

文章编号: 1000-0747(2004)01-0091-03

# 非均质性对水平井产能的影响

郭肖<sup>1,2</sup>, 杜志敏<sup>1,2</sup>

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室; 2. 西南石油学院)

**摘要:** 基于 Joshi 等的假设, 将水平井的三维流动问题变换为 2 个相互联系的二维流动问题, 通过保角变换求解。将非均质储集层的水平渗透率和垂直渗透率按几何平均、算术平均和调和平均方法分别处理, 根据电模拟原理, 建立了 9 种非均质储集层水平井产能计算模型, 评价非均质性对水平井产能的影响。评价结果, 非均质性越强、储集层厚度越大产能越低, 但厚度超过一定界限时产能降低不再明显; 用算术平均方法处理渗透率建立的模型会低估非均质性对产能的影响; 用几何平均和调和平均方法处理渗透率建立的模型评价, 薄油层非均质性越强, 产能越高。图 1 参 9

**关键词:** 非均质性; 水平井产能; 模型; 保角变换

中图分类号: TE355.6 文献标识码: A

## 0 引言

水平井在许多油气田开采中已被广泛应用, 尤其对一些特殊储集层更为有效。这些特殊储集层的非均质性往往较强, 不同程度地影响水平井产能, 以致预测水平井产能变得困难<sup>[1,2]</sup>。Muskat<sup>[3]</sup>首次通过修正垂轴的方法, 将平面与垂向渗透率的几何平均值作为油层平均渗透率; Joshi<sup>[4,5]</sup>推导了典型的非均质储集层水平井稳态产能公式; Renard 和 Dupuy<sup>[6]</sup>也提出非均质油层水平井产能公式; 龚宏恩<sup>[7]</sup>通过实例分析, 指出 Joshi 公式计算值与实际值相差太大, 并验证了将  $K_v$  与  $K_h$  的几何平均值作为油层有效渗透率可以减少误差。

Joshi 等假定, 水平井的流动由水平面与垂直面两个平面流动叠加而成, 可以将 1 个三维流动问题变成 2 个相互联系的二维流动问题。本文基于该假设, 通过纵向坐标变换, 对渗透率参数取不同值, 建立了 9 种非均质性储集层水平井产能公式模型, 研究不同情况下储集层非均质性对水平井产能的影响。

## 1 非均质性储集层水平井产能

假定有 1 口水平井位于水平、等厚且底部、顶部存在封闭边界的油层中部。引入保角变换, 得到水平井在水平平面和垂直平面的流量分别为<sup>[8,9]</sup>:

$$Q_h = 2\pi K_h \frac{\Delta p}{\mu B_o \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2}} \quad (1)$$

$$Q_v = \frac{2\pi K_L}{\mu} \frac{\Delta p}{\ln[h/(2\pi r)]} \quad (2)$$

非均质情况下的稳态流渗流方程为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{K_v}{K_h} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

引入  $z' = z \sqrt{K_h/K_v}$ , 则将 (3) 式转化为均质问题:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z'^2} = 0 \quad (4)$$

用  $h \sqrt{K_h/K_v}$  代替 (1) 式和 (2) 式中的  $h$ , 并且记  $\beta = \sqrt{K_h/K_v}$ , 则水平面和垂直面液流阻力变为:

$$\Omega_h = \frac{\mu B_o}{2\pi K h \beta} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} \quad (5)$$

$$\Omega_v = \frac{\mu B_o}{2\pi K L} \ln \frac{2h\beta}{\pi r_w} \quad (6)$$

将渗透率分别用几何平均、算术平均和调和平均方法处理:

几何平均  $K = \sqrt{K_h K_v}$

算术平均  $K = (K_h + K_v)/2$

调和平均  $K = 2K_h K_v / (K_h + K_v)$

用几何平均值代替 (5) 和 (6) 式中的  $K$ , 再根据电模拟概念原理, 得到非均质储集层水平井产能的模型一:

$$J_1 = \frac{2\pi K_h h}{\mu B_o \left[ \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \beta \frac{h}{L} \ln \frac{\beta h}{2\pi r_w} \right]} \quad (7)$$

用几何平均值代替 (6) 式的  $K$ , 而 (5) 式中的  $K$  取为  $K_h$ , 得到模型二:

$$J_2 = \frac{2\pi K_h h}{\mu B_o \left[ \frac{1}{\beta} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \beta \frac{h}{L} \ln \frac{\beta h}{2\pi r_w} \right]} \quad (8)$$

用几何平均值代替 (5) 式的  $K$ , 而 (6) 式中的  $K$  取为  $K_v$ , 得到模型三:

$$J_3 = \frac{2\pi K_h h}{\mu B_o \left[ \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \beta \frac{h}{L} \ln \frac{\beta h}{2\pi r_w} \right]} \quad (9)$$

按以上顺序, 分别对算术平均和调和平均情况处理, 依次得到模型四至模型九:

$$J_4 = \frac{\pi (K_h + K_v) h}{\mu B_o \left[ \frac{1}{\beta} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{h}{L} \ln \frac{\beta h}{2\pi r_w} \right]} \quad (10)$$

$$J_5 = \frac{\pi (K_h + K_v) h}{\mu B_o \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\beta} + 1 \right) \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{h}{L} \ln \frac{\beta h}{2\pi r_w} \right]} \quad (11)$$

$$J_6 = \frac{\pi (K_h + K_v) h}{\mu B_o \left[ \frac{1}{\beta} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{1 + \beta}{2} \frac{h}{L} \ln \frac{\beta h}{2\pi r_w} \right]} \quad (12)$$

$$J_7 = \frac{2\pi K_h h}{\mu B_o \left[ \frac{\beta + 1/\beta}{2} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{1 + \beta}{2} \frac{h}{L} \ln \frac{\beta h}{2\pi r_w} \right]} \quad (13)$$

$$J_8 = \frac{2\pi K_h h}{\mu B_o \left[ \frac{1}{\beta} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{1 + \beta}{2} \frac{h}{L} \ln \frac{\beta h}{2\pi r_w} \right]} \quad (14)$$

$$J_9 = \frac{2\pi K_h h}{\mu B_o \left[ \frac{\beta + 1/\beta}{2} \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \beta \frac{h}{L} \ln \frac{\beta h}{2\pi r_w} \right]} \quad (15)$$

## 2 非均质性对水平井产能的影响

水平井产能公式为:

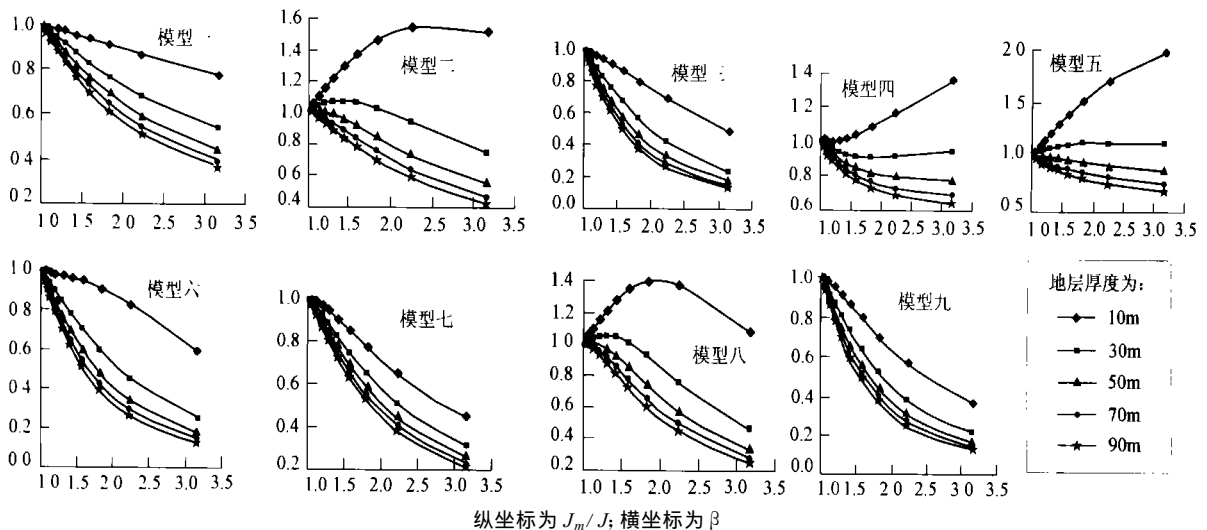
$$J = \frac{2\pi K_h h}{\mu B_o \left[ \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - (L/2)^2}}{L/2} + \frac{h}{L} \ln \frac{h}{2\pi r_w} \right]} \quad (16)$$

针对以上9种模型, 取  $r_e$  为 500m,  $r_w$  为 0.11m,  $L$  为 100m, 在  $h$  为 10m、30m、50m、70m 和 90m 的情况下, 分别作  $J_m/J$  ( $m=1, 2, 3, \dots, 9$ ) 与  $\beta$  的曲线(见图1)。由图1可见:  $\beta$  值大于 1 时, 非均质性越强, 储集层厚度越大, 则水平井产能越低, 当厚度超过一定界限, 产能降低变得不明显。对于将渗透率进行算术平均处理所建立的模型, 非均质性对水平井产能影响较小, 可能会低估非均质性对水平井产能影响的作用; 对于用几何平均和调和平均方法将渗透率处理为垂直面液流阻力项的渗透率所建立的模型, 在薄油层情况下, 非均质性对水平井产能影响会出现明显的峰值。

## 3 实例分析

文献[8]提供的水平井基本数据为:  $L=309m$ ,  $h=14m$ ,  $r_w=0.061m$ ,  $r_{ch}=239.4m$ ,  $\mu_o=3mPa \cdot s$ ,  $B_o=1.13$ ,  $K_h=1.3 \times 10^{-3} \mu m^2$ ,  $K_v=0.04 \times 10^{-3} \mu m^2$ ,  $p_e=17.33MPa$ ,  $p_w=4MPa$ 。

将以上实例数据分别代入(7)~(15)式(单位转换时注意公式前面乘以系数 0.5429), 计算得到的日产油量, (7)式(模型一)为  $13.48m^3$ , (8)式(模型二)为  $24.01m^3$ , (9)式(模型三)为  $4.21m^3$ , (10)式(模型四)为  $44.26m^3$ , (11)式(模型五)为  $112.17m^3$ , (12)式(模



纵坐标为  $J_m/J$ ; 横坐标为  $\beta$

图1  $J_m/J$  与  $\beta$  关系曲线

型六)为  $4.59\text{m}^3$ , (13)式(模型七)为  $5.13\text{m}^3$ , (14)式(模型八)为  $8.913\text{m}^3$ , (15)式(模型九)为  $3.38\text{m}^3$ ,  $\beta=1$  时为  $29.16\text{m}^3$ , 实际值为  $23.59\text{m}^3$ 。

对比计算结果可见:在上述参数情况下,模型二预测的产量最接近实际值;模型四和模型五预测的产量偏大;模型七和模型八预测的产量偏小;无论是用几何平均、算术平均还是调和平均方法处理渗透率,仅处理水平平面液流阻力项的渗透率所建立模型的预测结果均偏小。造成以上结果的原因在于,水平和垂向渗透率存在如下关系:

$$\frac{K_h + K_v}{2} \geq \sqrt{K_h K_v} \geq \frac{2K_h K_v}{K_h + K_v} \quad (17)$$

#### 4 结论和建议

根据渗透率取值的不同,可以建立多种非均质性储集层水平井产能模型。 $\beta$ 值大于1时,非均质性越强,储集层厚度越大,则水平井产能越低,当厚度超过一定限时,产能降低变得不明显;所建立的模型四和模型五会低估非均质性对水平井产能影响作用;而模型二和模型六非均质性对水平井产能影响会出现明显的峰值;实际应用中,建议通过拟合选取适宜的模式。

符号注释:

$a, b$ ——泄油椭圆长、短半轴,  $m$ ;  $x, y, z$ ——笛卡儿坐标三个轴方向;  $L$ ——水平井长度,  $m$ ;  $h$ ——油层厚度,  $m$ ;  $K$ ——渗透率,  $\mu\text{m}^2$ ;  $Q$ ——流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $\mu$ ——原油黏度,  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ;  $B_o$ ——原油体积系数;  $r_w$ ——井筒半径,  $m$ ;  $r_{eh}$ ——水平井泄油半径,  $m$ ;  $J$ ——产能,  $\text{m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$ ;  $p$ ——压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_w$ ——供给压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_e$ ——井底流压,  $\text{MPa}$ ;  $\Delta p$ ——压差,  $\text{MPa}$ ;  $\Omega$ ——液流阻力,  $\text{MPa}\cdot\text{d}/\text{m}^3$ 。下标:  $h$ ——水平平面;  $v$ ——垂直平面。

参考文献:

- [1] 王宏. 水平井: 成功与失败[J]. 世界石油科学, 1995, 69(4): 61-64.
- [2] Aziz K, Arbabi S, Deutsch C V. Why is it so difficult to predict the performance of horizontal wells [J]. JCIPT, 1999, 38(10): 37-45.
- [3] Muskat M. The flow of homogeneous fluids through a porous media [Z]. International Human Resources Development Corp., Boston, 1982. 225-227.

- [4] Joshi S D. Augmentation of well production with slant and horizontal wells [A]. SPE 15375. 1988.
- [5] Joshi S D. Horizontal and multi-lateral wells: performance analysis—an art or a science [A]. JPT, October 2000.
- [6] Renard G L, Dupuy J M. Influence of formation damage on the flow efficiency of horizontal wells [A]. SPE 19414. 1990.
- [7] 龚宏恩. 预测水平井产能的一种新方法[J]. 石油钻采工艺, 1996, (1): 76-81.
- [8] 郭肖, 陈路原, 杜志敏. 关于 Joshi 水平井产能公式的讨论[J]. 西南石油学院学报, 2003, 4(2): 41-43.
- [9] 李曼, 王卫红, 王爱华. 水平井产量公式分析[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(5): 76-79.

第一作者简介: 郭肖(1972-), 男, 陕西咸阳人, 博士, 西南石油学院副教授, 主要从事油气藏工程、数值模拟等教学和研究工作。地址: 四川省南充市, 西南石油学院石油工程学院, 邮政编码: 637001. E-mail: guoxiao@swpi.edu.cn

收稿日期: 2002-06-03 修回日期: 2003-07-17

(编辑、绘图 郭海莉)

### Impacts of permeability heterogeneity on horizontal well productivity

GUO Xiao<sup>1,2</sup>, DU Zhi-min<sup>1,2</sup> (1. The State Key Lab of Oil/ Gas Reservoir Geology and Exploitation, Sichuan 637001, China; 2. Southwest Petroleum Institute, Sichuan 637001, China)

**Abstract:** Based on Joshi et al's assumption, a 3-D drainage problem was reduced to two 2-D solution problems the 9 productivity formulae for horizontal wells in heterogeneous reservoirs is presented by using geometric arithmetic and harmonic average to modify the horizontal and vertical permeability in the mapped equations. The impacts of permeability heterogeneity on the productivity of horizontal wells were analyzed. The results show that horizontal well productivity generally decreases with increase in the ratio of horizontal to vertical permeability and reservoir thickness. However, its impact on horizontal well productivity is not very efficient if the reservoir thickness exceeds a certain limit. Furthermore, oil production is usually under-predicted by the model developed by arithmetic average and the models of vertical permeability modified by geometric and harmonic average can explain why horizontal well productivity increases apparently with increase in the ratio of horizontal to vertical permeability in thin oil formation.

**Key words:** heterogeneity; horizontal well productivity; model conformal transformation