

◀ 油气开采 ▶

doi:10.3969/j.issn. 1001-0890. 2013. 02. 018

## 低渗透油藏储层非均质性评价与井网调整新方法

樊兆琪<sup>1</sup>, 程林松<sup>1</sup>, 耿昌浩<sup>2</sup>, 汤云浦<sup>3</sup>, 王晖<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249;2. 中国石油大港油田分公司第一采油厂,天津 300280;3. 中国石油冀东油田分公司井下作业公司,河北唐山 063200)

**摘要:**为了进一步改善低渗透油藏非均质储层的注水开发效果,应用油藏工程方法研究了渗透率非均质性与注水开发井网几何形式的耦合作用,引入了渗流因子及渗流因子变异系数,提出了低渗透油藏非均质储层注水井偏移的井网调整新方法,并应用黑油模型数值模拟技术对其进行适应性评价。将注水井沿井排方向偏移一定距离,井组内渗流因子变异系数降低,且随着砂体渗透率级差的增大、井网内横切比的减小,注水井向低渗砂体方向的偏移距离逐渐增大。注水井偏移最佳距离后,井组产油能力提高了 5.6%,含水率下降了 3.7%,明显提高了水驱开发效果。提出的非均质性评价方法及注水井最佳偏移量计算式,为低渗透非均质储层注水开发时的井网调整提供了新思路。

**关键词:**低渗透油藏 非均质油藏 砂体 注水井 井网调整

中图分类号:TE348 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2013)02-0093-06

### A New Approach for Heterogeneity Evaluation and Well Pattern Adjustment in Low Permeability Reservoirs

Fan Zhaoqi<sup>1</sup>, Cheng Linsong<sup>1</sup>, Geng Changhao<sup>2</sup>, Tang Yunpu<sup>3</sup>, Wang Hui<sup>1</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. 1st Oil Production Plant of Dagang Oilfield Branch, Tianjin, 300280, China; 3. Downhole Services Company of Jidong Oilfield, Tangshan, Hebei, 063200, China)

**Abstract:** To improve water flooding results in low permeability reservoirs, a new approach used to identify heterogeneous formations for well pattern adjustment was proposed in this paper. The coupling effect of permeability heterogeneity and the geometry of water flooding well pattern had been studied by using reservoir engineering method. In the research, two new factors, seepage factor and variable coefficient of seepage factor, were introduced, then the new method for well pattern adjustment and injector offset were derived from the analysis of the seepage process, its adaptability was evaluated by black oil numerical simulation. The variable coefficient of seepage factor decreases as the increase of injector offset from the orientation of well row. Furthermore, the distance of injector offset is going to be longer as the crosscutting ratio of well pattern goes down and the permeability difference of sand body rises. The production of the well group increased 5.6% and water cut decreased 3.7% after the optimal distance of injector offset, resulting in a significant improvement in water flooding. The proposed approach for heterogeneity evaluation and the formula calculating optimal injector offset provide new ways for well pattern adjustment in heterogeneous and low permeability reservoirs.

**Key words:** low permeability pools; heterogeneous reservoirs; sand body; water injection well; well pattern adjustment

储层非均质性是影响低渗透油藏注水开发效果的关键因素,如何在非均质储层布井及制定怎样的开发对策,一直是低渗透油藏注水开发中的重要工作<sup>[1-7]</sup>。针对低渗透油藏非均质储层,国内外在井网部署、井网调整方面开展了大量研究,确定了低渗透油藏菱形反九点井网、矩形井网、交错排状井网等注水开发井网以及井网加密等井网调整方法<sup>[3,8-15]</sup>。但现有低渗透油藏储层非均质性评价方法未考虑渗

收稿日期:2012-10-18;改回日期:2013-01-24。

作者简介:樊兆琪(1987—),男,山东聊城人,2008 年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,在读博士研究生,主要从事提高低渗透油藏波及系数方面的研究。

联系方式:(010)89733726,fzq668@foxmail.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“特低渗透油藏天然缝与人工缝耦合作用的渗流机理与模型”(编号:51174215/E0403)和国家科技重大专项子课题“低渗透裂缝性油藏渗透介质形变渗流规律理论表征”(编号:2011ZX05009-004-002)资助。

透率的空间分布,而渗透率空间分布是影响开发井网部署及后期调整的重要因素。为此,笔者从低渗透油藏砂体非均质性出发,考虑渗透率空间分布与井网参数的耦合作用,重新定义了储层非均质性评价指标——渗流因子;通过分析非均质储层井间的渗流问题,提出了注水井偏移改善井间渗流因子分布、提高井网产能的井网调整方法。

## 1 砂体非均质模式

长庆油田低渗透油藏具有典型的非均质特征,且其低渗透油藏多为三角洲沉积,其中三角洲相、三角洲前缘亚相较发育。三角洲前缘亚相又可细分为水下分流河道、河口坝、水下天然堤、支流间湾等。不同沉积相或砂体之间储层物性差异较大,流体在不同砂体内的渗流规律不同,而实际低渗透油藏通常由多类砂体组成,所以注水开发时的井网部署或井网调整必须考虑低渗透储层砂体不连续分布的影响。

基于长庆油田低渗透油藏主力开发层系长 8 储层的渗透率分布(见图 1)、长 6 储层沉积相砂体的平面分布(见图 2),以低渗透砂体与注水井网的相对位置为标准,将注水井网划分为嵌入型和横切型 2 种类型。若注水井网完全处于某一类砂体内则为嵌入型井网,如图 3(a)中井网 A 与井网 B;若注水井网同时贯穿两类、多类砂体或沉积相,则为横切型井网,见图 3(b)中井网 C。嵌入型井网的开发效果只与对应砂体内的物性相关,砂体物性好则井网开发效果好,砂体物性差则井网开发效果差。横切型井网内同时发育两类或多类砂体,井网的开发效果取决于井网贯穿的砂体数目、砂体间物性差异以及

各类砂体所占比例。

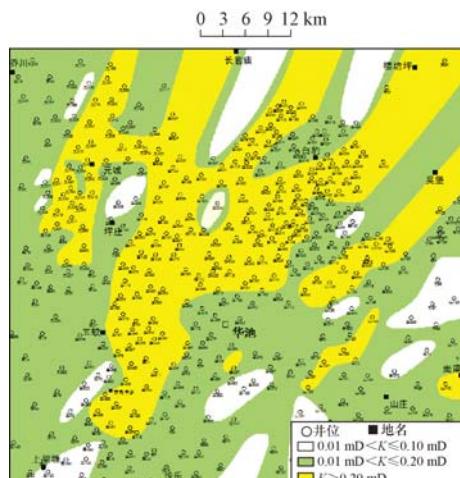


图 1 长 8 储层渗透率分布  
Fig. 1 Permeability distribution in Chang 8 layer

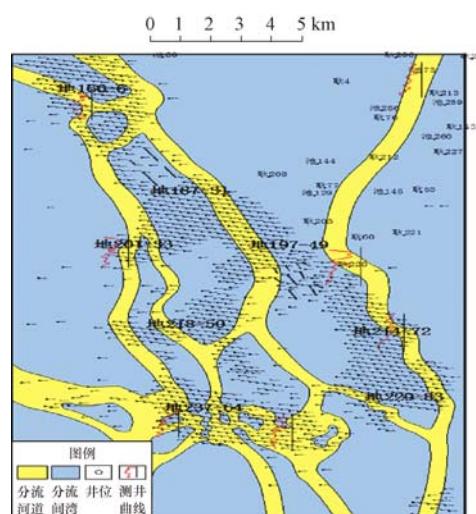


图 2 长 6 储砂体分布  
Fig. 2 Sand body distribution in Chang 6 layer

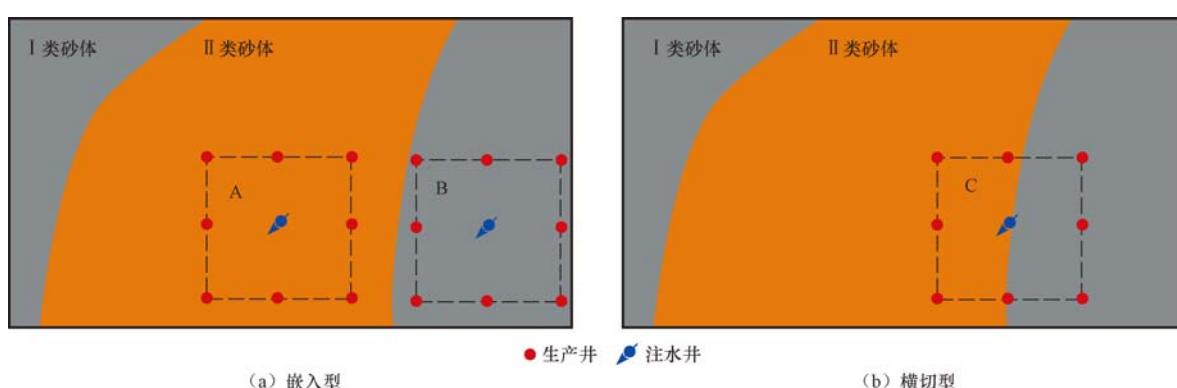


图 3 砂体与注水井网相对关系示意  
Fig. 3 Schematic diagram of correlation between sand body and injection well pattern

## 2 非均质性评价指标

低渗透油藏成藏环境复杂, 储层非均质性较强。目前常用的非均质性量化评价参数主要是渗透率变异系数。渗透率变异系数表征某区域内储层渗透率的不均匀程度, 为标量, 只反映渗透率的大小波动, 不能反映渗透率在空间上的分布。

为了更加有效地注水开发低渗透油藏, 部署注水井网时不仅要考虑储量、渗透率等物性参数的大小, 还要考虑渗透率空间分布。可以说低渗透油藏注水开发井网部署是注水井网与储层物性在空间上匹配的过程, 匹配程度高则井网开发效果好, 匹配程度低则井网开发效果差。显然, 渗透率变异系数不能满足评价注水井网与储层渗透率空间分布之间匹配程度的要求。

由达西定律可知, 油井产能与渗透率成正比, 与压力源的距离成反比。在注水开发井网中考虑不同位置处节点与注水井的相对距离, 定义渗流因子为:

$$K_{l_i} = \frac{K_i}{l_i} \quad (1)$$

式中:  $K_{l_i}$  为渗流因子,  $\text{mD}/\text{m}$ ;  $K_i$  为储层某点处的渗透率,  $\text{mD}$ ;  $l_i$  为储层某点到注水井的距离,  $\text{m}$ 。

利用式(1)可将储层渗透率分布与井网几何形式相联系, 从而计算得到储层渗流因子分布。储层渗流因子反映了注水井网与储层渗透率分布的耦合作用, 其不均匀程度可以用于评价注水井网与储层渗透率分布的匹配程度。由渗透率变异系数计算式<sup>[16]</sup>, 可以得到基于渗流因子的渗流因子变异

系数:

$$V_{KL} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{l_i} - \bar{K}_{l_i}) / n}{\bar{K}_{l_i}}} \quad (2)$$

式中:  $V_{KL}$  为渗流因子变异系数;  $\bar{K}_{l_i}$  为注采井连线上各节点渗流因子的平均值,  $\text{mD}/\text{m}$ ;  $n$  为储层渗透率节点数量。

结合网格划分与精细地质建模技术, 可以得到注水井网内的渗透率节点数量  $n$  以及各节点对应的绝对渗透率, 进而计算出注水井网内的渗流因子分布以及渗流因子变异系数。为便于计算, 在拥有完整各油井岩心测试资料或测井资料的情况下,  $n$  可取为注水井网内油井数量, 通过各油井与注水井间的渗流因子计算注水井网内的渗流因子变异系数, 以评价注水井网与储层非均质性的匹配程度。

为了评价式(2)的适用性, 选取长庆油田某油藏不同非均质区块的储层参数建立了 4 个数值模拟模型。这 4 个模拟模型均为正方形反九点井网, 水驱开发, 除初始渗透率场不同外, 其余均相同。

选取水驱波及系数为评价指标, 通过计算 4 个数值模型的渗透率变异系数与渗流因子变异系数, 得到了水驱波及系数与渗透率变异系数和渗流因子变异系数的关系图版(见图 4)。由图 4 可知, 渗流因子变异系数与水驱波及系数的相关系数(0.918 5)远大于渗透率变异系数与水驱波及系数的相关系数(0.142 9), 即相比渗透率变异系数, 渗流因子变异系数更适用于评价储层渗透率与注水井网耦合作用对井网开发效果的影响。

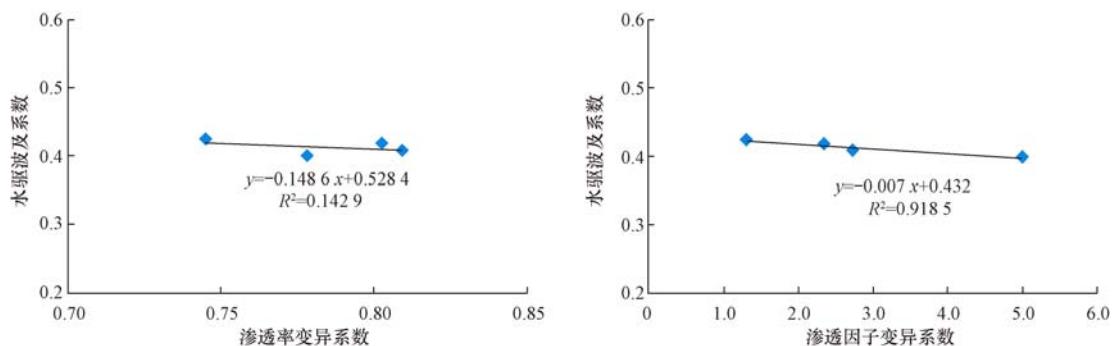


图 4 渗透率变异系数与渗流因子变异系数对比

Fig. 4 Comparison of permeability and seepage factor variable coefficient

## 3 非均质性储层井网调整方法

由式(1)可知, 可以通过调整注采井间的距离来

调整注水井网内的渗流因子分布, 进而获得更好的注水开发效果。笔者以贯穿多类砂体的横切型井网为例研究注采井网内的渗流因子分布优化问题。假设正方形反九点井网贯穿 2 类砂体, 此时注采井间

的距离为 1 口注水井与 8 口采油井之间的距离, 为便于计算, 此处通过调整注水井的位置达到优化渗流因子分布的目的。取正方形反九点井网的上半部分为研究单元, 如图 5 所示。

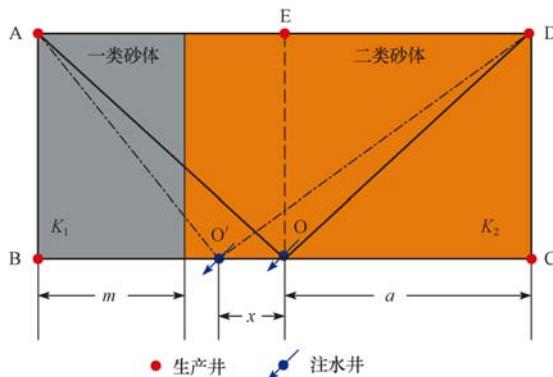


图 5 1/2 正方形反九点井网注水井调整示意

Fig. 5 Schematic diagram of injector adjustment in half square inverted nine-spot well pattern

图 5 中, 正方形井网井排距为  $a$ , 一类砂体宽度为  $m$ , 两类砂体的渗透率级差  $K_2/K_1 = n_K$ 。基于流管法理论, 注采井网内平面流动由若干个连接注采井的单元流管组成, 且单元流管内的流动为线性流<sup>[17]</sup>, 则不同位置处的油井产量可用线性流达西公式近似表示为:

$$q_{oi} = \frac{KA}{L_{oi}} \frac{\Delta p_{oi}}{\mu} \quad (i = A, B, C, D, E) \quad (3)$$

式中:  $q_{oi}$  为油井产量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $K$  为渗透率,  $\text{D}$ ;  $A$  为渗流截面积,  $\text{cm}^2$ ;  $\Delta p_{oi}$  为注采压差,  $10^{-1} \text{ MPa}$ ;  $L_{oi}$  为注采井距,  $\text{m}$ ;  $\mu$  为流体黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

由渗流因子变异系数与注水井网开发效果的关系知, 注水井网开发效果最大化等价于渗流因子变异系数最小化, 即渗流因子分布越均匀则注水井网开发效果越好。如图 5 所示, 注水井 O 与油井 B 之间存在两类砂体, 而与油井 C 之间存在一类砂体。由正方形反九点井网的对称性可知, 注入水同时达到油井 B 与油井 C 时, 注水开发效果最好。由式(3)可知, 井网内压差相等、流体黏度不变、渗流截面积相等的情况下, 油井产量只与渗流因子相关, 若井间渗流因子相等, 则对应油井产量相等, 此时油井产量最大。

假设注水井移动距离为  $x$ , 向左移动为正值, 向右移动为负值。将注水井移动分为  $x + m \leq a$  和  $x + m > a$  2 种情况。

1)  $x + m \leq a$  时。根据式(1)分别计算  $O'B$ 、 $O'C$  之间的渗流因子,  $O'B$  之间存在两类砂体, 参考等值

渗流阻力法<sup>[18]</sup> 处理后可得注水井最佳偏移距离计算式:

$$\frac{K_{O'B}}{L_{O'B}} = \frac{\frac{K_2}{a-x-m} \frac{K_1}{m}}{\frac{K_2}{a-x-m} + \frac{K_1}{m}} = \frac{K_2}{a+x} = \frac{K_{O'C}}{L_{O'C}} \quad (4)$$

式(4)变形后整理得:

$$x = \frac{m(n_K - 1)}{2} \quad (5)$$

将式(5)代入  $x + m \leq a$ , 整理得:

$$m \leq \frac{2a}{n_K + 1} \leq 2a \quad (6)$$

由式(6)和图 5 可看出,  $x + m \leq a$  的情况合理。利用式(5)可计算得到不同级差、不同规模的两个砂体内注水开发井网的注水井最佳偏移距离。

2)  $x + m > a$  时。根据式(1)分别计算  $O'B$ 、 $O'C$  之间的渗流因子,  $O'C$  之间存在两类砂体, 参考等值渗流阻力法处理后可得注水井最佳偏移距离计算式:

$$\frac{K_{O'B}}{L_{O'B}} = \frac{K_1}{a-x} = \frac{\frac{K_1}{m+x-a} \frac{K_2}{2a-m}}{\frac{K_1}{m+x-a} + \frac{K_2}{2a-m}} = \frac{K_{O'C}}{L_{O'C}} \quad (7)$$

式(7)变形后整理得:

$$x = \frac{(m-2a)(n_K - 1)}{2n} \quad (8)$$

将式(8)代入  $x + m > a$ , 整理后得到:

$$m > \frac{2a(4n_K - 1)}{3n_K - 1} > 2a \quad (9)$$

由式(9)和图 5 可看出,  $x + m > a$  的情况不合理。

针对井排距为 330 m 的正方形反九点井网, 取  $x + m = a$  的特殊情况, 可得到该井网注水井调整理论图版, 如图 6 所示。图 6 中, 横切比为正方形反九

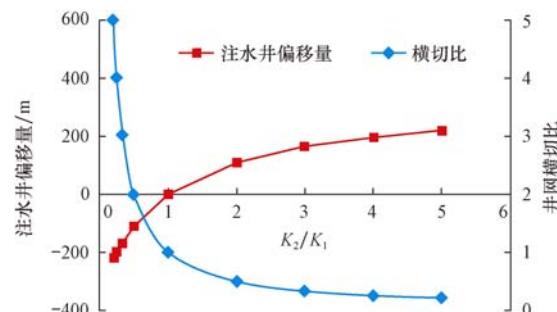


图 6 330 m 井距正方形井网调整图版

Fig. 6 Adjustment chart of square well pattern with 330 m well-spacing

点井网内一类砂体宽度与二类砂体宽度之比。随着两类砂体渗透率级差的增大,最佳布井方案对应井网横切比逐渐减小,注水井的偏移距离逐渐增大。井网内横切比越小,低渗砂体的所占比例越小,注水井向低渗砂体方向偏移距离越大,以更好地调整井组内的渗流因子分布,减小渗流因子变异系数。

## 4 适用性论证

应用数值模拟手段,以长庆油田某低渗透油藏的储层参数为基础建立了适用性评价模型。模型参数为:网格步长 10 m,网格数  $67 \times 67 \times 1$ ;一类砂体渗透率 0.8 mD,二类砂体渗透率 2.4 mD;井网横切比 2:9;孔隙度 14.4%;油相密度 0.8569 kg/L;原始含油饱和度 45%;注水井定注入量,生产井定压生产。

将模型参数代入式(5)可得到注水井理论最佳偏移距离为:

$$x = 120 \text{ m} \quad (10)$$

以注水井无偏移为基础模型,设计偏移距离为 50,80,120 和 150 m 的 4 个模型,模拟时间为 10 年。以井组日产油量、含水率为对比指标,模拟结果见图 7。在渗透率级差为 3、井网横切比为 2:9(即一类砂体宽度 120 m,二类砂体宽度 540 m)的条件下,注水井偏移能有效增加日产油,降低含水率,且日产油量随着注水井偏移距离的增大而增大,在 120 m 处达到峰值,超过 120 m 后日产油量开始降低;井组含水率随着注水井偏移距离的增大而降低,在 120 m 处达到最低值,超过 120 m 后含水率开始上升,即注水井的最佳偏移距离为向左 120 m。可行性评价模型优化结果与所建公式的计算值吻合,证明了注水井最佳偏移距离计算式的适用性。

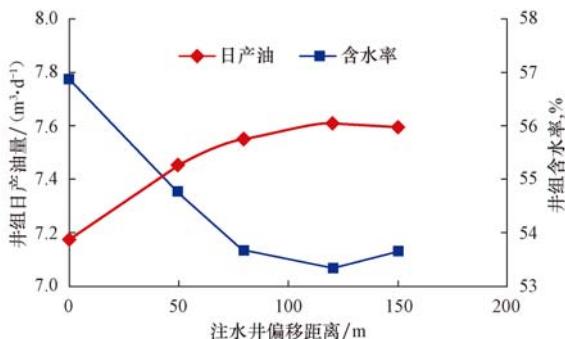


图 7 注入井偏移距离优化数值模拟结果

Fig. 7 Optimization of injector offset distance by numerical simulation

## 5 结 论

1) 以低渗透砂体与注水井网的相对位置为标准,可将注水井网划分为嵌入型注水井网和横切型注水井网。

2) 渗流因子能够充分反映低渗透油藏储层渗透率与注水井网几何形式的耦合作用对注水开发效果的影响;相比渗透率变异系数,渗流因子变异系数与井网开发效果相关性更强。

3) 在低渗透油藏横切型注水开发井网中,注水井偏移能调整渗流因子分布以改善注水开发效果,结合渗流因子定义及流管法理论,建立了注水井最佳偏移距离与砂体大小、砂体渗透率级差的关系式,并通过数值模拟模型评价了所建关系式的适用性。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 候建锋.安塞特低渗透油藏合理开发井网系统研究[J].石油勘探与开发,2000,27(1):72-75.  
Hou Jianfeng. Reasonable well pattern study for ultra-low permeability reservoirs in Ansai oil field, Changqing oil complex[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(1): 72-75.
- [2] 葛家理,王德民,曲德斌.水平井与直井联合面积布井的开发理论研究(二):七点法面积井网[J].石油勘探与开发,1995,22(2):47-50.  
Ge Jiali, Wang Demin, Qu Debin. A combination of vertical and horizontal wells, in a 7-spot well pattern[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(2): 47-50.
- [3] 史成恩,李健,雷启鸿,等.特低渗透油田井网形式研究及实践[J].石油勘探与开发,2002,29(5):59-61.  
Shi Chengen, Li Jian, Lei Qihong, et al. Research and practice on well-pattern type of ultra-low permeability oil field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(5): 59-61.
- [4] 李松泉,唐曾熊.低渗透油田开发的合理井网[J].石油学报,1998,19(3):52-55.  
Li Songquan, Tang Zengxiong. The reasonable well pattern for developing low permeability oil fields[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(3): 52-55.
- [5] Parekh B, Kabir C S. Improved understanding of reservoir connectivity in an evolving waterflood with surveillance data[R]. SPE 146637, 2011.
- [6] Schmalz J P, Rahme H D. The variation of waterflood performance with variation in permeability profile [J]. Production Monthly, 1950, 15(9): 9-12.
- [7] Ohms D, McLeod J, Graff C J, et al. Incremental oil success from waterflood sweep improvement in Alaska [R]. SPE 121761, 2009.

- [8] 罗万静. 混合井网渗流理论及优化布井[D]. 中国地质大学(北京)能源学院, 2009.
- Luo Wanjing. Theory of fluid porous flow for mixed well patterns and its application in well spacing optimization[D]. China University of Geosciences (Beijing), School of Energy Resource, 2009.
- [9] 贾元元. 低渗透油藏注水开发井网适应性研究[D]. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 2010.
- Jia Yuanyuan. The research on adaptability of well pattern about water injection in low permeability reservoir[D]. China University of Petroleum(Huadong), School of Petroleum Engineering, 2010.
- [10] 李道品, 罗迪强. 低渗透油田开发的特殊规律[J]. 断块油气田, 1994, 1(4): 30-35.
- Li Daopin, Luo Diqiang. The special development law of low permeability oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1994, 1 (4): 30-35.
- [11] 鲜成钢, 程浩, 郎兆新, 等. 低渗透油田井网模式研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1999, 23 (2): 51-54.
- Xian Chenggang, Cheng Hao, Lang Zhaoxin, et al. Well patterns for low permeability oilfield[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 1999, 23 (2): 51-54.
- [12] 闫宝珍, 许卫, 陈莉, 等. 非均质渗透率油藏井网模型选择[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(6): 51-53.
- Yan Baozhen, Xu Wei, Chen Li, et al. Selection of well pattern model for a permeability heterogeneous reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(6): 51-53.
- [13] 曹仁义, 程林松, 薛永超, 等. 低渗透油藏井网优化调整研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(4): 67-69.
- Cao Renyi, Cheng Linsong, Xue Yongchao, et al. Well pattern optimization adjustment for low permeability oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(4): 67-69.
- [14] 王友启. 胜利油田高含水期油藏水驱精细调整技术方向[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(1): 101-104.
- Wang Youqi. Fine adjustment direction of water flooding in high-water cut oil reservoirs of Shengli Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(1): 101-104.
- [15] 曲瑛新. 低渗透砂岩油藏注采井网调整对策研究[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(6): 84-89.
- Qu Yingxin. Adjustment strategy of injection-production patterns for low permeability sandstone reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(6): 84-89.
- [16] 俞启泰, 赵明, 林志芳. 水驱砂岩油田驱油效率和波及系数研究(二)[J]. 石油勘探与开发, 1989, 16(3): 46-52.
- Yu Qitai, Zhao Ming, Lin Zhifang. A study of the displacement efficiency and the conformance factor in waterflooded sandstone reservoirs in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 1989, 16(3): 46-52.
- [17] 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.
- [18] 李松泉, 程林松, 李秀生, 等. 特低渗透油藏非线性渗流模型[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 606-612.
- Li Songquan, Cheng Linsong, Li Xiusheng, et al. Non-linear seepage flow models of ultra-low permeability reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 606-612.

## 2013年第1期《国外现代油气井设计的一些新进展》勘误

本刊 2013 年第 1 期《国外现代油气井设计的一些新进展》一文中, 因为制图、翻译及校对中的疏漏, 出现了一些错误, 在此向作者和读者致歉! 更正如下:

1. 第 2 页右栏, “1.3 数据建模”下面第 4 行“待定的套管柱下人深度”应改为“压力数据测点深度”;
2. 第 3 页左栏, 倒数第 2 行第 1 字“前”应改为“初”;
3. 第 4 页左栏, 图 2(b)中, 井口内爆载荷线和套管鞋处压力线在有红点的竖直线以左的部分均应为实线;
4. 第 4 页左栏, 图 2(c)中, 套管鞋处压力线应为土黄色, 与图 2(a)及图 2(b)中的套管鞋压处压力线颜色相同;
5. 第 5 页左栏, 倒数第 2、第 3 行, “美国 BP 公司墨西哥湾 Macondo 井……, 该公司……”应为“位于美国墨西哥湾的 Macondo 井……, BP 公司……”;
6. 第 5 页右栏, 图 3(b)的右图中, “油管外压力”应为“套管外压力”, “油管内爆载荷”应为“套管内爆载荷”;
7. 第 5 页右栏, 图 3 的英文图题应该为“Pressure caused by casing full of gas or leakage of tubing failures”。
8. 英文摘要、关键词及英文图名中, 表示“溢流”的单词“spill”均应为“kick”。