

文章编号: 0253-2697(2009)04-0578-05

# 低渗透储层井网与压裂整体设计中的产量计算

计秉玉<sup>1</sup> 王春艳<sup>2</sup> 李莉<sup>2</sup> 何应付<sup>2</sup>

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712)

**摘要:** 基于低速非达西渗流基本公式, 运用单元分析法及流线积分方法推导出了矩形井网与压裂一体化模式的产量和启动系数计算公式, 简称为 ND-II 法。分析了裂缝长度、井排距对产量及储层动用状况的影响, 从理论上阐明了对于低渗透储层采用矩形井网与压裂一体化开发模式比传统的面积井网更加有效, 明确了压裂不单是一种增产措施更是一种改变渗流场的开发手段。文中所建立的计算方法可应用于低渗透储层矩形井网与压裂一体化开采模式的井网几何参数设计、产量计算以及储层动用程度评价。

**关键词:** 低渗透率储层; 矩形井网与压裂一体化模式; 启动系数; 产量; 计算方法

中图分类号: T E357.1

文献标识码: A

## Calculation method for production rate of rectangular well pattern and fracturing integration production mode in low-permeability reservoir

Ji Bingyu<sup>1</sup> WANG Chunyan<sup>2</sup> LI Li<sup>2</sup> HE Yingfu<sup>2</sup>

(1. *Sinopac Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China;*

2. *Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Company Limited, Daqing 163712, China*)

**Abstract:** Based on the basic formulas of low-velocity non-Darcy flow, the calculation method of startup coefficient and production rate of the rectangular well pattern and fracturing integration production mode for the low-permeability reservoirs was deduced using the unit analysis method and streamlined integration method. The new method is named as ND-II. The influences of fracture length and well alignment interval on the production rate and producing status of reservoir were analyzed using the new method. It is theoretically proved that the production mode with rectangular well pattern and fracturing integration is more suitable and effective for extra-low permeability reservoirs than the conventional areal pattern. The fracturing technology is not only the production-increasing measure, but also the development measure for changing seepage of reservoirs. The new calculation method can be used to design the geometric parameters of well pattern, calculate the production rate and evaluate the producing degree of reservoir with the production mode of rectangular well and fracturing integration for low-permeability reservoirs.

**Key words:** low-permeability reservoir; rectangular well pattern and fracturing integration production mode; startup coefficient; production rate; calculation method

对于裂缝不发育的特低渗透储层, 由于原油与岩石相互作用所产生的启动压力梯度, 表现出低速非达西渗流特征<sup>[1-3]</sup>, 需要渗流场具有更大的驱替压力梯度才能实现更为有效的开采。利用人工裂缝和井网协同作用, 形成大井距和小排距的线性或近线性驱替, 改变流线, 使流体在储层中渗流路径变短, 是增加储层内部驱替压力梯度的一种有效途径<sup>[4-8]</sup>。但传统的基于达西渗流的油藏工程方法, 包括现在广泛使用的油藏数值模拟软件也很难提供本质上的指导; 具有低速非达西渗流特征的低渗透储层的井距井网参数、裂缝长度等对产量指标的影响、计算和设计到目前为止还没有

系统的研究。笔者针对低渗透储层开发设计相应的渗流理论计算方法进行了研究。

### 1 计算单元分析与启动系数的计算

假设储层为均质等厚, 流体为单相流动, 人工裂缝为无限导流能力。图 1 为矩形井网与开发压裂一体化的注采模式, 可以概括为裂缝半长之和大于井距之半、裂缝半长之和小于井距之半两种情形(图 2 和图 3)。整个渗流区域由这些单元组成。油水井产量计算问题可以分解为这些单元的渗流计算结果的叠加, 将这样的单元称为计算单元。根据对称性可知, 水井注水与

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50574059)和中国石油天然气股份公司科技攻关项目(030127)联合资助。

作者简介: 计秉玉, 男, 1963年6月生, 1999年获中国科学院数学与系统科学研究院博士学位, 现任中国石化石油勘探开发研究院副总工程师, 教授高级工程师, 主要从事科研与管理工作。E-mail: jiby@pepris.com

油井产出量是计算单元渗流量的 4 倍。

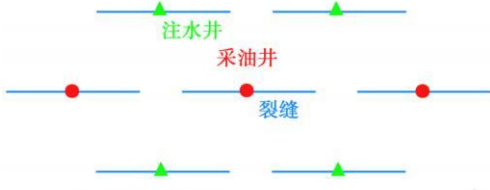


图 1 人工裂缝与矩形井网单元示意图

Fig. 1 Sketch map of units of artificial fractures and rectangular well pattern

1.1 计算单元几何特征

计算单元为矩形区域, 两边长分别为井距之半  $L$  和排距  $d$ , 水井裂缝半长为  $L_1$ , 油井裂缝半长为  $L_2$ , 根据渗流特征上的差异, 计算单元又可细分为 3 个子单元(图 2 和图 3)。其中子单元 III 为裂缝控制区域, 子单元 I、II 为裂缝影响区域。

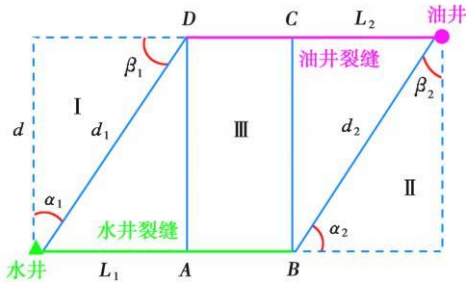


图 2 油水井裂缝长之和大于井距的单元划分

Fig. 2 Unit division when the total fractures length exceeding well spacing

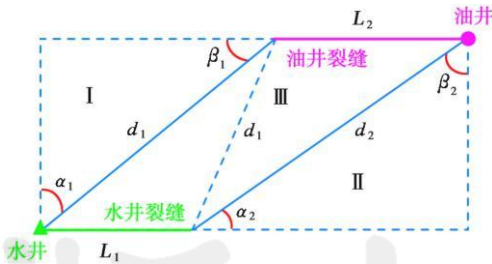


图 3 油水井裂缝长之和小于井距的单元划分

Fig. 3 Unit division when the total fractures length less than well spacing

子单元为直角三角形, 各种几何量之间的关系为

$$\alpha_1 = \arctan[(L - L_2)/d] \quad \beta_1 = \pi/2 - \alpha_1$$

$$d_1 = [d^2 + (L - L_2)^2]^{\frac{1}{2}}$$

注入点为注水井, 采出点为油井裂缝端点, 为点源、点汇渗流系统。考虑到裂缝的无限导流假设, 采出点处可设置一虚拟生产井, 为计算方便, 用折线近似曲线流线。

子单元 II 也为直角三角形, 几何量之间的关系为

$$\alpha_1 = \arctan[d/(L - L_1)] \quad \beta_2 = \pi/2 - \alpha_2$$

$$d_2 = [d^2 + (L - L_1)^2]^{\frac{1}{2}}$$

注入点为水井裂缝端点, 采出点为油井, 同子单元 I 一样, 为点源、点汇渗流系统。计算过程中在注入端设置一口虚拟井, 用折线近似曲线流线。

子单元 III 区为梯形, 顶底边由裂缝半长构成, 为线源、线汇系统, 腰长分别为  $d_1$ 、 $d_2$ , 底角  $\alpha_3$  为  $(\pi/2 - \alpha_1)$ 。给定了井距、排距和油水井的裂缝半长, 就可以确定计算单元及子单元的几何特征。

1.2 启动系数的计算

开采过程中, 由于启动压力梯度的存在, 在一定压差下渗流区内存在一个启动比例, 即启动系数<sup>[9]</sup>。它是描述储层动用状况的定量指标。在计算单元几何特征确立之后, 决定启动系数的关键参数就是注采压差和启动压力梯度。

1.2.1 裂缝半长之和大于井距之半的情形

假定注水压力为  $p_h$ , 油井生产流压为  $p_f$ , 储层启动压力梯度为  $\lambda$  并令

$$d_a = (p_h - p_f)/\lambda$$

在井网与裂缝几何条件确定的情况下,  $d_a$  决定了启动系数的变化。

(1) 当  $d_a < d$  时, 储层没有建立起驱动体系, 启动系数  $S_i$  为 0; 当  $d_a = d$  时, 启动区域为矩形区域 ABCD (图 2), 启动系数为

$$S_i = (L_1 + L_2)/L - 1$$

可以看出, 当油水井裂缝贯穿情况下,  $S_i = 1$ , 整个计算单元全部启动。

(2) 当  $d < d_a \leq \min(d_1, d_2)$  时, 启动区域仅在子单元 III 内, 为平行四边形。

$$S_i = \sqrt{d_a^2 - d^2}/L + (L_1 + L_2)/L - 1$$

(3) 当  $\min(d_1, d_2) < d_a \leq \max(d_1, d_2)$  时, 启动区域扩展到 I 区或 II 区, 在 III 区可能仍有未动用部分, 但启动区域为梯形(图 4)。为计算方便, 假定  $d_1 < d_2$ , 即  $L_1 < L_2$ 。

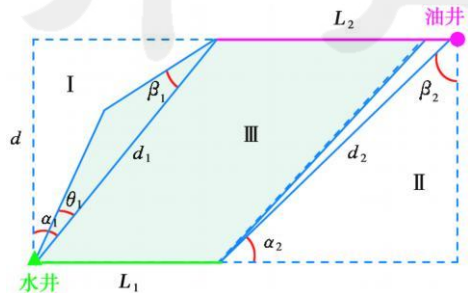


图 4 子单元 I 区启动后计算单元示意图

Fig. 4 Calculation unit after actuating of sub-unit block I

求解三角方程

$$[\sin(\beta_1 \theta_1) / \alpha + \sin \theta_1] \cdot d_1 / \sin[(\beta_1 \theta_1) / \alpha + \theta_1] = d_a \quad (1)$$

可求解得到I区内启动角 $\theta_1$ ,进而求得计算单元启动系数为

$$S_1 = \left[ \left[ 2L_1 + L_2 - L + \sqrt{d_a^2 - d^2} \right] \cdot d/2 \right] / (L \cdot d) + \left[ \sin \theta_1 \cdot \sin(\beta_1 \theta_1 / \alpha) \cdot d_1^2 / 2 \sin(\beta_1 \theta_1 / \alpha + \theta_1) \right] / (L \cdot d) \quad (2)$$

(4) 当 $d_a > \max(d_1, d_2)$ 时,启动区域扩展到I区和II区,则I区、II区和III区内流体全部启动(图5)。

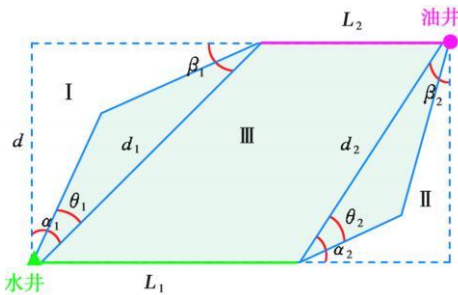


图5 子单元I区、II区均启动后计算单元示意图

Fig. 5 Calculation unit after actuating both of sub-unit block I and sub-unit block II

求解方程

$$[\sin(\beta_i \theta_i) / \alpha + \sin \theta_i] \cdot d_i / \sin[(\beta_i \theta_i) / \alpha + \theta_i] = d_a \quad (3)$$

求解得到I、II区启动角 $\theta_1, \theta_2$ 后,可计算启动系数为

$$S_1 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \sin \theta_i \cdot d_i^2 \cdot \sin[(\beta_i \theta_i) / \alpha] / 2 \sin[(\beta_i \theta_i) / \alpha + \theta_i] \right\} / (L \cdot d) + [(L_1 + L_2) \cdot d/2] / (L \cdot d) \quad (4)$$

(5) 当 $\min(d + L - L_1, d + L - L_2) < d_a < \max(d + L - L_1, d + L - L_2)$ 时,假设 $L_1 < L_2$ ,此时I区和III区全部启动,II区部分启动,启动系数为

$$S_1 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \sin \theta_i \cdot d_i^2 \cdot \sin[(\beta_i \theta_i) / \alpha] / 2 \sin[(\beta_i \theta_i) / \alpha + \theta_i] \right\} / (L \cdot d) + [(L_1 + L_2) \cdot d/2] / (L \cdot d) \quad (5)$$

(6) 当 $d_a > \max(d + L - L_1, d + L - L_2)$ 时,整个计算单元全部启动,此时启动系数为1。

1.2.2 裂缝半长之和小于井距之半的情形

$d_1$ 为油水井裂缝尾部之间的距离(图3),显然

$$d_1 = [(L - L_1 - L_2)^2 + d^2]^{1/2} \quad (6)$$

当 $d_a \leq d_1$ 时,没有建立起驱动体系,启动系数 $S_1$ 为0;当 $d_a > d_1$ 时,计算单元开始启动,启动系数随 $d_a$

与井网裂缝几何特征的变化而变化。可以用与裂缝半长之和大于井距之半情形下的公式进行计算。

## 2 产量计算

### 2.1 单流管计算式

假定各子单元由通过注入端和采出端的一系列流管组成,截面处流量可表示为<sup>[1+2]</sup>

$$\Delta q = -KA(\xi)(dp/d\xi - \lambda) / \mu \quad (7)$$

式中: $\xi$ 为从注水井出发的流线长度,cm; $A(\xi)$ 为流线长度 $\xi$ 处的流管截面积,cm<sup>2</sup>; $\lambda$ 为启动压力梯度,10<sup>-1</sup>MPa/cm。

对式(7)积分并整理有

$$\Delta q = K(p_h - p_f - \lambda L) / \left\{ \mu \cdot \int_L^{\xi} [1/A(\xi)] d\xi \right\} \quad (8)$$

式中: $L$ 为流线长度,cm。 $L$ 和 $A(\xi)$ 取决于井网与裂缝几何特征。

### 2.2 梯形区域产量计算

子单元III区渗流区域为梯形,假设油井裂缝长度是水井裂缝长度的 $k$ 倍,且 $k \neq 1$ ,即 $L_2 = kL_1$ 。在梯形内取微元流管,如图6所示。假设沿水井裂缝方向微元长度为 $\Delta l$ ,油井裂缝微元长度为 $k\Delta l$ ,则流管长度为

$$d_l = [d_1^2 + (1-k)^2 l^2 - 2d_1(1-k)l \cos \alpha_3]^{1/2} \quad (9)$$

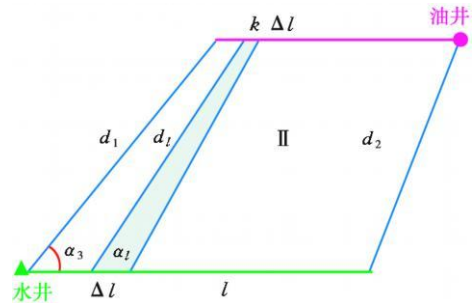


图6 梯形计算单元内微元流管示意图

Fig. 6 Sketch map of infinitesimal flow tube in trapezoid calculation unit

微元流管与裂缝夹角为 $\alpha_i$

$$\sin \alpha = (d_1/d_l) \cdot \sin \alpha_3$$

$$A(\xi) = \Delta l h \left[ \frac{k-1}{d_l} \xi + 1 \right] \sin \alpha$$

代入单流管产量公式(8)得

$$\Delta q = Kh(p_h - p_f - \lambda d_l) \Delta l \cdot \sin \alpha / \mu \cdot d_l \cdot \ln[k/(k-1)] \quad (10)$$

$$dq/dl = Kh(p_h - p_f - \lambda d_l) \sin \alpha / \left\{ \mu \cdot d_l \cdot \ln[k/(k-1)] \right\} \quad (11)$$

对式(11)积分有:

$$q = (Kh/\mu) \int_0^{L_1} (p_h - p_f - \lambda d_l) \sin \alpha / \left\{ d_l \cdot \ln[k/(k-1)] \right\} dl \quad (12)$$

作为梯形的一个特例,当计算单元为平行四边形时,即  $k=1$  的情况下,

$$q = Kh/\mu \cdot \int_0^{l_1} \left\{ [(p_h - p_{f-} - \lambda d_l) \sin \alpha_l] / d_l \right\} dl$$

$$= Kh(p_h - p_{f-} - \lambda d_l) l_1 \sin \alpha_l / \mu d_l \quad (13)$$

### 2.3 三角形区域产量计算

子单元 I 区及 II 区内渗流区域为三角形,取微元流管如图 7 所示。夹角分别为  $\Delta\theta$  和  $\Delta\beta$  并且  $\Delta\beta = \beta \cdot \Delta\theta/\alpha$ ,由式(3)计算出启动角  $\theta_1$  后,用与文献[9]相类似的方法,可计算启动区内产量为

$$q = \int_0^{\theta_1} \frac{Kh}{\mu} \left[ p_h - p_{f-} - \lambda d_l \frac{\sin \theta + \sin \frac{\beta}{\alpha} \theta}{\sin \left( \theta + \frac{\beta}{\alpha} \theta \right)} \right] \cdot$$

$$\left[ \ln \frac{d_1 \sin \frac{\beta}{\alpha} \theta}{r_w \sin \left( \theta + \frac{\beta}{\alpha} \theta \right)} + \frac{\alpha}{\beta} \ln \frac{d_1 \sin \theta}{r_w \sin \left( \theta + \frac{\beta}{\alpha} \theta \right)} \right]^{-1} d\theta \quad (14)$$

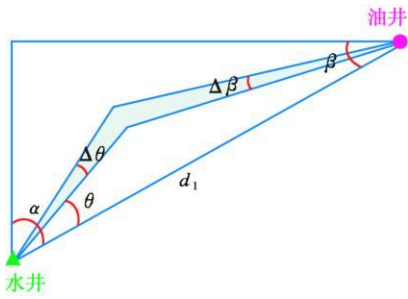


图 7 三角形区域内微元流管示意图

Fig. 7 Sketch map of infinitesimal flow tube in triangular area

## 3 应用实例

运用本文方法与文献[9]中的 ND-I 法分别计算了相同条件下矩形井网与压裂一体化模式与传统的面积井网的启动系数与产量。结果表明,矩形井网与压裂一体化模式更为有效。计算过程中取储层渗透率为  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,启动压力梯度为  $0.06 \text{ MPa/m}$ ,地下流体黏度为  $4 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,地层平均厚度为  $16 \text{ m}$ ,油井裂缝半长为  $120 \text{ m}$ ,水井裂缝半长为  $80 \text{ m}$ ,计算不同井网形式在相同井网密度条件下的产量及启动系数,结果见表 1。

表 1 面积井网与矩形井网开发效果对比

Table 1 Development effect comparison between areal pattern and rectangular pattern

井网形式	初期产量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	井距/ ( $\text{m} \times \text{m}$ )	启动系数
反九点面积井网	0.2	200 × 200	0.20
五点面积井网	0.4	200 × 200	0.74
矩形井网油井压裂	0.4	300 × 133	0.87
矩形井网油水井同时压裂	3.0	300 × 133	1.00

并且对比计算了不同裂缝长度条件下开发效果(图 8)。

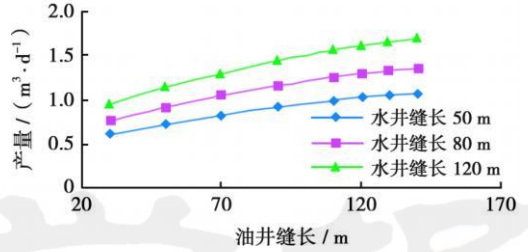


图 8 裂缝半长与产量的关系

Fig. 8 Relations of half fracture length and output

由图 9 可以看出,在井距及裂缝长度保持不变时,随着排距的减小,开发效果明显改善。

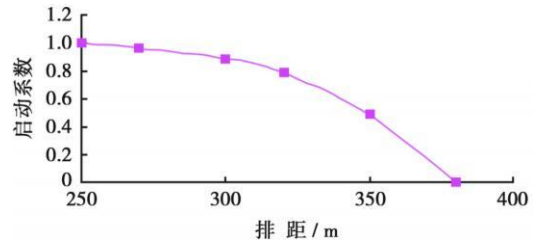


图 9 排距对启动系数影响关系曲线

Fig. 9 Influences of well alignment intervals on startup coefficient

以上计算结果表明:①开发压裂矩形井网开发效果明显好于面积井网,储层动用程度最高。②油水井应同时压裂,水井裂缝半长与油井的影响同样重要。随着裂缝半长的增加,产量与启动系数明显增大。因此,在应用井网与压裂一体化模式开采低渗透储层时,应尽可能在油水井同时产生裂缝。③应根据启动压力梯度设计排距,随着排距的减小,启动系数增大,油井的产量增加。④井距也应在适当情况下予以考虑。当排距不变时,影响油井产量的根本因素是裂缝绝对长度,而不是穿透比。

以州 201 区块为例,该区块储层渗透率平均为  $1.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,根据文献[9]所建立的启动压力梯度与渗透率关系曲线,得到该区启动压力梯度为  $0.068 \text{ MPa/m}$ ,可实现的压裂裂缝长度为  $120 \text{ m}$ 。考虑到砂体发育规模,设计了 3 种井网,分别为  $300 \text{ m} \times 60 \text{ m}$ 、 $360 \text{ m} \times 80 \text{ m}$  和  $400 \text{ m} \times 80 \text{ m}$ 。在试验方案实施过程中,油井和注水井全部实施了压裂,其中  $300 \text{ m} \times 60 \text{ m}$  井网建立了有效驱动体系,油井产量较高,启动系数为 1。

## 4 结论

(1) 对于特低渗透储层,开发压裂与矩形井网一体化开采模式是一种有效手段,通过人工裂缝可增加启动系数和动用程度。

(2) 建立的 ND-II 法可用于低渗透储层低速非达

西情况下开发压裂与矩形井网一体化开发的产量计算和储层动用程度计算,可用于井网和裂缝几何参数的设计。

### 参 考 文 献

- [1] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 12.  
Huang Yanzhang. Percolating flow mechanism of low permeability reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 12.
- [2] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 124-126.  
Li Daopin. Development of low permeability sandstone oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 124-126.
- [3] 葛家理, 宁正福, 刘月田. 现代油藏渗流力学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 58-61.  
Ge Jiali, Ning Zhengfu, Liu Yuetian. The percolating flow mechanics of reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 58-61.
- [4] G·鲍尔·威尔海特. 注水[M]. 刘中民, 译. 北京: 石油工业出版社, 1992: 318.  
Willhite G B. Affusion[M]. Translated by Liu Zhongmin. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992: 318.
- [5] 李道品. 低渗透油田高效开发决策论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 8-9.  
Li Daopin. Effective development technique of low permeability

oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 8-9.

- [6] 王玉普, 计秉玉, 郭万奎. 大庆外围特低渗透特低丰度油田开发技术研究[J]. 石油学报, 2006, 26(6): 70-74.  
Wang Yupu, Ji Bingyu, Guo Wankui. Effective development technique for peripheral reservoirs with ultra-low permeability and ultra-low abundance in Daqing Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 26(6): 70-74.
- [7] 计秉玉, 李莉, 李群. 不同类型储层驱替速度对提高采收率的影响[J]. 石油学报, 2004, 25(3): 58-65.  
Ji Bingyu, Li Li, Li Qun. Effects of displacement rate on enhance oil recovery efficiency in different types of reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(3): 58-65.
- [8] 肖鲁川, 甄力. 特低渗透储层非达西渗流特征研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(5): 27-30.  
Xiao Luchuan, Zhen Li. Non darcy seepage flow characteristic in ultra low permeable reservoirs[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2000, 19(5): 27-30.
- [9] 计秉玉, 李莉, 王春艳. 低渗透油藏非达西渗流面积井网产油量计算方法[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 256-261.  
Ji Bingyu, Li Li, Wang Chunyan. Oil production calculation for areal well pattern of low permeability reservoir with non-Darcy seepage flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(2): 256-261.

(收稿日期 2009-01-09 改回日期 2009-04-17 编辑 黄小娟)

(上接第 577 页)

(2) 开发低渗透油田时应特别注意注水时机, 保持合理的地层压力; 低渗透油田开发一般需要超前注水或早期注水。

(3) 合理的超前注水时机一般在 1 年以内, 合理的压力保持水平为 1.05~1.2; 随着渗透率的减小以及有效厚度、渗透率变异系数的增加, 合理的超前注水时机会逐渐提前。

### 参 考 文 献

- [1] 阮敏, 王连刚. 低渗油田开发与压敏效应[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 73-76.  
Ruan Min, Wang Liangang. Low-permeability oilfield development and pressure-sensitive effect[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(3): 73-76.
- [2] 王道富, 李忠兴, 赵继勇, 等. 低渗透油藏超前注水理论及其应用[J]. 石油学报, 2007, 28(6): 78-81.  
Wang Daofu, Li Zhongxing, Zhao Jiyong, et al. Advance water flooding theory for low-permeability reservoirs and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 78-81.
- [3] 于忠良, 熊伟, 高树生, 等. 致密储层应力敏感性及其对油田开发的影响[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 95-98.  
Yu Zhongliang, Xiong Wei, Gao Shusheng, et al. Stress sensitivity of tight reservoir and its influence on oilfield development[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 95-98.
- [4] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998:

131-135.

Huang Yanzhang. Filtrate mechanism in low permeability reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 131-135.

- [5] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 217-226.  
Li Daopin. The development of the low permeability sandstone oil field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 217-226.
- [6] Bernabe Y. The effective pressure law for permeability in Chelmsford Granite and Barre Granite[J]. Int. J. Rock Mech. Mni. Sci. & Geomech. Abstr., 1986, 23(3): 267-275.
- [7] Walls J D. Effect of pressure and partial water saturation on gas permeability on tight sands: Experimental result[J]. JPT, 1982: 930-936.
- [8] 秦积舜. 变围压条件下低渗透砂岩储层渗透率变化规律研究[J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 2002, 25(5): 28-35.  
Qin Jishun. Variation of the permeability of the low-permeability sandstone reservoir under variable confined pressure[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute: Natural Science Edition, 2002, 25(5): 28-35.
- [9] 张新红, 秦积舜. 低渗岩心物性参数与应力关系的试验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2001, 25(4): 56-60.  
Zhang Xinhong, Qin Jishun. Relation of ground stress with the properties of low permeable core[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2001, 25(4): 56-60.

(收稿日期 2008-10-07 改回日期 2008-12-03 编辑 黄小娟)