

文章编号:1673-5005(2012)03-0135-05

## 非均质油藏水平井射孔调剖方法

王海静<sup>1</sup>, 薛世峰<sup>2</sup>, 高存法<sup>1</sup>, 仝兴华<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580;  
3. 山东大学 威海校区, 山东 威海 264209)

**摘要:**基于渗透率随机性和结构性特点,将非均质渗透率场转化为等效均质渗透率场和沿井筒变化的非均质表皮。在此基础上建立各向异性盒式油藏水平井产液剖面计算模型,提出以均衡产液剖面为目标的非均质油藏水平井变密度射孔调剖方法。从射孔调剖机制出发,系统分析射孔调压范围及影响因素。结果表明:孔密、孔深越小,射孔可调压差范围越大;以均衡产液剖面为目标优化孔密后,低渗区孔密较大,生产压差较高,高渗区孔密较小,生产压差较低,产液剖面均衡性明显改善;近井渗透率变异性越强,孔密波动幅度及变化范围越大,低孔密所占的比例也越大;孔密越低,舍入误差的影响越大,调剖效果越不理想。

**关键词:**水平井;非均质;射孔;变密度;产液剖面;调剖

**中图分类号:**TE 257 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.023

## Profile control method for perforated horizontal wells in heterogeneous reservoirs

WANG Hai-jing<sup>1</sup>, XUE Shi-feng<sup>2</sup>, GAO Cun-fa<sup>1</sup>, TONG Xing-hua<sup>3</sup>

(1. College of Aerospace Engineering in Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. College of Pipeline & Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;  
3. Weihai Branch of Shandong University, Weihai 264209, China)

**Abstract:** Based on the randomness and structural characteristics of permeability, the heterogeneous permeability was represented by an equivalent homogeneous permeability and heterogeneous skin varying along the wellbore. On this basis, a production profile model for horizontal wells in anisotropic box-shaped reservoirs was proposed and a profile control method using variable-density perforations aiming at uniform recovery was presented. The pressure adjustment range and influencing factors were analyzed quantitatively. The results show that the smaller the perforation density and depth, the larger the pressure adjustment range. After optimization, perforation density in low-permeability zone is bigger than that in high-permeability zone. With the increase of near-well permeability variability, the profile balance deteriorates, and the perforation density range increases. The smaller the perforation density, the greater the impact of rounding error, and the less satisfactory the profile control.

**Key words:** horizontal well; heterogeneity; perforation; variable-density; production profile; profile control

水平井产液剖面反映了生产过程中油藏流体进入井筒时沿其长度方向的分布规律,是油藏-井筒系统耦合作用的结果,同时受到油藏物性、完井方式、井身结构等多种因素的影响。产液剖面不均衡是实际水平井开发过程中面临的重要问题。该问题

轻则引起油藏动用不均衡,重则导致边底水过早突破,影响油藏的最终采收率。20世纪90年代,Landman等<sup>[1-2]</sup>最先研究了油藏、井筒耦合条件下射孔参数对水平井产液剖面的影响,并以井筒径向流速均匀分布为目标,首次提出了水平井孔密分段优化方

收稿日期:2012-02-29

基金项目:国家科技重大专项课题(2008ZX05031-02-03)

作者简介:王海静(1983-),女(汉族),辽宁辽中人,博士研究生,主要从事油气田地下工程力学研究。

法。在此基础上,周生田<sup>[3]</sup>、汪志明<sup>[4]</sup>、魏建光<sup>[5]</sup>、刘冰<sup>[6]</sup>、李华等<sup>[7]</sup>将数学中的各种优化算法应用于射孔参数优化,先后建立了不同的水平井射孔参数优化模型。然而,这些模型大多是在油藏均质性假设前提下建立的,对非均质性的研究较少。储层非均质性是导致水平井产液剖面不均衡的主要因素<sup>[8,9]</sup>,不容忽视。笔者首先通过非均质性定量评价,将非均质渗透率场转化为等效均质渗透率场和沿井筒变化的非均质表皮。在此基础上,建立各向异性盒式油藏水平井产液剖面计算模型,提出以均衡产液剖面为目标的非均质油藏变密度射孔调剖方法。定量分析射孔调剖范围及影响因素,阐述变密度射孔调剖机制。最后,通过算例分析近井渗透率非均质性对孔密分布以及调剖效果的影响。

### 1 非均质性定量评价方法

储层渗透率属区域化变量,其分布具有随机性和结构性双重特点。渗透率非均质性对油井产能的影响体现在两个方面:一是全局影响,表现为一个大尺度的全局等效均质渗透率  $K = \{k_x, k_y, k_z\}$ ;二是近井影响,表现为一个以井筒为轴心、以各方向渗透率相关长度为轴长的椭圆形影响区<sup>[10]</sup>,如图1所示。

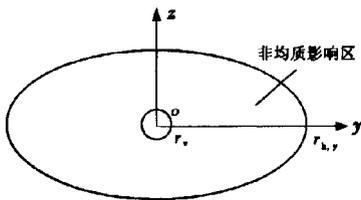


图1 近井非均质影响区示意图

Fig.1 Sketch map of near-well heterogeneous region

假设近井非均质影响椭圆与等压线重合,通过坐标变换可建立各向异性油藏非均质表皮系数计算模型,即

$$S_h = \left[ \frac{k_y}{k_{h,y}} - 1 \right] \ln \left\{ \frac{1}{I_{ani,yz} + 1} \left[ \frac{r_{h,y}}{r_w} + \sqrt{\left( \frac{r_{h,y}}{r_w} \right)^2 + I_{ani,yz}^2 - 1} \right] \right\}, \quad (1)$$

其中

$$I_{ani,yz} = \sqrt{k_y/k_z}.$$

式中,  $k_{h,y}$  为近井非均质影响区  $y$  方向的等效渗透率,  $m^2$ ;  $r_{h,y}$  为非均质影响椭圆的  $y$  半轴,  $m$ ;  $k_y$  和  $k_z$  分别为  $y$  方向和  $z$  方向的渗透率,  $m^2$ ;  $r_w$  为井筒半径,

$m$ ;  $I_{ani,yz}$  为  $yz$  平面的渗透率各向异性系数。

通过上述非均质性定量评价方法,可将非均质渗透率场简化为等效均质渗透率场和沿井筒变化的非均质表皮,从而可采用解析法来求解油藏渗流模型。

### 2 射孔调剖方法

#### 2.1 产液剖面计算模型

产液剖面是油藏渗流与井筒变质量流耦合作用的结果,是生产段位置的连续函数。鉴于油藏的非均质性以及井筒变质量流的非线性特征,可采用离散方法求解。将生产段离散为  $n$  个长度为  $\Delta l$  的井筒微元,从跟端开始依次编号,假设每个井筒微元的单位长度径向流入量即比流量  $q_i (i = 1, 2, \dots, n)$  均匀分布,如图1所示。

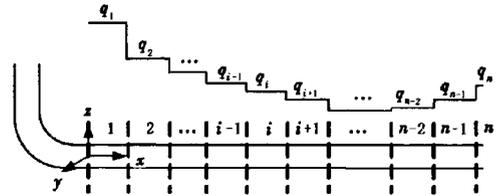


图2 水平井离散模型

Fig.2 Discrete model of horizontal well

将各井筒微元看作是强度均匀的线汇,取各微元中心距离轴线  $r_w$  处的点  $M_i$  作为该井筒微元的压力计算点。假设井筒与  $x$  轴平行,基于源函数法和势的叠加原理建立的第  $i$  个井筒微元的压力计算公式为

$$P_{w,i} = p_0 - \frac{\mu q_i}{2\pi \sqrt{k_y k_z}} S_{t,i} - \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{\varphi c} \int_0^t G_j(M_i, \tau) d\tau, \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, n.$

式中,  $p_{w,i}$  为第  $i$  个井筒微元中点的压力, Pa;  $p_0$  为油藏初始压力, Pa;  $\mu$  为流体黏度, Pa · s;  $q_j$  为第  $j$  个井筒微元的比流量,  $m^3/(s \cdot m)$ ;  $\varphi$  为孔隙度;  $c$  为流体压缩系数,  $Pa^{-1}$ ;  $t$  为时间, s;  $G_j$  为第  $j$  个井筒微元的瞬时源函数<sup>[11]</sup>,  $m^{-2}$ ;  $S_{t,i}$  为考虑非均质性、射孔几何尺寸、钻井污染和孔道压实等因素影响的第  $i$  个井筒微元的总表皮系数。

对于各向异性油藏,在计算源函数之前,需通过坐标变换<sup>[12-13]</sup> 将其转化成等效各向同性系统。等效井筒半径取椭圆形井筒截面两半轴长的平均值,  $S_{t,i}$  可写成各分项表皮系数的组合形式:

$$S_{t,i} = S_{h,i} + \frac{k}{k_{d,i}} S_{p,i} + S_{d,i} + S_{ca,i}. \quad (3)$$

式中,  $S_{h,i}$  为第  $i$  个井筒微元的非均质表皮系数;  $k_{d,i}$  为第  $i$  个井筒微元的污染带渗透率,  $m^2$ ;  $S_{p,i}$  为第  $i$  个井筒微元的射孔几何表皮系数<sup>[14]</sup>, 是孔深、孔密、孔径和相位角的函数;  $S_{d,i}$  为第  $i$  个井筒微元的污染表皮系数<sup>[15]</sup>, 是污染带厚度和污染程度  $k_{d,i}/k$  的函数;  $S_{cz,i}$  为第  $i$  个井筒微元的射孔压实表皮系数<sup>[16]</sup>, 是孔深、孔密、孔径、压实带厚度和压实程度  $k_{cz,i}/k$  的函数;  $k_{cz,i}$  为第  $i$  个井筒微元的压实带渗透率,  $m^2$ 。

考虑非均质性、射孔几何尺寸、钻井污染和孔道压实等因素影响后, 各井筒微元的生产压差为

$$\Delta p_{d,i} = p_0 - p_{w,i} - \frac{\mu q_i}{2\pi \sqrt{k_y k_z}} S_{t,i}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

生产段井筒内的流动是伴有孔眼径向入流的变质量流, 压力损失由摩擦压降、加速压降组成。根据动量守恒, 两个相邻的井筒微元间的压差可写为

$$p_{w,i} - p_{w,i+1} = -\frac{\rho f}{2d} \left[ \frac{A}{3q_{i+1}} (v_{i,i+1}^3 - v_{i+1}^3) + \frac{A}{3q_i} (v_i^3 - v_{i,i+1}^3) \right] - \frac{\rho}{2} (\alpha_i v_i^2 - \alpha_{i+1} v_{i+1}^2), \quad i = 1, 2, \dots, n - 1. \quad (5)$$

式中,  $\rho$  为流体密度,  $kg/m^3$ ;  $f$  为孔眼入流条件下的管壁摩擦系数<sup>[17]</sup>;  $d$  为套管内径,  $m$ ;  $\alpha_i$  为第  $i$  个井筒微元的动量修正系数<sup>[18]</sup>;  $A$  为套管的横截面积,  $m^2$ ;  $v_i$  为第  $i$  井筒微元中点处的截面平均流速,  $m/s$ ;  $v_{i,i+1}$  为第  $i$  和  $i + 1$  个井筒微元连接处的截面平均流速,  $m/s$ 。

当油井以定产量生产时, 有

$$\sum_{i=1}^n q_i \Delta l = BQ. \quad (6)$$

式中,  $B$  为体积系数;  $Q$  为地面流量,  $m^3/s$ 。

式(2)、(5)、(6) 构成了水平井产液剖面计算模型, 该模型适用于任意边界条件下各向异性盒式油藏水平井产液剖面的计算。模型共包含  $2n$  个方程,  $2n$  个未知量, 分别是生产段的比流量  $q_i (i = 1, 2, \dots, n)$  和压力  $p_{w,i} (i = 1, 2, \dots, n)$  分布, 有唯一解。鉴于两方程间的弱耦合关系, 可采用顺序迭代法求解。

### 2.2 变密度射孔调剖方法

从建立的产液剖面计算模型可以看出, 产液剖面同时受油藏渗流和井筒变质量流影响。在油藏物性和井筒结构参数一定的情况下, 射孔参数是影响产液剖面的唯一可控因素。变密度射孔, 即孔密沿井筒梯级变化是解决水平井产液剖面不均衡问题的

有效途径。最优的孔密分布应在满足现有的射孔器性能和实际工程要求的前提下, 使生产段流量分布达到均衡, 即  $q_i = \bar{q}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。这类优化问题可归结为如下的最小值问题:

$$\begin{cases} \min f(\rho_{den}) = \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q}_i)^2, \\ \text{s. t. } \rho_{den, \min} \leq \rho_{den} \leq \rho_{den, \max}. \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $f(\rho_{den})$  为目标函数;  $\rho_{den} = (\rho_{den,1}, \rho_{den,2}, \dots, \rho_{den,n})^T$  为决策变量, 即每个井筒微元的孔密;  $\bar{q}_i$  为第  $i$  个井筒微元的目标比流量,  $m^3/(s \cdot m)$ ;  $\rho_{den, \min}$ ,  $\rho_{den, \max}$  为约束条件, 即孔密的上、下界。

这是一个非线性规划问题。鉴于目标函数的特殊性, 可先确定该优化问题的最优解  $\bar{q}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 再将最优解代入产液剖面计算模型, 联合约束条件, 建立以决策变量即孔密为未知量的方程组, 求解方程组获得最优孔密。具体步骤如下:

(1) 根据计算精度要求和工程需要(如射孔枪长度限制等) 进行井筒微元离散, 如图 1 所示。

(2) 不考虑近井非均质性、射孔、地层损害和井筒压力损失的影响, 即令  $S_{t,i} = 0, p_{w,i} - p_{w,i+1} = 0 (i = 1, 2, \dots, n - 1)$ , 根据全局等效渗透率求解油藏渗流方程(2) 和定产量约束条件(6) 构成的线性方程组, 得到等效均质油藏无限导流裸眼完善水平井的产液剖面, 即均衡产液剖面  $\bar{q}_i$ , 令  $q_i = \bar{q}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

(3) 考虑近井非均质性、射孔、地层损害和井筒压力损失的影响, 将  $q_i (i = 1, 2, \dots, n)$  代入公式(2) 和(5), 得到以孔密  $\rho_{den,i} (i = 1, 2, \dots, n)$  为未知量的  $n - 1$  个非线性方程, 再结合孔密约束条件, 共  $n$  个方程,  $n$  个未知量, 方程组有唯一解, 采用迭代法求解。将计算结果四舍五入取整, 得到各井筒微元的孔密最优值。

## 3 射孔调剖效果分析

某盒式底水油藏  $700 m \times 300 m \times 10 m$ , 初始压力  $10 MPa$ , 等效水平渗透率  $1 \mu m^2$ , 等效垂向渗透率  $0.3 \mu m^2$ , 孔隙度  $0.3$ 。地层原油黏度  $10 mPa \cdot s$ , 密度  $850 kg/m^3$ , 体积系数  $1.25$ , 压缩系数  $1.0 kPa^{-1}$ 。一口水平井位于油藏中心, 距油层底  $8 m$ , 井筒半径  $0.1 m$ , 套管内径  $0.1 m$ , 管壁相对粗糙度  $0.01$ , 污染带厚度  $0.6 m$ , 污染程度  $0.4$ 。射孔段长  $400 m$ , 孔密  $24 \text{ 孔}/m$ , 孔深  $0.4 m$ , 孔径  $0.01 m$ , 射孔相位角  $90^\circ$ , 射孔压实带厚度  $0.02 m$ , 压实程度  $0.1$ 。油井以定产量  $800 m^3/d$  生产。

### 3.1 调压范围

变密度射孔调剖的机制是通过改变生产段的孔密分布来调节生产压差分布,进而调整产液剖面,使储层达到均衡开采。孔眼调压范围反映了射孔调剖的能力,决定了最终的射孔调剖效果。假设孔深未穿透污染带,则射孔孔眼的节流压降可写成污染带渗流压降与射孔表皮附加压降之和的形式:

$$\Delta p_i = \frac{\mu BQ}{2\pi kL} \left\{ \frac{k}{k_d} \ln \left[ \frac{1}{J_{ani,yz} + 1} \left( \frac{r_w + h_p}{r_w} + \sqrt{\left( \frac{r_w + h_p}{r_w} \right)^2 + J_{ani,yz}^2 - 1} \right) \right] + \frac{k}{k_d} S_p + S_{ca} \right\}. \quad (8)$$

式中,  $h_p$  为孔眼深度, m。

采用公式(8) 计算射孔节流压降, 结果如图3所示。可以看出, 节流压降随着孔密的增加而快速降低。当孔密较小时, 节流压降下降较快, 调压范围较大。随着孔密的增大, 节流压降逐渐稳定并趋于0, 调压范围大幅降低。当孔深  $h_p$  为0.4 m, 孔密从2孔/m增加到40孔/m时, 节流压降从1.69 MPa降低到0.06 MPa, 即最大可调压差为1.63 MPa。随着孔深的增大, 节流压降和调压范围逐渐降低。当孔深为1 m, 孔密从2孔/m增加到40孔/m时, 节流压降从0.73 MPa降低到0.01 MPa, 即最大可调压差为0.72 MPa。

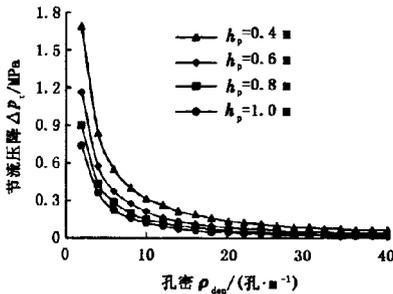


图3 孔深、孔密对节流压降的影响

Fig.3 Effect of perforation depth and density on throttling pressure drop

### 3.2 调剖效果

定义近井渗透率变异性定量评价指标变异系数  $C_v$  为渗透率标准差与平均值之比, 即

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (k_i - \bar{k})^2} / \bar{k}. \quad (9)$$

式中,  $k_i$  为第  $i$  个井筒微元的近井渗透率,  $m^2$ ;  $\bar{k}$  为近井平均渗透率,  $m^2$ 。

取20个井筒微元, 随机得到5组渗透率均呈对数正态分布, 平均值为  $1 \mu m^2$ , 但变异系数不等, 如

图4所示。各井筒微元的近井非均质影响椭圆轴长100 m, 各向异性系数  $\sqrt{k_{h,i}/k_{v,i}} = \sqrt{1/0.3}$  ( $i = 1, 2, \dots, 20$ )。

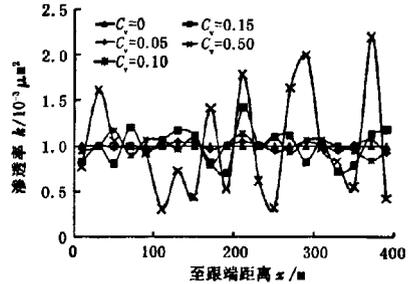


图4 近井水平渗透率分布

Fig.4 Horizontal permeability distribution near wellbore

以均衡产液剖面为目标, 最大孔密40孔/m为约束, 优化得到不同变异系数下的孔密分布, 如图5所示。均质情况下, 孔密从趾端到跟端逐渐降低, 最小孔密为26孔/m, 孔密变化幅度较小。非均质情况下, 孔密分布出现波动。低渗区孔密大, 高渗区孔密小。近井渗透率变异性越强, 需调节的压差越大, 孔密波动幅度越大。由于调压范围随着孔密的减小而增大, 近井渗透率变异性越强, 低孔密所占的比例越大。变异系数为0.05、0.1、0.15、0.5时对应的最小孔密分别为19、11、8和2孔/m, 孔密范围逐渐增大。

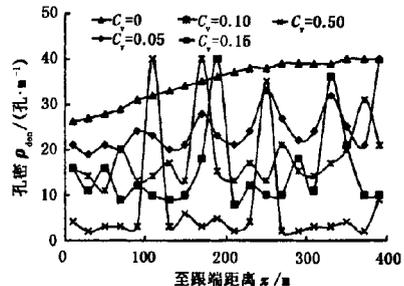


图5 优化后的孔密分布

Fig.5 Perforation density distribution after optimization

优化前后的生产压差剖面和产液剖面如图6所示。优化前, 不同变异系数下的生产压差变化趋势基本相同。由于井筒内存在压力损失, 生产压差从跟端到趾端逐渐降低, 跟端与趾端生产压差相差约0.05 MPa。受此影响, 均质情况下 ( $C_v = 0$ ), 生产段跟端流量略高, 趾端流量略低, 产液剖面呈U型分布。非均质情况下, 产液剖面出现波动。高渗区流

入量大,低渗区流入量小,井筒压力损失的影响被掩盖。对比发现,产液剖面分布规律与近井渗透率分

布规律基本一致。近井渗透率变异性越强,产液剖面的波动幅度越大,均衡性越差。

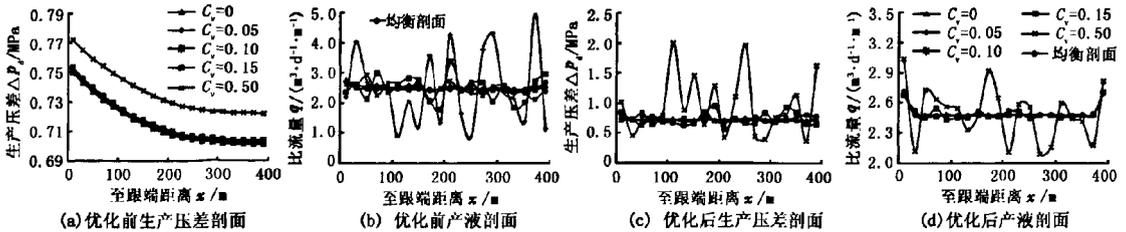


图6 优化前、后的生产压差剖面 and 产液剖面

Fig.6 Pressure drawdown profiles and production profiles before and after optimization

优化后,不同变异系数下的生产压差相差较大。均质情况下,整个生产段的生产压差基本相同。非均质情况下,生产压差出现波动。对比发现,生产压差分布规律与近井渗透率分布规律基本相反,高渗区生产压差小,低渗区生产压差大。近井渗透率变异性越强,生产压差波动幅度越大。孔密优化后产液剖面的均衡性明显改善,尤其是变异系数为0.05、0.1情况下,几乎与均衡产液剖面重合,优化效果十分理想。受孔密优化结果取整时舍入误差影响,变异系数为0.15、0.5情况下的产液剖面仍有波动,但仍较优化前有明显改善。孔密越低,舍入误差的影响越大,调剖效果越不理想。

### 4 结论

(1)提出的以均衡产液剖面为目标的非均质油藏变密度射孔调剖方法具有求解方便、计算效率高的特点,适用于任意边界条件下非均质盒式油藏水平井调剖。

(2)射孔节流压降随着孔密的增加而快速降低,并逐渐趋于稳定。孔密越小,调压范围越大。随着孔深的增加,节流压降和调压范围均逐渐降低。

(3)以均衡产液剖面为目标优化孔密后,低渗区孔密较大,生产压差较高,高渗区孔密较小,生产压差较低。近井渗透率变异性越强,孔密波动幅度及变化范围越大,低孔密所占的比例也越大。孔密越低,舍入误差的影响越大,调剖效果越不理想。

### 参考文献:

[1] LANDMAN M J, GOLDTHORPE W H. Optimization of perforation distribution for horizontal wells [R]. SPE 23005, 1991.  
 [2] ASHEIM H, OUDEMAN P. Determination of perforation

schemes to control production and injection profiles along horizontal wells[J]. SPE Drilling & Completion, 1997, 12(1):13-18.

[3] 周生田, 马德泉, 刘民. 射孔水平井孔眼分布优化研究[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2002, 26(3):52-54.

ZHOU Sheng-tian, MA De-quan, LIU Min. Optimization of perforation tunnels' distribution in perforated horizontal wells[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002, 26(3):52-54.

[4] 汪志明, 魏建光, 王小秋. 水平井射孔参数分段组合优化模型[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6):725-730.

WANG Zhi-ming, WEI Jian-guang, WANG Xiao-qiu. Sectional combination optimization model of horizontal well perforating parameters [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6):725-730.

[5] 魏建光, 汪志明, 王小秋. 非均质油藏水平井射孔参数分段优化模型[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2009, 33(2):75-79.

WEI Jian-guang, WANG Zhi-ming, WANG Xiao-qiu. Sectional optimization model of perforation parameters of horizontal well in heterogeneous reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(2):75-79.

[6] 刘冰, 徐兴平, 李继志, 等. 基于序列二次规划算法的射孔水平井孔眼分布优化[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2010, 34(4):79-83, 88.

LIU Bing, XU Xing-ping, LI Ji-zhi, et al. Optimization of perforation distribution of perforated horizontal well based on sequential quadratic programming algorithm[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(4):79-83, 88.

(下转第150页)

- [3] PAL N R, PAL S K. A review on image segmentation techniques [J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(9): 1277-1294.
- [4] JIAN Bo-shi, JITENDRA Malik. Normalized cuts and image segmentation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(8): 888-905.
- [5] ROBERT M, HARALICK, LINDA C Shapiro. Image segmentation techniques [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1985, 29(1): 100-132.
- [6] SONG Chun-zhu, ALAN Yuille. Region competition; unifying snakes, region growing, and Bayes/MDL for multiband image segmentation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(9): 884-900.
- [7] DATTOMA V, MARCUCCIO R, PAPPALLETTERE C, et al. Thermography investigation of sandwich structure made of composite material [J]. *NDT & E International*, 2001, 34(8): 515-520.
- [8] 邢素霞, 张俊举, 常本康, 等. 非制冷红外热成像技术的发展与现状 [J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(5): 441-444.
- XING Su-xia, ZHANG Jun-ju, CHANG Ben-kang, et al. Recent development and status of uncooled IR thermal imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 441-444.
- [9] RAFAEL C, GONZALEZ, RICHARD E woods. Digital image processing [M]. Prentice Hall, 2007.
- [10] CAROSENSA Meola. A new approach for estimation of defects detection with infrared thermography [J]. *Materials Letters*, 2007, 61(3): 747-750.
- [11] MATHERON G. Random sets and integral in geometry [M]. New York: Wiley, 1975.
- [12] SERRA J. Image analysis and mathematical morphology [M]. London: Academic, 1982.

(编辑 沈玉英)

(上接第 139 页)

- [7] 李华, 陈德春, 孟红霞. 水平井变密度射孔优化设计模型 [J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(3): 363-368.
- LI Hua, CHEN De-chun, MENG Hong-xia. Optimized models of variable density perforation in the horizontal well [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(3): 363-368.
- [8] 严科, 杨少春, 任怀强. 储层宏观非均质性定量表征研究 [J]. *石油学报*, 2008, 29(6): 870-874.
- YAN Ke, YANG Shao-chun, REN Huai-qiang. Research on quantitative characterization of macroscopic heterogeneity of reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(6): 870-874.
- [9] 王敬, 刘慧卿, 刘松原, 等. 非均质底水油藏水平井水淹规律研究 [J]. *石油学报*, 2010, 31(6): 970-974.
- WANG Jing, LIU Hui-qing, LIU Song-yuan, et al. A flooding law in horizontal wells of heterogeneous reservoirs with bottom water [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(6): 970-974.
- [10] DUILLOFSKY L J. An approximate model for well productivity in heterogeneous porous media [J]. *Mathematical Geology*, 2000, 32(4): 421-438.
- [11] GRINGARTEN A C, jr RAMEY H J. The use of source and Green's functions in solving unsteady-flow problems in reservoirs [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1973, 13(5): 285-296.
- [12] BESSON J. Performance of slanted and horizontal wells on an anisotropic medium [R]. SPE 20965, 1990.
- [13] SHENG J J. Formulation of the flow problem in anisotropic porous media using different coordinate transformations [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 75(1/2): 203-208.
- [14] FURUI K, ZHU D, HILL A D. A new skin-factor model for perforated horizontal wells [J]. *SPE Drilling & Completion*, 2008, 23(3): 205-215.
- [15] FURUI K, ZHU D, HILL A D. A rigorous formation damage skin factor and reservoir inflow model for a horizontal well [J]. *SPE Production & Operations*, 2003, 18(3): 151-157.
- [16] YILDIZ T. Assessment of total skin factor in perforated wells [R]. SPE 82249, 2003.
- [17] OUYANG L, ARBABI S, AZIZ K. General wellbore flow model for horizontal, vertical, and slanted well completions [J]. *SPE Journal*, 1998, 3(2): 124-133.
- [18] WHITE F M. Fluid mechanics [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1986.

(编辑 李志芬)