏感系数。

Carter 等人^[6]导出了计算二维单相流问题敏感系数的积分方法, He 等人^[7]将 Carter 的方法拓展到三维油藏描述, 证实为一种有效的计算方法。Richard^[8]给出了计算敏感系数方法的

* 收稿日期: 2001_05_08; 修订日期: 2002_02_05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10172061)

作者简介: 程时清(1963—), 男, 副教授, 博士(E-mail: chengsq@263.net)

评述·

上述方法的适用条件是中高渗透性油藏达西渗流,对于低渗透油藏,一般存在启动压力梯度,出现低速非达西流· 本文探讨低渗透油藏低速非达西渗流敏感系数计算方法·

1 敏感系数的推导

若 $p_{wf}(t)$ 表示井底压力, 则任意时间 t , 网格 (l, m, n) 处压力对三个方向的渗透率和孔隙度的敏感系数分别为, $\partial p_{wf}(t)/\partial k_{x, i, m, n}$, $\partial p_{wf}(t)/\partial k_{y, i, m, n}$, $\partial p_{wf}(t)/\partial k_{z, i, m, n}$, $\partial p_{wf}(t)/\partial \phi_{i, m, n}$ · 其中, p 为油藏压力, MPa; t 为时间, h; k 为地层渗透率, μm^2 ; ϕ 为孔隙度, 无量纲· 下标 i, m, n 表示 x, y, z 三个方向的长度, x, y, z 的单位为 m, wf 表示井眼·

低渗透油藏低速非达西渗流方程为

$$\frac{c_l}{\mu} [k](1 - H_d) p_d - V \frac{\partial p_d}{\partial s} = -Q, \quad (1a)$$

$$p_d|_{s=0} = 0, \quad (1b)$$

$$p_d \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (1c)$$

式中, $V = \phi_i$; $p_d = p_i - p$, p_i 为油藏原始压力, MPa; c_l 为综合压缩系数, $1/\text{MPa}$; μ 为流体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; Q 为流量, m^3/h ; λ 为启动压力梯度, MPa/m ; $H_d(x, y, z) = 1/|p_d|$ 为压力梯度的函数·

考虑渗透率的微小扰动 δk , 则渗流问题为

$$\frac{c_l}{\mu} [k + \delta k](1 - H_d) p_d - V \frac{\partial p_d}{\partial s} = -Q, \quad (2a)$$

$$p_d|_{s=0} = 0, \quad (2b)$$

$$p_d \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (2c)$$

上式中, p_d 和 Q 分别表示由于渗透率小的扰动引起的压力降落和源汇项, δk 为渗透率张量扰动, 即

$$\delta \mathbf{k} = \begin{bmatrix} \delta k_x & & \\ & \delta k_y & \\ & & \delta k_z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

令 dp_d 表示由于渗透率的扰动引起的压力降落差, 即 $dp_d = p_d - p_d$ ·

方程(2a)减去(1a), 有

$$\frac{c_l}{\mu} [k](1 - H_d) dp_d - V \frac{\partial dp_d}{\partial s} + \frac{c_l}{\mu} \lambda [k](H_d - H_d) p_d - \frac{c_l}{\mu} [\delta k](1 - H_d) p_d - (Q - Q), \quad (4a)$$

$$p_d|_{s=0} = 0, \quad (4b)$$

$$p_d \cdot \mathbf{n} = 0. \quad (4c)$$

定义函数

$$F(\mathbf{k}) = \iiint_{T_n} G_n(x, y, z) dp_d(x, y, z, t) dx dy dz, \quad (5)$$

上式中, T_n 是渗流子区域, 代表网格块 (x_i, y_j, z_k) , $T_n \in \mathbf{R}$ · G_n 是井的位置的函数, $G_n \in \mathbf{R}$; $G_n = 0$, 当 $G_n \notin T_n$; $\iiint_{T_n} G_n(x, y, z) dx dy dz = 1$ · 方程(5)表示 $dp_d(x, y, z, t)$ 在 T_n 上的平均

值。选择 $G_n(x, y, z) = \delta(x - x_i) \delta(y - y_j) \delta(z - z_k)$, 则 $F(\mathbf{k}) = dp_d(x_i, y_j, z_k, t)$ 。考虑单位源汇项的渗流问题

$$\frac{c_1}{\mu} [k] (1 - \mathcal{H}_{nd}) p_{nd} - V \frac{\partial p_{nd}}{\partial s} = - H(t) G_n(x, y, z), \quad (6a)$$

$$p_{nd}|_{s=0} = 0, \quad (6b)$$

$$\nabla p_{nd} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad (6c)$$

式中, $H(t)$ 是 Heaviside 函数。

如果 $G_n(x, y, z) = \delta(x - x_i) \delta(y - y_j) \delta(z - z_k)$, 则源汇项相当于从网格 T_n 采出 $1 \text{ m}^3/\text{d}$ 的流体。如果用 $\delta(t)$ 取代 $H(t)$, 则源汇项问题等价于格林函数问题。

方程(4a)两边同乘以 p_{nd} , 方程(2a)两边同乘以 dp_d , 然后两式相减, 有

$$\begin{aligned} & \iiint_{\mathbf{R}^3} \int_0^t -G_n(x, y, z) H(t-s) dp_d(x, y, z, t) ds dx dy dz = \\ & - \frac{c_1}{\mu} \iiint_{\mathbf{R}^3} \int_0^t (1 - \mathcal{H}_d) [k] p_d(x, y, z, s) p_{nd}(x, y, z, t-s) ds dx dy dz - \\ & \iiint_{\mathbf{R}^3} \int_0^t (Q(x, y, z, s) - Q(x, y, z, t-s)) p_{nd}(x, y, z, t-s) ds dx dy dz - \\ & \frac{c_1}{\mu} \int_0^t ds \iiint_{\mathbf{R}^3} [k] \lambda(H_d - H) p_{nd}(X, t-s) p_d(X, s) dx dy dz. \end{aligned} \quad (7)$$

上式关于 t 求导, 得

$$\begin{aligned} & \iiint_{T_n} G_n(x, y, z) dp_d(x, y, z, t) dx dy dz = \\ & \frac{c_1}{\mu} \iiint_{\mathbf{R}^3} \int_0^t [k] (1 - \mathcal{H}_d) p_d(x, y, z, s) ds dx dy dz - \\ & \frac{c_1}{\mu} \iiint_{\mathbf{R}^3} \int_0^t (p_d(x, y, z, s)) \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t-s) ds dx dy dz + \\ & \frac{c_1}{\mu} \iiint_{\mathbf{R}^3} \int_0^t (1 - \mathcal{H}_d) [k] p_d(x, y, z, s) \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t-s) ds dx dy dz + \\ & \iiint_{\mathbf{R}^3} \int_0^t (Q(x, y, z, s) - Q(x, y, z, t-s)) \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t-s) ds dx dy dz - \\ & \frac{c_1}{\mu} \int_0^t ds \iiint_{\mathbf{R}^3} [k] \lambda(H_d - H) p_{nd}(X, t-s) p_d(X, s) dx dy dz. \end{aligned} \quad (8)$$

令 $\|\delta \mathbf{k}\| \rightarrow 0$, $(p_d - p_{nd}) \rightarrow 0$, $(H_d - H) \rightarrow 0$, 根据 Carter 等人的结果, 忽略二阶扰动项, 并关于 $\delta \mathbf{k}$ 求导得

$$\begin{aligned} dp_d(T_n, t) = & - \frac{c_1}{\mu} \sum_{m=1}^M \iiint_{T_m} \int_0^t \left[\delta k_{x, T_m} (1 - \mathcal{H}_d) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t-s) \times \right. \\ & \frac{\partial}{\partial x} p_d(x, y, z, s) + \delta k_{y, T_m} (1 - \mathcal{H}_d) \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t-s) \frac{\partial}{\partial y} p_d(x, y, z, s) + \\ & \left. \delta k_{z, T_m} (1 - \mathcal{H}_d) \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t-s) \frac{\partial}{\partial z} p_d(x, y, z, s) \right] ds dx dy dz + \\ & \sum_{m=1}^M \iiint_{T_m} \int_0^t \left[\frac{\partial Q(x, y, z, s)}{\partial k_{x, T_m}} \delta k_{x, T_m} + \frac{\partial Q(x, y, z, s)}{\partial k_{y, T_m}} \delta k_{y, T_m} + \right. \\ & \left. \frac{\partial Q(x, y, z, s)}{\partial k_{z, T_m}} \delta k_{z, T_m} \right] \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t-s) ds dx dy dz. \end{aligned} \quad (9)$$

根据 dp_d 的全微分形式, 得

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_d(T_n, t)}{\partial k_{x, T_m}} = & - \frac{c_1}{\mu} \iiint_{T_m} \int_0^t (1 - \mathcal{H}_d) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t - s) \frac{\partial}{\partial x} p_d(x, y, z, s) ds dx dy dz + \\ & \iiint_{T_m} \int_0^t \frac{\partial Q(x, y, z, s)}{\partial k_{x, T_m}} \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t - s) ds dx dy dz, \end{aligned} \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_d(T_n, t)}{\partial k_{y, T_m}} = & - \frac{c_1}{\mu} \iiint_{T_m} \int_0^t (1 - \mathcal{H}_d) \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t - s) \frac{\partial}{\partial y} p_d(x, y, z, s) ds dx dy dz + \\ & \iiint_{T_m} \int_0^t \frac{\partial Q(x, y, z, s)}{\partial k_{y, T_m}} \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t - s) ds dx dy dz, \end{aligned} \quad (10b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_d(T_n, t)}{\partial k_{z, T_m}} = & - \frac{c_1}{\mu} \iiint_{T_m} \int_0^t (1 - \mathcal{H}_d) \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t - s) \frac{\partial}{\partial z} p_d(x, y, z, s) ds dx dy dz + \\ & \iiint_{T_m} \int_0^t \frac{\partial Q(x, y, z, s)}{\partial k_{z, T_m}} \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t - s) ds dx dy dz, \end{aligned} \quad (10c)$$

其中 $m = 1, 2, \dots, M$, M 是油藏总网格块数。

当油藏无层间流量时, 上式右边第二项为零。当启动压力梯度为零, $H_d = 0$, 式(10) $H_d = 0$ 简化为达西渗流情形 He 给出的公式^[7]。

考虑油藏孔隙体积的微小扰动 δV , 类似可得到孔隙度敏感系数。

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_d(T_n, t)}{\partial \phi_{r_m}} = & - c_1 \iiint_{T_m} \int_0^t \frac{\partial}{\partial s} p_d(x, y, z, s) \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t - s) ds dx dy dz + \\ & \iiint_{T_m} \int_0^t \frac{\partial Q(x, y, z, s)}{\partial \phi_{r_m}} \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t - s) ds dx dy dz. \end{aligned} \quad (11)$$

当油藏无层间流量时, 上式右边第二项为零, 可简化为

$$\frac{\partial p_d(T_n, t)}{\partial \phi_{r_m}} = - c_1 \iiint_{T_m} \int_0^t \frac{\partial}{\partial s} p_d(x, y, z, s) \frac{\partial}{\partial t} p_{nd}(x, y, z, t - s) ds dx dy dz. \quad (12)$$

2 敏感系数的数值计算

使用梯形法计算积分(10a), x 方向渗透率敏感系数的数值积分为

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_d(x_i, y_j, z_k, t_n)}{\partial k_x} = & - \frac{c_1}{\mu} \Delta x_l \Delta y_m \Delta z_n \sum_{p=1}^n \frac{t_p - t_{p-1}}{2} (1 - \mathcal{H}_d) \times \\ & \left\{ \left[\frac{\partial p_d(x_{l-1/2}, y_m, z_n, t_{p-1})}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial p_{nd}(x_{l-1/2}, y_m, z_n, t_n - t_{p-1})}{\partial (t_n - s)} \right] + \right. \\ & \left. \frac{\partial p_d(x_{l-1/2}, y_m, z_n, t_p)}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial p_{nd}(x_{l-1/2}, y_m, z_n, t_n - t_p)}{\partial (t_n - s)} \right\} \times \end{aligned}$$

$$\left[\frac{\partial p_d(x_{l+1/2}, y_m, z_n, t_{p-1})}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial p_{nd}(x_{l+1/2}, y_m, z_n, t_n - t_{p-1})}{\partial(t_n - s)} + \frac{\partial p_d(x_{l+1/2}, y_m, z_n, t_p)}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial p_{nd}(x_{l+1/2}, y_m, z_n, t_n - t_p)}{\partial(t_n - s)} \right] \}, \quad (13)$$

上式中, p_d 是由数值模拟器计算的网格块压力, 而 p_{nd} 是单位流量源汇项计算的压力降。

根据卷积定理, 式(10a)也可改写为

$$\frac{\partial p_d(x_i, y_j, z_k, t_n)}{\partial k_x} = - \frac{c_1}{\mu} \Delta y_m \Delta z_n \int_0^{t_n} \int_{x_{l-1/2}}^{x_{l+1/2}} (1 - \mathcal{H}d) \times \left[\frac{\partial p_{nd}(x, y_m, z_n, s)}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial p_d(x, y_m, z_n, t_n - s)}{\partial(t_n - s)} \right] dx ds. \quad (14)$$

用方程(13)和(14)分别计算网格 T_n 的渗透率敏感系数, 然后再取其算术平均, 其精度比单独用二者之一计算精度高。

类似地也可得到孔隙度敏感系数的数值形式。

3 井底压力的敏感系数

实际拟合过程中, 观测到的是井底压力而不是油藏压力, 井底压力的敏感系数直接与网格块的敏感系数有关, 用类似方法可以导出计算公式。

考虑定流量生产, 井底压力随时间变化, α 代表渗透率 k_x, k_y, k_z 和孔隙度 ϕ , 则流量 $q_{i,j}^n$ 关于模型参数 α 的导数为零, 有⁽⁹⁾

$$\frac{\partial p_{wf}^n}{\partial \alpha} = \frac{\sum_{k=l_1}^{l_2} (W_1)_k \frac{\partial p_{i,j,k}^n}{\partial \alpha}}{\sum_{k=l_1}^{l_2} (W_1)_k} + \frac{\sum_{k=l_1}^{l_2} (p_{i,j,k}^n - p_{wf}^n - x_{ok}) \frac{\partial (W_1)_k}{\partial \alpha}}{\sum_{k=l_1}^{l_2} (W_1)_k} - \frac{\sum_{k=l_1}^{l_2} (W_1)_k \lambda \frac{\partial r_{ok}}{\partial \alpha}}{\sum_{k=l_1}^{l_2} (W_1)_k}, \quad (15)$$

上式中, W_1 为采油指数, $m^3/MPa \cdot d$, 右边第一项是与网格块压力有关的项, 第二项是与油井的采油指数有关的项, 而第三项是与等效网格块渗透性有关的项。

令 $\alpha = k_x$, 首先, 考虑第一项

$$\sum_{k=l_1}^{l_2} (W_1)_k \frac{\partial p_{i,j,k}^n}{\partial \alpha} \bigg|_{k=l_1}^{l_2} \sum_{k=l_1}^{l_2} (W_1)_k = - \frac{c_1}{\mu} \Delta y_m \Delta z_n \int_0^{t_n} \int_{x_{l-1/2}}^{x_{l+1/2}} \left[\frac{\partial p_d(x, y_m, z_n, s)}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial \hat{p}_{nd}(x, y_m, z_n, t_n - s)}{\partial(t_n - s)} \right] dx ds, \quad (16)$$

其中,

$$\hat{p}_{nd}(x, y_m, z_n, t_n - s) = \frac{\sum_{k=l_1}^{l_2} (W_1)_k p_{nd}(x, y_m, z_n, t_n - s)}{\sum_{k=l_1}^{l_2} (W_1)_k} \quad (17)$$

是下列问题的解

$$\frac{c_1}{\mu} \cdot [k] (1 - \mathcal{H}_{nd}) \cdot \hat{p}_{nd} - V \frac{\partial \hat{p}_{nd}}{\partial s} = - \delta(x - x_i) \delta(y - y_j) \frac{\sum_{k=l_1}^{l_2} (W_1)_k \delta(z - z_k)}{\sum_{k=l_1}^{l_2} (W_1)_k}, \quad (18a)$$

$$\hat{p}_{nd} |_{s=0} = 0, \quad (18b)$$

$$\therefore \hat{p}_{nd} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (18c)$$

垂直井的采油指数仅仅依赖于 x 方向和 y 方向网格的渗透率。则有

$$\frac{\partial (W_1)_k}{\partial k_{x,l,m,n}} = \frac{c_1 \Delta z_k \sqrt{k_{x,i,j} k_{y,i,j,k}}}{2\mu (\ln[r_{ok}/r_w] + S_k)} \left[\frac{\sqrt{k_{y,i,j,k}}}{\sqrt{k_{x,i,j,k}}} - \frac{1}{\ln[r_{ok}/r_w] + S_k} \times \left(\frac{\sqrt{k_{x,i,j,k} k_{y,i,j,k} \Delta y_j^2}}{k_{y,i,j,k} \Delta x_i^2 + k_{x,i,j,k} \Delta_i^2} - \frac{\sqrt{k_{y,i,j,k}}}{\sqrt{k_{x,i,j,k} + \sqrt{k_{y,i,j,k}}}} \right) \right], \quad (19)$$

上式中, r 为径向半径, m , 类似地可得到 $\partial (W_1)_k / \partial k_{y,l,m,n}$ 。

而 $\partial r_{ok} / \partial \alpha$ 为

$$\frac{\partial r_{ok}}{\partial k_{y,l,m,n}} = \frac{0.2873 \Delta x_i}{1 + \sqrt{k_{x,i,i,k} / k_{y,i,j,k}}} \frac{1}{2} \frac{\frac{1}{k_{y,i,j,k}} \left(\frac{\Delta y_j}{\Delta x_i} \right)^2}{\sqrt{1 + \frac{k_{x,i,i,k}}{k_{y,i,i,k}} \left(\frac{\Delta y_j}{\Delta x_i} \right)^2}} - \frac{0.2873 \Delta x_i}{(1 + \sqrt{k_{x,i,i,k} / k_{y,i,j,k}})^2} \frac{1}{2 k_{y,i,j,k} \sqrt{k_{x,i,i,k} / k_{y,i,j,k}}}. \quad (20)$$

特例, 对于二维问题, 井底压力敏感系数为

$$\frac{\partial p_{wf}^n}{\partial \alpha} = q_{i,j}^n \frac{\partial W_1}{\partial \alpha} + \frac{\partial p_{i,j}^n}{\partial \alpha} - \lambda \frac{\partial r_{ok}}{\partial \alpha}. \quad (21)$$

实际分析时考虑的是对数渗透率而不是渗透率的敏感系数, 则

$$\frac{\partial p_{wf}}{\partial k} = \frac{\partial p_{wf}}{\partial \ln k} \frac{\partial \ln k}{\partial k} = \frac{1}{k} \frac{\partial p_{wf}}{\partial \ln k}. \quad (22)$$

一旦计算出 $\partial p_{wf} / \partial k$, 从式(22) 很容易计算出 $\partial p_{wf} / \partial \ln k$ 。

4 敏感系数的算例

考虑二维等厚油藏, 假定上、下、左、右为不渗透边界, 渗透率 $k_x = k_y = k_z$, 油藏面积为 $300 \times 300 \text{ m}^2$, 采用 15×15 网格, $\Delta x = \Delta y = 20 \text{ m}$ 。生产井位于(4, 8), 观测井位于(12, 8)。油藏渗透率和孔隙度为非均匀分布, 数据见文献[9], 其它数据为, 厚度 $h = 10 \text{ m}$, 粘度 $\mu = 5.0 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, 综合压缩系数 $c_t = 1.5 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ 。生产井以定产量 $q = 20 \text{ m}^3/\text{d}$ 生产, 启动压力梯度 $\lambda = 0.005 \text{ MPa}/\text{m}$ 。

图1和图2分别是 $t = 4 \text{ d}$ 时观测井压力关于渗透率对数和孔隙度的敏感系数分布等值线。从图1中明显看出, 生产井井点(4, 8)和观测井井点(12, 8)的渗透率对数敏感系数为零, 同时也注意到, 两井点连线之间渗透率对数的敏感系数为负值, 这意味着这些网格块的渗透率增加, 将引起观测井压力下降。从物理上分析, 两井间高的渗透性, 将引起观测井压力降落更快, 从而观测井压力更低, 这就解释了为什么两井区的敏感系数为负值。

5 结 论

1. 导出了低渗透油藏考虑启动压力梯度时三维油藏敏感系数计算通式, 该公式包含了定井底压力和多层分流量等内边界条件。在启动压力梯度为零时, 简化为 He 等人达西渗流计算式。在对压力修正为拟压力后, 达西流公式可用于气藏敏感系数计算。

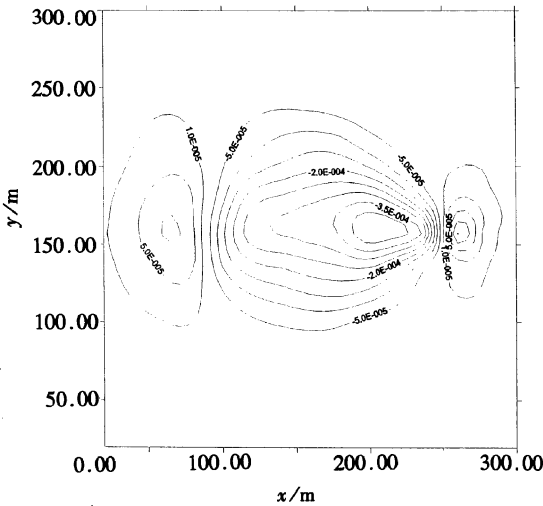


图1 渗透率对数的敏感系数等值线

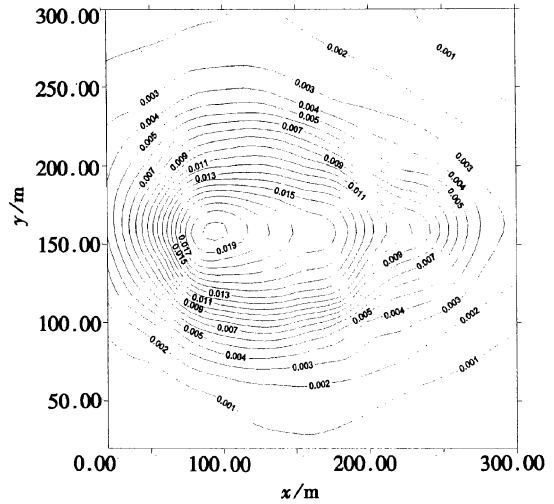


图2 孔隙度的敏感系数等值线

2. 对于均质油藏, 生产井压力对渗透率敏感系数为正, 表明增大渗透率, 井底压力下降变快。对于观测井, 在两井点处接近于零, 观测井压力对含观测井和生产井的网格块渗透率不敏感, 两井点连线之间, 敏感系数为负值, 这意味着这些网格块的渗透率增加, 将引起观测井压力下降。对于生产井而言, 井点敏感系数最大, 然后随时间的增大, 敏感区域逐渐扩大。

3. 尽管观测井压力下降与生产井相比不大, 但渗透性和孔隙性的变化对观测井压力仍然相当敏感。渗透率敏感系数分布区域甚至比生产井大。观测井对渗透率和孔隙度的敏感系数在流动时间较短时是对称的, 但当流动时间较长时, 靠近观测井一侧敏感系数变大。He 等人因计算时间太短, 得出的敏感系数关于两井对称是不正确的。

4. 启动压力梯度的存在, 使生产井附近区域敏感系数变大, 影响区域变小。观测井敏感系数在两井连线区域受启动压力梯度影响很大。

5. 当裂缝存在影响到井底压力变化时, 压力对裂缝敏感程度超过了对地层本身, 生产井渗透率敏感系数在其井底甚至变为负值。当裂缝从两井之间穿过时, 用观测井压力无法识别裂缝与两井连线交点网格块的渗透率; 当裂缝以同一方向穿过两井但不连通时, 观测井压力对两井中心区域最敏感。地层中渗透性和孔隙性的非均质性, 在敏感系数分布上反应很明显, 生产井压力对高渗区更敏感。

[参 考 文 献]

- [1] Jacquard P, Jain C. Permeability distribution from field pressure data[J]. Soc Pet Eng J, 1965, 5 (12): 281—294.
- [2] Anterion F, Eymard R, Kärcher B. Use of parameter gradients for reservoir history matching[A]. In: the 1989 SPE Symposium on Reservoir Simulation [C]. Paper SPE18433, Houston, 1989, 339—349.
- [3] Killough J E, Sharma Y, Dupuy A, et al. A multiwell right hand side iterative solver for history matching[A]. In: the 1995 SPE Symposium on Reservoir Simulation [C]. Paper SPE29119, Houston, 1995, 249—255.
- [4] Chu L, Reynolds A C, Oliver D S. Computation of sensitivity coefficients for conditioning the permeability field to well test pressure data[J]. In Situ, 1995, 19(2): 179—223.
- [5] Tang Y N, Chen Y M, Wasserman M L. Generalized pulse spectrum technique for 2_D and 2_phase

- history matching[J]. Applied Numerical Mathematics, 1989, 5(5): 529—539.
- [6] Carter R D, Kemp L F Jr, Pirece A C, et al. Performance matching with constrains[J]. Soc Pet Eng J, 1974, 14(4): 187—196.
- [7] He Nanque, Reynolds A C, Oliver D S. Three dimensional reservoir description from multiwell pressure data and prior information[J]. Soc Pet Eng J, 1997, 2(3): 312—327.
- [8] Richard Ewing E, Pilant Michael S, Wade Gordon J, et al. Estimating parameters in scientific computation[J]. IEEE Computational Science & Engineering, 1994, 1(1): 19—31.
- [9] 程时清. 低渗透非均质油藏渗流特征及反问题研究[D]. 博士论文. 河北廊坊: 渗流流体力学研究所, 2000.

Sensitivity of Single Phase Flow in Low Permeability Heterogeneous Reservoirs

CHENG Shi_qing¹, ZHANG Shen_zhong², HUANG Yan_zhang², ZHU Wei_yao²

(1. Faculty of Petroleum and Nature Gas, Petroleum University in Beijing,
Changping, Beijing 102249, P R China;

2. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Academia Sinica, Langfang,
Hebei 065007, P R China)

Abstract: Theoretical equations for computing sensitivity coefficients of wellbore pressures to estimate the reservoir parameters in low permeability reservoirs conditioning to non-Darcy flow data at low velocity were obtained. It is shown by a lot of numerical calculations that the wellbore pressures are much more sensitive to permeability very near the well than to permeability a few gridblocks away from the well. When an initial pressure gradient existant sensitivity coefficients in the region are closer to the active well than to the observation well. Sensitivity coefficients of observation well at the line between the active well and the observation well are influenced greatly by the initial pressure gradient.

Key words: non-Darcy flow through porous media; permeability; porosity; sensitivity coefficient; inverse problem; low permeability reservoir