

## 低渗变形介质油藏污染井酸化增产规律分析

王厉强<sup>1</sup> 王洪辉<sup>1</sup> 寇秀玲<sup>2</sup> 代翔<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川成都 610059; 2. 中国石油新疆油田分公司重油公司, 新疆克拉玛依 834000; 3. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000)

**摘要:** 基于低渗非达西渗流和变形介质渗流理论, 推导了污染井酸化前后的产能预测模型和井底压力损失表达式, 定义了低渗变形介质油藏污染井酸化前后的表皮因子, 并对污染井酸化前后的产能变化规律进行了研究。结果表明, 低渗透油藏随着储层应力敏感效应和启动压力梯度的增大, 产能明显降低, 增大生产压差有利于克服其不利影响; 酸化半径内启动压力梯度的改变对表皮因子的改善有重要影响, 改变幅度越大对表皮因子的改善越有效。

**关键词:** 低渗透油气藏; 变形; 启动压力; 压力梯度; 地层损害; 酸化半径

中图分类号: TE357.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890 (2006) 05-0073-03

油藏生产过程中储层应力敏感效应<sup>[1-5]</sup>导致储层骨架的变形和渗透率、孔隙度的降低。低渗透油藏中即使渗透率和孔隙度降低幅度不大, 但因原始渗透率和孔隙度很低, 仍对渗流规律产生较大影响。目前在研究渗流规律时大都假定渗透率为常数, 这与实际相差较大<sup>[6-7]</sup>。因此对低渗透油藏进行酸化增产规律分析时, 除考虑启动压力梯度之外, 也不应忽视储层应力敏感效应的影响。另一方面, 钻井及完井作业引起的储层伤害对低渗透储层产能影响很大, 忽略污染影响的酸化增产模型显然会产生较大的误差, 因此也必须考虑污染对油井酸化后产能的影响。

## 1 低渗变形介质污染井产能模型

试验研究表明, 渗透率随压力呈指数关系变化<sup>[8]</sup>, 即:

$$\frac{K_c}{K} = e^{-\alpha_k(p_e - p)} \quad (1)$$

变形介质平面稳定渗流产量公式为<sup>[5]</sup>:

$$Q = \frac{2\pi K h}{\mu} \frac{1 - \exp[-\alpha_k(p_e - p_{wf})]}{\alpha_k \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (2)$$

考虑启动压力梯度的低渗变形介质平面稳定渗流产量公式为:

$$Q = \frac{2\pi K h}{\mu} \frac{1 - \exp\{ -\alpha_k[(p_e - p_{wf}) - G_0(r_e - r_w)] \}}{\alpha_k \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (3)$$

设污染区半径为  $r_d$ , 渗透率为  $K_d$ , 则未污染区 ( $r_e \rightarrow r_d$ ) 和污染区 ( $r_d \rightarrow r_w$ ) 的产量  $Q_1$ 、 $Q_2$  均满足

式(3)。由流体流动连续性 (即  $Q_1 = Q_2 = Q$ ) 可解得油层伤害后油井产量为:

$$Q = \frac{2\pi h}{\mu \alpha_k \left( \frac{1}{K} \ln \frac{r_e}{r_d} + \frac{1}{K_d} \ln \frac{r_d}{r_w} \right)} \{ 2 - \exp\{ -\alpha_k[(p_e - p_d) - G_0(r_e - r_d)] \} - \exp\{ -\alpha_k[(p_d - p_{wf}) - G_0(r_d - r_w)] \} \} \quad (4)$$

$$\text{令 } \bar{K} = \frac{\ln(r_e/r_w)}{\frac{1}{K_d} \ln \frac{r_d}{r_w} + \frac{1}{K} \ln \frac{r_e}{r_d}}, \text{ 则式(4)变为:} \\ Q = \frac{2\pi \bar{K} h}{\mu \alpha_k \ln(r_e/r_w)} \{ 2 - \exp\{ -\alpha_k[(p_e - p_d) - G_0(r_e - r_d)] \} - \exp\{ -\alpha_k[(p_d - p_{wf}) - G_0(r_d - r_w)] \} \} \quad (5)$$

将式(3)、(5)中  $e^x$  部分进行一阶泰勒展开, 并舍去高阶项得:

$$Q = \frac{2\pi K h}{\mu} \frac{(p_e - p'_{wf}) - G_0(r_e - r_w)}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (6)$$

$$Q = \frac{2\pi \bar{K} h}{\mu} \frac{(p_e - p_{wf}) - G_0(r_e - r_w)}{\ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (7)$$

式(6)、(7)相减得:

$$\Delta p_{sk} = p'_{wf} - p_{wf} = \frac{Q \mu}{2\pi K h} \left( \frac{K}{K_d} - 1 \right) \ln \frac{r_d}{r_w} \quad (8)$$

收稿日期: 2005-11-11; 改回日期: 2006-06-04

作者简介: 王厉强 (1974—), 男, 山东临沂人, 2004年毕业于石油大学 (华东) 油气田开发专业, 获硕士学位, 成都理工大学在读博士研究生。

联系电话: (028) 66161355

令  $S = \left( \frac{K}{K_d} - 1 \right) \ln \frac{r_d}{r_w}$  为污染井的表皮因子。

## 2 低渗变形介质污染井酸化产能模型

对于酸化半径等于污染半径的情况,酸化半径以外,产量  $Q_3$  符合式(3),酸化半径以内伴随近井地带伤害的解除和渗透率的大幅增加,启动压力梯度减小甚至消失,设改变后的启动压力梯度为  $G'_0$ ,则有:

$$Q_4 = \frac{2\pi y_s K_h}{\mu} \frac{1 - \exp\{-\alpha_k [(p_d - p_w) - G'_0(r_d - r_w)]\}}{\alpha_k \ln \frac{r_d}{r_w}} \quad (9)$$

由流体流动连续性(即  $Q_3 = Q_4 = Q$ )可解得酸化后油井产量为:

$$Q' = \frac{2\pi K_h}{\mu \alpha_k} \left\{ \frac{1}{\frac{1}{y_s} \ln \frac{r_d}{r_w} + \ln \frac{r_e}{r_d}} \{2 - \exp\{-\alpha_k [(p_e - p_d) - G'_0(r_d - r_w)]\} - \exp\{-\alpha_k [(p_d - p_{wf}) - G'_0(r_d - r_w)]\}\} \right\} \quad (10)$$

由式(3)、(10)得酸化后井底附近附加压力降为:

$$\Delta p'_{sk} = p'_{wf} - p_{wf} = \frac{Q \mu}{2\pi K_h} \left[ \left( \frac{K_s}{K} - 1 \right) \ln \frac{r_d}{r_w} + (G'_0 - G_0)(r_d - r_w) \frac{2\pi K_h}{Q \mu} \right] \quad (11)$$

$$\text{令 } S' = \left( \frac{K_s}{K} - 1 \right) \ln \frac{r_d}{r_w} + (G'_0 - G_0)(r_d - r_w) \frac{2\pi K_h}{Q \mu}$$

为低渗变形介质酸化后的表皮因子。

## 3 酸化增产规律分析

### 3.1 供给压力与酸化半径处压力差作用

如果酸化范围仅限于污染带,计算酸化半径外不同压差下油井的IPR曲线,由图1可以看到酸化半径外小压差时会出现地层供液不足的现象,虽然流压可变范围变大,但酸化后油井产能仍然较低。大压差时,流压可变范围减小,但地层供液能力增强,油井产能增加。因此低渗变形介质油藏保持地层压力开采比降压开采有利。

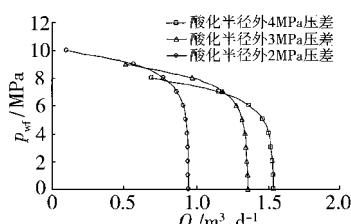


图1 酸化半径外不同压差下的IPR曲线

### 3.2 启动压力梯度的作用

对不同启动压力梯度下产量与流压关系进行计算,结果见图2。同一启动压力梯度下,高流压段产量变化幅度大,低流压阶段产量变化幅度很小。表明随生产压差的增加,启动压力梯度所产生的效应越来越弱。不同启动压力梯度的对比反映出高启动压力梯度下产能较低,降低地层的启动压力梯度有利于提高该类储层的产能。

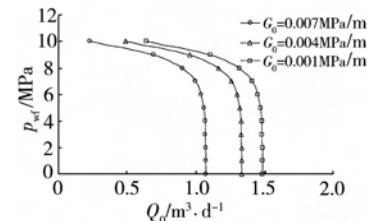


图2 不同启动压力梯度下酸化后的IPR曲线

### 3.3 变形系数的作用

图3为不同变形系数下酸化后的IPR曲线。由图3可知,储层形变能力越强其对渗透率的影响就越大,产量变化范围越小。随着变形系数的减小,产能变化范围加大,低流压阶段产量对整个流压范围内产能的贡献远大于高变形系数下的情形。

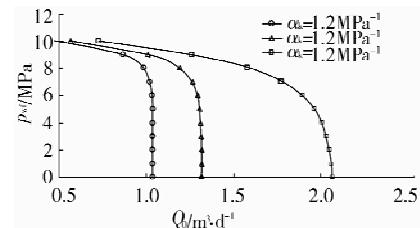


图3 不同变形系数下酸化后的IPR曲线

### 3.4 表皮因子的影响

图4中对比了污染井、酸化半径内启动压力梯度不变及变化为原始值的一半和无启动压力梯度时表皮因子与污染程度的关系。

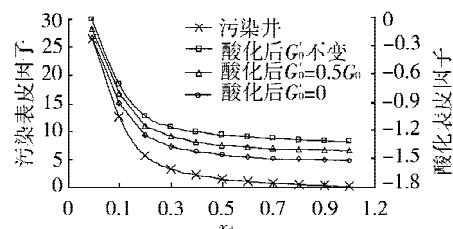


图4 污染井酸化前后表皮因子对比

由图4可以看到,酸化后污染井在近井地带表皮因子的改善是非常明显的,特别在严重污染区改善效果最好。另一方面,酸化后酸化半径内启动压力梯度的改变对表皮因子也有重要影响,随半径内启动压力

梯度的减小, 改善效果变好。

## 4 结 论

1) 酸化增产效果影响因素的敏感性分析表明, 压力保持程度、启动压力梯度、变形系数都对流入动态有显著影响。

2) 酸化可明显改善近井地带的地层污染, 这对该类储层的增产意义重大。酸化半径内启动压力梯度改变幅度越大其改善污染的效果越好。

### 符号说明

$\alpha_k$  为变形系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $K$  为原始渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_c$  为变形介质变形后的渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_d$  为污染区渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $\bar{K}$  为地层平均渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $K_s$  为酸化措施后的渗透率均值,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;  $h$  为油层厚度,  $\text{m}$ ;  $G_0$  为启动压力梯度,  $\text{MPa}/\text{m}$ ;  $G'_0$  为酸化半径内的启动压力梯度,  $\text{MPa}/\text{m}$ ;  $p_e$  为原始地层压力,  $\text{MPa}$ ;  $p_{wf}$  为井底流压,  $\text{MPa}$ ;  $p_d$  为污染区压力,  $\text{MPa}$ ;  $Q$  为污染井产油量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $\mu$  为原油粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $Q_1$  为污染区外的产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_2$  为污染区内的产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q'$  为污染井酸化后产油量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_3$  为污染井酸化半径外的产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $Q_4$  为污染井酸化半径内的产量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $x_d$  为污染区渗透率与该区未污染前的渗透率之比 ( $K_d/K$ );  $y_s$  为酸化措施后的渗透率均值与未污染井

的渗透率之比;  $r_d$  为污染区半径,  $\text{m}$ ;  $r_e$  为供给半径,  $\text{m}$ ;  $r_w$  为井底半径,  $\text{m}$ ;  $\Delta p_{sk}$  为油井污染前后井底附加压力降,  $\text{MPa}$ ;  $\Delta p'_{sk}$  为污染井酸化前后井底附加压力降,  $\text{MPa}$ ;  $S$  为污染井表皮因子, 无因次;  $S'$  为污染井酸化后的表皮因子, 无因次。

### 参 考 文 献

- [1] 蒋海军, 鄢捷年, 李荣. 裂缝性储层应力敏感性实验研究 [J]. 石油钻探技术, 2000, 28 (6): 32-33.
- [2] Zhang M Y, Ambastha A K. New insights in pressure-transient analysis for stress-sensitive reservoirs [R]. SPE28420, 1994.
- [3] 秦积舜. 变围压条件下低渗砂岩储层渗透率变化规律研究 [J]. 西安石油学院学报, 2002, 17 (4): 28-31.
- [4] 梁何生, 闻国峰, 王桂华, 等. 孔隙压力变化对地应力的影响研究 [J]. 石油钻探技术, 2004, 32 (2): 18-20.
- [5] 张兴焰, 同志军, 李淑梅, 等. 压敏效应对文东异常高压低渗油田开发的影响 [J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24 (2): 55-56.
- [6] Pedrosa O A Jr., Petrobras. Pressure transient response in stress-sensitive formations [R]. SPE15115, 1986.
- [7] 张建国, 雷光伦, 张艳玉. 油气层渗流力学 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1998.
- [8] Kilani Jitendra, Pedrosa O A Jr.. Perturbation analysis of stress-sensitive reservoirs [J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6 (3): 379-386.

[审稿 王杰祥]

## Analysis on the Acidizing Stimulation Law for Polluted Wells in Low Permeability and Deformed Media Reservoirs

Wang Liqiang<sup>1</sup> Wang Honghui<sup>1</sup> Kou Xiuling<sup>2</sup> Dai Xiang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Reservoir Geology and Development Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610059, China; 2. Heavy Oil Company, Xinjiang Oilfield Co. Ltd., PetroChina, Keramay, Xinjiang, 834000, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Co. Ltd., PetroChina, Keramay, Xinjiang, 834000, China)

**Abstract:** Based on theories of non-Darcy percolation in low permeability reservoirs and percolation in deformed media, a producing predictive model and an expression for bottom hole pressure loss have been derived in conditions of before and after acidizing operation for a polluted well. Also, a concept of skin factor is defined to research damage degrees before and after acidizing in low permeability and deformed media reservoir. Moreover, its productivity change is researched. The results show that producing reducibility is evident along with the increase of stress-sensitivity and start-up pressure gradient, therefore, increasing the pressure gap of production can get over the disadvantage; The change of start-up pressure gradient within the radical of acidizing plays a important role to improving of skin factor; larger the variational range of this pressure, more effective the improvement.

**Key words:** low permeability pools; deformation; starting pressure; pressure gradient; formation damage; acidizing radius