

文章编号: 0253-9985(2007)04-0528-07

边界元理论在缝洞型非均质油藏渗流研究中的应用

张烈辉¹, 李成勇², 刘启国¹, 李 允¹

(1. 西南石油大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都 610500

2. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610500)

摘要: 从渗流力学基本理论出发, 建立了缝洞型非均质油藏直井渗流数学模型。采用 Lord Kelvin 点源解、贝塞尔函数积分和泊松叠加公式等方法求解出了缝洞型非均质油藏直井渗流的边界元基本解, 建立起了缝洞型非均质油藏直井井底压力响应边界元解模型。通过理论计算得到了无因次压力和压力导数与无因次时间双对数理论图版, 并详细分析了井在内区高渗带不同位置和高渗带位于油藏不同方位等情形对井底压力动态的影响。

关键词: 边界元; 非均质油藏; 缝洞型油藏

中图分类号: TE112.1 **文献标识码:** A

Application of boundary element theory to the study of percolation in heterogeneous fractured-vuggy reservoirs

Zhang Liehui¹, Li Chengyong², Liu Qiguo¹, Li Yun¹

(1. State Key Lab of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University,

Chengdu, Sichuan 610500 2. Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610500)

Abstract A mathematic model for describing percolation in vertical well in heterogeneous fractured-vuggy reservoirs was built based on fluid flow mechanics in porous medium. By using Lord Kelvin point source solution, Bassel integration and superimpose formula, boundary element fundamental solutions (BEFS) are derived for percolation in vertical wells in heterogeneous fractured-vuggy reservoirs and a BEFS model of bottom hole pressure in vertical wells in heterogeneous fractured-vuggy reservoirs is also established. Log-log type curves of dimensionless pressures and pressure derivatives vs dimensionless time are plotted through theoretical calculation, and the effects of wells located in different areas of high-permeability zones and high-permeability zones located in different parts of the reservoirs upon the bottom hole pressure behaviors are analyzed in detail.

Key words boundary element; heterogeneity; fractured-vuggy reservoir

缝洞型油藏油气分布受多次成藏、不同后生作用破坏改造和储集空间非均质性等因素影响, 常会造成油气运移聚集差异较大、油藏物性平面分布极其不均匀等状况。常规解析解试井分析理论受模型简化的限制, 一般不能满足该类油藏渗

流问题的求解需要。目前国内外利用边界元理论求解油藏渗流问题还停留在复杂外边界情形, 在非均质油藏渗流理论方面还没有较大的突破。作者在前人研究基础上, 利用边界元理论建立起一整套缝洞型非均质油藏渗流研究的理论体系。

收稿日期: 2007-06-08

第一作者简介: 张烈辉 (1967—), 男, 教授, 博士生导师, 油气藏工程、油气藏数值模拟及试井分析

基金项目: 高等学校优秀青年教师科研奖励计划、教育部博士点基金课题 (20040615004) 联合资助

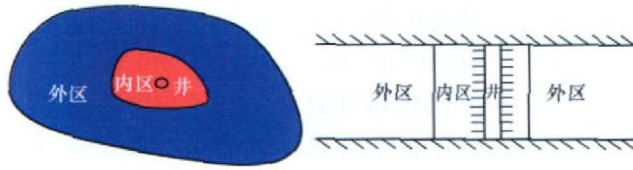


图 1 缝洞型非均质油藏直井示意

Fig. 1 Sketch map of a vertical well in a fractured-vuggy reservoir

1 缝洞型非均质油藏渗流微分方程

采用复合油藏理论模型考虑缝洞型非均质油藏渗流问题, 其简化物理模型如图 1 所示。

缝洞型非均质油藏渗流数学模型由扩散方程、初始条件、内、外边界条件以及界面连接条件组成。其无因次渗流微分方程组为^[1~4]:

内区裂缝:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial p_{DII}}{\partial r_D} \right) - \omega_{11} \frac{\partial p_{DII}}{\partial t_D} - \omega_{21} \frac{\partial p_{DII}}{\partial t_D} + \sum_{i=1}^{N_w} q_{Di} \times \delta(x_D - x_{Di}, y_D - y_{Di}) = (1 - \omega_{11} - \omega_{21}) \frac{\partial p_{DII}}{\partial t_D} \quad (1)$$

内区基岩:

$$\omega_{11} \frac{\partial p_{DII}}{\partial t_D} = \lambda_{11} (p_{DII} - p_{DIII}) \quad (2)$$

内区溶洞:

$$\omega_{21} \frac{\partial p_{DII}}{\partial t_D} = \lambda_{21} (p_{DII} - p_{DIII}) \quad (3)$$

式中: p_{DI} ——无因次压力;

ω_{ji} ——弹性储容比 ($j=1, 2, 3; i=1, 0$);

r_D ——无因次半径;

N_w ——区域内井数, 口;

q_{Di} ——无因次产量;

t_D ——无因次时间;

λ_{ji} ——窜流系数 ($j=1, 2; i=1, 0$);

I——内区;

O——外区。

外区裂缝:

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial p_{DO1}}{\partial r_D} \right) - \omega_{10} \eta_{12} \frac{\partial p_{DO1}}{\partial t_D} - \omega_{20} \eta_{12} \frac{\partial p_{DO2}}{\partial t_D} +$$

$$\sum_{i=1}^{N_w} q_{Di} \delta(x_D - x_{Di}, y_D - y_{Di}) = (1 - \omega_{10} - \omega_{20}) \eta_{12} \frac{\partial p_{DO3}}{\partial t_D} \quad (4)$$

外区基岩:

$$\omega_{10} \eta_{12} \frac{\partial p_{DO1}}{\partial t_D} = \lambda_{10} (p_{DO3} - p_{DO1}) \quad (5)$$

外区溶洞:

$$\omega_{20} \eta_{12} \frac{\partial p_{DO2}}{\partial t_D} = \lambda_{20} (p_{DO3} - p_{DO2}) \quad (6)$$

式中: η_{12} ——区域 1、2 扩散系数比;

δ ——脉冲函数;

x_D —— x 方向无因次距离;

y_D —— y 方向无因次距离。

初始条件:

$$p_{DII} = p_{DIE} = p_{DIB} = p_{DOI} = p_{DO2} = p_{DO3} \quad (t_D = 0) \quad (7)$$

外边界条件:

定压边界:

$$p_{DO3}(x_D, y_D, u) = 0 \quad (x_D, y_D) \in \Gamma_2 \quad (8)$$

封闭边界:

$$\frac{\partial p_{DO3}}{\partial n_D} = 0 \quad (x_D, y_D) \in \Gamma_2 \quad (9)$$

界面连接条件:

$$p_{DO3}(x_D, y_D, u) = p_{DIB}(x_D, y_D, u) \quad (x_D, y_D) \in \Gamma_1 \quad (10)$$

$$\frac{\partial p_{DO3}(x_D, y_D, u)}{\partial n_D} = - \frac{1}{M_{12}} \frac{\partial p_{DIB}(x_D, y_D, u)}{\partial n_D} \quad (x_D, y_D) \in \Gamma_1 \quad (11)$$

井筒内边界条件:

$$C_{D123} \frac{\partial p_{WD}}{\partial t_{D123}} - \frac{\partial p_{D3I}}{\partial r_D} \bigg|_{r_D=1} = 1 \quad (12)$$

$$p_{WD} = \left[p_{D3I} - S \frac{\partial p_{D3I}}{\partial r_D} \right] \bigg|_{r_D=1} \quad (13)$$

无因次半径:

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (14)$$

无因次时间:

$$t_D = \frac{3.6K_3 t}{\mu_w^2 (\phi_1 c_1 + \phi_2 c_2 + \phi_3 c_3)} \quad (15)$$

无因次压力:

$$p_{Dj}(r_D, t_D) = \frac{K_3 h}{1.842 \times 10^{-3} qB \mu} [p_i - p_j(r, t)] \quad (j = 1, 2, 3) \quad (16)$$

无因次井筒储集系数:

$$C_D = \frac{0.159C}{hr_w^2 (\phi_1 c_1 + \phi_2 c_2 + \phi_3 c_3)} \quad (17)$$

区域 1、2 的流度比为:

$$M_{12} = \frac{(K_3/\mu)_1}{(K_3/\mu)_0} \quad (18)$$

区域 1、2 的扩散系数比:

$$\eta_{12} = \frac{(K/\phi\mu c_t)_1}{(K/\phi\mu c_t)_0} \quad (19)$$

弹性储容比:

$$\omega_{ji} = \left| \frac{\phi_j c_j}{\phi_1 c_1 + \phi_2 c_2 + \phi_3 c_3} \right|_i \quad (j = 1, 2, 3; i = 1, 0) \quad (20)$$

窜流系数:

$$\lambda_{ji} = \left| \frac{\alpha K_j r_w^2}{K_3} \right|_i \quad (j = 1, 2; i = 1, 0) \quad (21)$$

式中: 1——基质岩块系统;

2——溶洞系统;

3——裂缝系统;

u ——拉氏空间变量;

Γ_j ——区域边界 ($j = 1, 2$);

$\frac{\partial}{\partial n_D}$ ——外法线向量;

C_D ——无因次井筒储集系数;

r_w ——井筒半径, m;

P_{wD} ——无因次井底流压;

S ——表皮系数;

K_j ——各系统渗透率 ($j = 1, 2, 3$), $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

ϕ_j ——各系统孔隙度 ($j = 1, 2, 3$);

q ——井底流量 (常量), $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;

p ——原始地层压力, MPa;

B ——体积系数, m^3/m^3 ;

c_j ——为各系统压缩系数 ($j = 1, 2, 3$), $1/\text{MPa}$;

μ ——流体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$;

h ——油层厚度, m;

α ——单位换算系数。

利用边界元方法求解渗流微分方程的基本思想就是: 根据积分定理将区域微分方程变成边界积分方程, 然后将边界分割成有限大小的边界单元, 将边界积分方程离散成代数方程, 从而把求解微分方程问题变换成为求解关于节点未知量的代数方程问题。

2 缝洞型非均质油藏边界积分方程

利用 Laplace 理论将缝洞型非均质油藏渗流数学模型进行化简处理, 利用边界元理论获得该简化模型的积分方程, 然后将内、外边界 Γ_1 和 Γ_2 分割成 N_{b1} 和 N_{b2} 个单元段, 假设单元内的压力按线性规律分布, 则边界 Γ 分割后缝洞型非均质油藏渗流微分方程的边界积分方程可以表示为^[5~16]:

内区:

$$\theta_k \bar{P}_{D1}(Q_k, u) = \sum_{i=1}^{N_{b1}} \int_{\Gamma_i} G_1(P', Q_k, u) \frac{\partial \bar{P}_{D1}(P', u)}{\partial n} - \bar{P}_{D1}(P', u) \frac{\partial G_1(P', Q_k, u)}{\partial n} \bigg|_{\Gamma_i} d\Gamma_i(P') + \frac{1}{u} \sum_{i=1}^{N_w} q_{Di} G_1(P, Q_k, u) \quad (22)$$

外区:

$$\theta_k \bar{P}_{D0}(Q_k, u) = \sum_{i=1}^{N_{b2}} \int_{\Gamma_i} G_0(P', Q_k, u) \frac{\partial \bar{P}_{D0}(P', u)}{\partial n} - \bar{P}_{D0}(P', u) \frac{\partial G_0(P', Q_k, u)}{\partial n} \bigg|_{\Gamma_i} d\Gamma_i(P') + \frac{M_{12}}{u} \sum_{i=1}^{N_w} q_{Di} G_0(P, Q_k, u) \quad (23)$$

式中: p_{Dj} ——拉氏空间无因次压力;

θ_k ——边界节点奇异点函数;

P', Q_k ——边界上的离散节点;

G ——边界元基本解;

M_{12} ——区域 1、2 的流度比。

由于函数 P_D 在单元段内按线性规律变化, 利用线性插值公式可以得到缝洞型非均质油藏的边

界元积分方程的简化表达式:

内区:

$$\begin{aligned} \theta_k P_{DI}(Q_k, u) = & \sum_{i=1}^{N_{b1}} \left[H'_{k1i} \frac{\partial P_{DI}}{\partial n} + H'_{k2i} \frac{\partial P_{DI+1}}{\partial n} + \right. \\ & \left. H'_{k3i} P_{DI} + H'_{k4i} P_{DI+1} \right] + \frac{1}{u} \sum_{i=1}^{N_{w1}} q_{Di} G_1(P', Q, u) \end{aligned} \quad (24)$$

外区:

$$\begin{aligned} \theta_k P_{DO}(Q_k, u) = & \sum_{i=1}^{N_{b2}} \left[H'_{k01i} \frac{\partial P_{DOi}}{\partial n} + H'_{k02i} \frac{\partial P_{DOi+1}}{\partial n} + \right. \\ & \left. H'_{k03i} P_{DOi} + H'_{k04i} P_{DOi+1} \right] + \frac{M_{12}}{u} \sum_{i=1}^{N_w} q_{Di} G_0(P', Q, u) \end{aligned} \quad (25)$$

其中:

$$H'_{i1} = \frac{l_i}{2} \int_{-1}^1 \oint_i(P', Q_k, u) \delta_1(\xi) d\xi \quad (26)$$

$$H'_{i2} = \frac{l_i}{2} \int_{-1}^1 \oint_i(P', Q_k, u) \delta_2(\xi) d\xi \quad (27)$$

$$H'_{i3} = \frac{l_i}{2} \int_{-1}^1 \frac{\partial G_i(P', Q_k, u)}{\partial n} \delta_1(\xi) d\xi \quad (28)$$

$$H'_{i4} = \frac{l_i}{2} \int_{-1}^1 \frac{\partial G_i(P', Q_k, u)}{\partial n} \delta_2(\xi) d\xi \quad (29)$$

式中: H' ——自定义函数;

α ——单位换算系数;

δ ——单元段插值函数。

3 缝洞型非均质油藏边界积分方程的求解

通过对缝洞型非均质油藏渗流方程的边界元积分方程(24-25)分析不难发现: 在内区将边界分成 N_{b1} 个节点, 每个边界元节点上有两个未知参数 $\left[\frac{\partial P_{Di}}{\partial n} \right]$ 和 P_{Di} , 利用内区边界积分方程可以建立 N_{b1} 个代数方程。在外区将边界分成 N_{b2} 个节点, 由于边界条件已知, 每个边界元节点上有一个未知参数 $\left[\frac{\partial P_{Di}}{\partial n} \right]$ 或 P_{Di} , 利用内、外区边界积分方程可以建立 $N_{b1} + N_{b2}$ 个代数方程。利用界面连接条件, 通过内、外区方程组的联立求解可以得到 $2N_{b1} + N_{b2}$ 个代数方程组, 而方程组刚好有 $2N_{b1} + N_{b2}$ 个未知变量, 因此通过该方程组可以得到内、外区边界上未知变量的值。其代数矩阵方程可以为:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n_{b1}} & a_{1n_{b1}+1} & a_{1n_{b1}+2} & \cdots & a_{1n_{b1}+n_{b1}} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n_{b1}} & a_{2n_{b1}+1} & a_{2n_{b1}+2} & \cdots & a_{2n_{b1}+n_{b1}} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n_{b1}1} & a_{n_{b1}2} & \cdots & a_{n_{b1}n_{b1}} & a_{n_{b1}n_{b1}+1} & a_{n_{b1}n_{b1}+2} & \cdots & a_{n_{b1}n_{b1}+n_{b1}} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n_{b1}} & b_{1n_{b1}+1} & b_{1n_{b1}+2} & \cdots & b_{1n_{b1}+n_{b1}} & b_{1n_{b1}+n_{b1}+1} & b_{1n_{b1}+n_{b1}+2} & \cdots & b_{1n_{b1}+n_{b1}+n_{b1}} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n_{b1}} & b_{2n_{b1}+1} & b_{2n_{b1}+2} & \cdots & b_{2n_{b1}+n_{b1}} & b_{2n_{b1}+n_{b1}+1} & b_{2n_{b1}+n_{b1}+2} & \cdots & b_{2n_{b1}+n_{b1}+n_{b1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n_{b1}1} & b_{n_{b1}2} & \cdots & b_{n_{b1}n_{b1}} & b_{n_{b1}n_{b1}+1} & b_{n_{b1}n_{b1}+2} & \cdots & b_{n_{b1}n_{b1}+n_{b1}} & b_{n_{b1}n_{b1}+n_{b1}+1} & b_{n_{b1}n_{b1}+n_{b1}+2} & \cdots & b_{n_{b1}n_{b1}+n_{b1}+n_{b1}} \\ b_{n_{b1}+11} & b_{n_{b1}+12} & \cdots & b_{n_{b1}+1n_{b1}} & b_{n_{b1}+1n_{b1}+1} & b_{n_{b1}+1n_{b1}+2} & \cdots & b_{n_{b1}+1n_{b1}+n_{b1}} & b_{n_{b1}+1n_{b1}+n_{b1}+1} & b_{n_{b1}+1n_{b1}+n_{b1}+2} & \cdots & b_{n_{b1}+1n_{b1}+n_{b1}+n_{b1}} \\ b_{n_{b1}+21} & b_{n_{b1}+22} & \cdots & b_{n_{b1}+2n_{b1}} & b_{n_{b1}+2n_{b1}+1} & b_{n_{b1}+2n_{b1}+2} & \cdots & b_{n_{b1}+2n_{b1}+n_{b1}} & b_{n_{b1}+2n_{b1}+n_{b1}+1} & b_{n_{b1}+2n_{b1}+n_{b1}+2} & \cdots & b_{n_{b1}+2n_{b1}+n_{b1}+n_{b1}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n_{b1}+n_{b1}1} & b_{n_{b1}+n_{b1}2} & \cdots & b_{n_{b1}+n_{b1}n_{b1}} & b_{n_{b1}+n_{b1}n_{b1}+1} & b_{n_{b1}+n_{b1}n_{b1}+2} & \cdots & b_{n_{b1}+n_{b1}n_{b1}+n_{b1}} & b_{n_{b1}+n_{b1}n_{b1}+n_{b1}+1} & b_{n_{b1}+n_{b1}n_{b1}+n_{b1}+2} & \cdots & b_{n_{b1}+n_{b1}n_{b1}+n_{b1}+n_{b1}} \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{vmatrix} P_{D1} \\ P_{D2} \\ \vdots \\ P_{Dn} \\ \frac{\partial P_{D1}}{\partial n} \\ \frac{\partial P_{D2}}{\partial n} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_{Dn}}{\partial n} \\ \frac{\partial P_{Dn+1}}{\partial n} \text{ 或 } P_{Dn+1} \\ \frac{\partial P_{Dn+2}}{\partial n} \text{ 或 } P_{Dn+2} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_{Dn+n}}{\partial n} \text{ 或 } P_{Dn+n} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ \vdots \\ F_{1n_{b1}} \\ F_{21} \\ F_{22} \\ \vdots \\ F_{2n_{b1}} \\ F_{2n_{b1}+1} \\ F_{2n_{b1}+2} \\ \vdots \\ F_{2n_{b1}+n_{b2}} \end{vmatrix} \quad (30)$$

式中: a_{ij} , b_{ij} , F_j ——矩阵向量。

当计算出边界元各节点的属性值后, 其任意点的压力值可以由下式 (31~32) 表示出来:

$$\begin{aligned} P_{D1}(Q_k, u) = & \sum_{i=1}^{N_{b1}} \left[H'_{k1i} \frac{\partial P_{D1i}}{\partial n} + H'_{k2i} \frac{\partial P_{D1i+1}}{\partial n} + \right. \\ & \left. H'_{k3i} P_{D1i} + H'_{k4i} P_{D1i+1} \right] + \frac{1}{u} \sum_{i=1}^{N_{w1}} q_{Di} G_1(P', Q, u) \end{aligned} \quad (31)$$

内区:

$$\begin{aligned} P_{D0}(Q_k, u) = & \sum_{i=1}^{N_{b2}} \left[H'_{k01i} \frac{\partial P_{D0i}}{\partial n} + H'_{k02i} \frac{\partial P_{D0i+1}}{\partial n} + \right. \\ & \left. H'_{k03i} P_{D0i} + H'_{k04i} P_{D0i+1} \right] + \frac{M_{12}}{u} \sum_{i=1}^{N_{w2}} q_{Di} G_0(P', Q, u) \end{aligned} \quad (32)$$

4 缝洞型非均质油藏直井井底压力响应与影响因素分析

根据 Lord Kelvin 点源解和边界元积分方程的推导, 可以得到缝洞型非均质油藏直井的边界元基本解为:

内区:

$$G_1(P', Q, u) = K_0 [r_D(P', Q) \sqrt{uf_1(u)}] \quad (33)$$

$$\frac{\partial G_1(P', Q, u)}{\partial n} = - \sqrt{uf_1(u)} K_1(r_D) \sqrt{uf_1(u)} \frac{\partial r_D}{\partial n} \quad (34)$$

外区:

$$G_0(P', Q, u) = K_0 [r_D(P', Q) \sqrt{uf_2(u)} \Pi_{12}] \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial G_2(P', Q, u)}{\partial n} = & - \sqrt{uf_2(u)} \Pi_{12} \times \\ & K_1(r_D) \sqrt{uf_2(u)} \Pi_{12} \frac{\partial r_D}{\partial n} \end{aligned} \quad (36)$$

$$\frac{\partial r_D}{\partial n} = \frac{h_{Di}}{r_{D\xi}} \quad (37)$$

式中:

$$r_{D\xi} = \sqrt{(x_\xi - x_i)^2 + (y_\xi - y_i)^2} \quad (38)$$

$$|h_{Di}| = \left| \frac{(x_\xi - x)(y_i - y_{i+1}) - (y_\xi - y)(x_i - x_{i+1})}{\sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}} \right| \quad (39)$$

将格林函数基本解 (33~34~35~36) 带入矩阵方程, 求解边界上各节点变量值, 然后将其带入内区压力计算公式 (31), 利用杜哈美叠加原理、Stehfest 数值反演公式和格林边界元计算理论可以获得实空间井底压力响应曲线; 并绘制出缝洞型非均质油藏的压力和压力导数双对数曲线 (图 2)。从图中可以发现: 缝洞型非均质油藏直井井底压

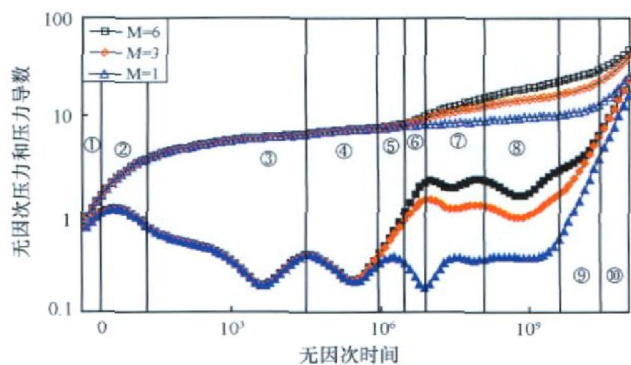


图2 流度比对缝洞型非均质油藏井底压力动态的影响

Fig. 2 The influences of mobility ratio on bottom hole pressure behaviors in wells in heterogeneous fractured-vuggy reservoirs

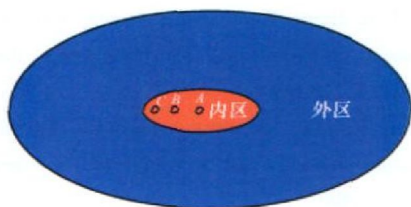


图3 井位于高渗带不同位置情形示意

3 Locations in different parts of high-permeability zones

力响应可能存在明显的十个流动阶段: ①纯井筒储存阶段; ④过渡段; ④内区溶洞-裂缝系统拟稳态窜流阶段; ④内区基岩-溶洞系统拟稳态窜流阶段; ④内区径向流动阶段; ④内区到外区流动的过渡阶段; ⑧外区溶洞-裂缝系统拟稳态窜流阶段; ⑧外区基岩-溶洞系统拟稳态窜流阶段; ⑩总系统作用阶段; ⑩封闭边界反映阶段。

利用非均质油藏渗流边界元解模型, 设计了3种情形 (井位于内区高渗带长轴 $x_D = 0$, $x_D = -500$, $x_D = -950$) 来研究井位于高渗带不同位置时对非均质油藏 (图3 内区高渗带为椭圆型长轴 $L_D = 1000$, 短轴 $W_D = 500$) 直井井底压力动态的影响。为便于观测关键因素对双对数曲线的影响, 弱化了缝洞型油藏的三重介质特征。

将上述3种情形分别带入边界元计算模型中进行求解, 得到井位于油藏高渗带不同位置情形下压力和压力导数双对数曲线对比 (图4)。从图中可以看出, 井位于油藏高渗带中心时, 井到内外区界面的距离大致相当, 内区径向流持续时间最长, 过渡段出现的时间最晚。当位于高渗带边部位置时, 由于油藏外区的快速影响, 压力导数曲线上翘的时间提前, 压力曲线上翘的幅度增大。

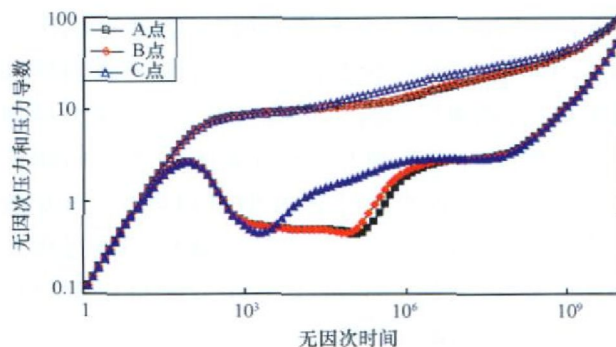


图4 井位于高渗带不同位置对井底压力动态的影响

Fig. 4 The influences of well locations in different parts of high-permeability zones on bottom hole pressure behaviors

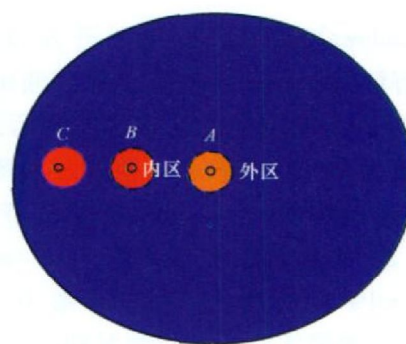


图5 高渗带位于油藏不同位置情形示意

Fig. 5 Sketch map showing high-permeability zones located in different parts of reservoirs

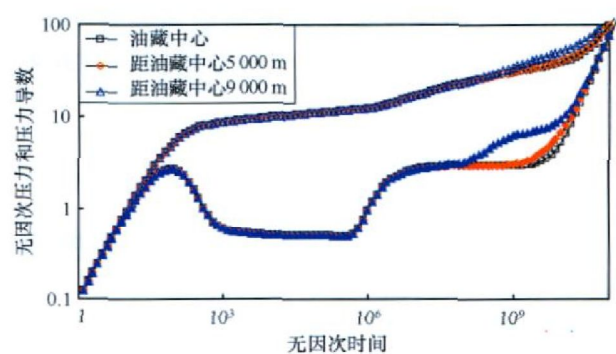


图6 高渗带位于油藏不同位置对井底压力动态的影响

Fig. 6 The influence of high-permeability zones located in different parts of reservoirs on bottom hole pressure behaviors

利用边界元方法解决高渗带在非均质油藏不同位置时对井底压力动态的影响, 本文设计了3种情形 (内区高渗带距油藏中心位置分别为: $x_D = 0$, $x_D = -50000$, $x_D = -95000$) 来研究内区高渗带在油藏不同位置对井底压力动态的影响。

利用边界元计算模型对上述3种情形分别进行求解, 得到高渗带位于油藏不同位置情形的压力和压力导数双对数曲线对比 (图6)。从图中可

以看出,当压力波在高渗带传播时,各情形的压力和压力导数曲线完全重合;当压力波传播到外部低渗带后,高渗带越接近油藏边界位置,压力导数曲线上抬的时间就越早,无因次压力增加的幅度就越大。从前面两个计算模型可以看出:双对数对比图描述的压力波在非均质油藏中传播过程与实际过程是一致的,因此边界元方法可以解决此类油藏的直井渗流问题。

4 应用实例

在理论研究成果的基础上,利用 Visual C++ 6.0 在 Windows2000/XP 环境下开发成功 Well Test 试井解释软件。 $\times \times$ 井位于塔河油田 7 区牧场北 3 号构造。缝洞系统在该区发育程度不同,造成油藏平面非均质性较强。该井及油藏基本数据如下:井半径 0.074 6 m;油层厚度 63.5 m;孔隙度 0.015;原油体积系数 1.088 8 m^3/m^3 ;粘度 0.143 72 $\text{mPa} \cdot \text{s}$;综合压缩系数 0.042 466 MPa^{-1} 。结合油藏实际的地质情况和钻井、试油资料选用定井筒和表皮效应利用缝洞型非均质油藏边界元模型对该井实测压力资料进行解释,其拟合效果较好(如图 7)。通过对塔河油田实测试井资料的解释,加深了该井组油藏缝洞发育单元地质模型的认识,并验证了本文理论模型的正确性。

5 结论

1) 利用边界元理论和复合油藏模型思想可以解决缝洞型非均质油藏直井渗流问题。

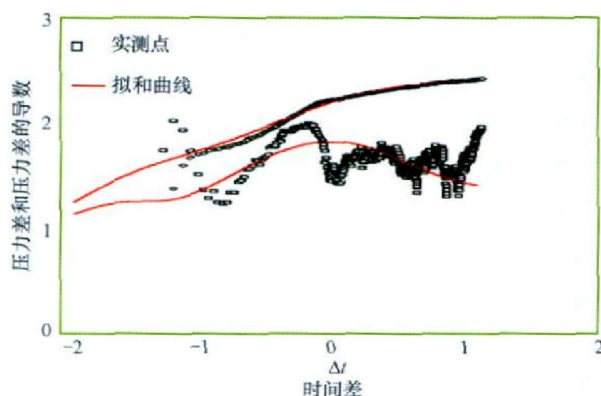


图 7 $\times \times$ 井双对数检验拟合图

Fig. 7 Pressure and pressure derivate log-log fitting plot of a well

2) 井位于缝洞型非均质油藏中高渗带不同位置,对井底压力动态响应的影响主要体现在内区压力导数曲线形态上。

3) 高渗带位于缝洞型非均质油藏不同位置,对井底压力动态响应的影响主要体现在外区压力导数曲线形态上。

参 考 文 献

- 1 Aral M. M, Tang Y. A new boundary element formulation for time dependent confined and unconfined aquifer problems [J]. Water Resources Research, 1988, 24(6), 831-842
- 2 D. T. Nurnberg An improved streamline generating technique using the boundary (integral) element method [J]. SPE, 1986, 15, 135
- 3 K. Satq R. N. Home Perturbation boundary element method for heterogeneous reservoirs part 1—steady-state flow problems [J]. SPE, 1992, 25, 299
- 4 K. Satq R. N. Home Perturbation boundary element method for heterogeneous reservoirs part 2—transient flow problems [J]. SPE, 1992, 25, 300
- 5 Kikani J., R. N. Home Application of boundary element method to reservoir engineering problems [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1989, 229-241
- 6 Kikani J., R. N. Home Pressure-transient analysis of arbitrarily shaped reservoirs with the boundary element method [J]. SPE, 1992, 53-60
- 7 杨坚,姚军.三重介质复合油藏压力特征研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(4): 418-425
- 8 张望月,曾萍.含局部不渗透区的油藏不稳定压力分析——边界元方法 [J]. 石油学报, 1993, 14(3): 68-74
- 9 曾萍,张望月,赵凤兴.用边界元方法进行探边试井分析 [J]. 江汉石油学院学报, 1993, 15(4): 102-104
- 10 刘希云,赵润祥.流体力学中的有限元与边界元方法 [M]. 上海:上海交通大学出版社, 1993, 123-138
- 11 刘启国,李晓平,吴小庆.用边界元法分析复杂形状油藏不稳定压力动态 [J]. 西南石油学院学报, 2001, 23(2): 40-43
- 12 程时清,陈平中.利用试井压力描述储层非均质性 [J]. 石油与天然气地质, 1995, 16, 285-289
- 13 付维署,何顺利,冉盈志,等.多区不等厚横向非均质复合气藏试井分析模型及压力特征 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27, 124-130
- 14 赵子刚,姚力,马水龙.天然气在复杂气藏内渗流问题的新模型及应用 [J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(6): 21-24
- 15 李明娟,张永贵,邻兴威,等.塔河南部地区碳酸盐岩油气预测技术研究 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(4): 536-541
- 16 郑祥克,何顺利,李远钦.新场蓬莱镇异常高压气藏气体单相渗流实验特征 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(1): 88-91