

◀ 油气开采 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2012.04.018

## 油藏注水开发后期窜流通道定量识别方法

郑 强<sup>1</sup>, 刘慧卿<sup>1</sup>, 李 芳<sup>2</sup>, 张 杰<sup>1</sup>, 张 波<sup>3</sup>

(1. 石油工程教育部重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249; 2. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249; 3. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院, 山东东营 257015)

**摘 要:** 窜流现象是油藏注水开发后期提高采收率面临的技术难题。为了能够更精确地识别窜流通道的大小, 提高水驱采收率, 提出了一种利用动态数据定量研究窜流通道的方法。首先根据油井生产动态曲线识别水窜井, 然后根据不同组合情况下注采井之间的相关系数来判断窜通关系, 最后利用建立的窜通体积与注采量的关系式计算窜通体积。利用该方法对某区块 57220 井区的 57217 井进行了系统分析, 并进一步分析了整个区块的水窜情况, 得到了其窜流通道分布和对应窜通体积。研究发现, 水窜的发生不仅仅局限于井组内, 还可能发生在不同井组的注采井之间。窜流通道大小的准确确定, 可为调堵措施的实施提供依据。

**关键词:** 窜流通道 定量分析 窜通体积 动态数据 相关系数

**中图分类号:** TE357.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)04-0092-04

## Quantitative Identification of Breakthrough Channel in Water Flooding Reservoirs at Later Stage

Zheng Qiang<sup>1</sup>, Liu Huiqing<sup>1</sup>, Li Fang<sup>2</sup>, Zhang Jie<sup>1</sup>, Zhang Bo<sup>3</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering (China University of Petroleum(Beijing)), Beijing, 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting(China University of Petroleum(Beijing)), Beijing, 102249, China; 3. Geoscience Research Institute of Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying, Shandong, 257015, China)

**Abstract:** Water breakthrough is one of the main barriers for EOR of reservoirs by water flooding at later stage. In order to enhance oil recovery in water flooding reservoirs, and to identify the breakthrough channels precisely, a method to study the water breakthrough channels quantitatively with dynamic data has been shown in this paper. First, water breakthrough wells can be identified through curves of dynamic data, and then, breakthrough relations can be determined according to the correlation factors between injection and production wells under different conditions. Lastly, breakthrough channel volumes can be obtained by building a model between breakthrough volume and injection-production rates. Well 57217 in Block 57220 in Karamay Oilfield has been analyzed by this method systematically. The distribution of water breakthrough channels of the whole block has been further analyzed and the volumes of the water breakthrough channels have been calculated. According to study, water breakthrough may be found not only inside a well group limitedly, but also can be found between wells in different injection-production well groups. The quantitative identification of water breakthrough channels provided a theoretical basis for measures of formation section control and water shutoff.

**Key words:** breakthrough channel; quantitative analysis; breakthrough volume; dynamic data; correlation factor

油藏经过多年的注水开发后, 岩石的胶结作用减弱, 储层非均质性不断加剧, 容易产生窜流通道, 注入水沿窜流通道低效或无效循环, 导致波及范围小, 驱油效率低, 严重影响原油采收率及开发效益<sup>[1-4]</sup>。目前, 国内外研究窜流通道的方法主要有电

收稿日期: 2011-10-14; 改回日期: 2012-06-16。

作者简介: 郑强(1986—), 男, 山东济宁人, 2008年毕业于中国石油大学(华东)数学与应用数学专业, 现为油气田开发工程专业在读博士研究生, 从事油藏工程计算和油藏数值模拟等方面的研究。

联系方式: zqcup2010@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“油田开采后期提高采收率新技术”(编号: 2011ZX05009-004)部分研究内容。

缆测井、地层对比、地球化学、压力测试及使用示踪剂等<sup>[5-7]</sup>, 这些方法大都成本较高, 且很难定量识别窜流通道。在油田开发过程中, 动态数据非常容易获得, 并且能够很好地反映注采井间的窜通关系, 利用动态数据研究窜流通道, 不但可以大大降低成本, 而且能够定量描述窜流通道大小。Anh Dinh 等人<sup>[8]</sup>根据井底压力数据用多元线性回归方法来计算, Alejandro Albertoni 等人<sup>[9]</sup>根据注采量用多元线性回归方法来计算, A. A. Yousef 等人<sup>[10]</sup>应用 CM 方法通过注采量来计算。在这些方法中, 油井周围的所有水井都参与计算, 不仅增加了计算量, 还增加了不窜通井对结果的干扰, 降低了计算精度, 并且模型中某些参数不易求得。笔者利用动态数据, 首先采用相关系数法确定注采井的窜通关系, 剔除不窜通井, 然后建立模型求得窜通系数和井间窜通体积, 并利用新的求解方法避开了较难求得的参数。该方法可以定量描述注采井间的窜通关系, 为调堵措施的实施提供依据, 具有很好的适用性。

## 1 窜通关系识别

对某一生产井而言, 当其周围存在窜流通道时, 主要表现为: 1) 出现窜流通道的层位在产液剖面上表现为比未出现窜流通道的邻层相对产液量高许多倍<sup>[11-13]</sup>; 2) 产水量和含水率突然上升, 并且随着注水时间的延长会持续上升; 3) 其周围有一口或多口注入井注水量增加, 注入压力下降。

生产井发生水窜后, 由于窜流通道渗流阻力远远小于地层中其他部分的渗流阻力, 注水井向生产井方向注入的水基本经窜流通道由生产井产出, 并且通道中原油基本为残余油状态, 流动近似于单相流, 此时生产井的产水量绝大部分来自周围及与其窜通的注水井, 并且产水量的变化与注水量的变化有很强的相关性。如果多口注水井与一口生产井同时窜通, 那么多口注水井总注水量变化与生产井产水量变化的相关系数要大于任何一口注水井注水量变化与生产井产水量变化的相关系数。

在油藏水驱开采后期, 假设一口生产井窜通  $n$  天中, 产水量分别为  $q_{w,1}, q_{w,2}, \dots, q_{w,n}$ , 其周围有  $m$  口井在同时注水, 注水量分别为  $i_{k,1}, i_{k,2}, \dots, i_{k,n}$ , 其中  $k=1, 2, \dots, m$ , 则共有  $2^m-1$  种可能的窜通关系。为了确定窜通关系, 需要求出每种情况下所有窜通井总注水量变化与生产井产水量变化的相关系数, 计算公式为:

$$\rho(\Delta I_s, \Delta q_w) = \frac{\text{Cov}(\Delta I_s, \Delta q_w)}{\sqrt{D(\Delta I_s) D(\Delta q_w)}} \quad (1)$$

$$(s = 1, 2, \dots, 2^m - 1)$$

$$\Delta I_{s,j} = I_{s,j+1} - I_{s,j} \quad (j = 1, 2, \dots, n-1) \quad (2)$$

$$\Delta q_{w,j} = q_{w,j+1} - q_{w,j} \quad (j = 1, 2, \dots, n-1) \quad (3)$$

式中:  $I_{s,j}$  为第  $s$  种情况下在第  $j$  天所有窜通井的总注水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $q_{w,j}$  为生产井第  $j$  天的产水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

求出所有相关系数的最大值, 所对应的窜通关系即为实际的窜通关系。

## 2 窜通体积的确定

水井的注水量和油井的产液量之差造成了地层压力的变化, 当注入量大于产液量时, 地层压力升高; 反之, 地层压力降低。在一注一采的注采系统中, 当注采井之间发生窜流后, 生产井含水率基本接近 100%, 注采量和地层平均压力之间的关系可表示为<sup>[14]</sup>:

$$c_t V_p \frac{d\bar{p}(t)}{dt} = i(t) - q_w(t) \quad (4)$$

式中:  $c_t$  为地层总的压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $V_p$  为注采井间的窜通体积,  $\text{m}^3$ ;  $\bar{p}$  为平均地层压力,  $\text{MPa}$ ;  $t$  为生产时间,  $\text{d}$ ;  $i(t)$  为第  $t$  天的注水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $q_w(t)$  为第  $t$  天的产水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

注水井的日注水量可以表示为:

$$i(t) = I_w [p_{\text{wfi}}(t) - \bar{p}(t)] \quad (5)$$

式中:  $I_w$  为吸水指数,  $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ ;  $p_{\text{wfi}}(t)$  为第  $t$  天的注入压力,  $\text{MPa}$ 。

将式(5)代入式(4)得:

$$q_w(t) = i(t) - \frac{c_t V_p}{I_w} \frac{di(t)}{dt} + c_t V_p \frac{dp_{\text{wfi}}(t)}{dt} \quad (6)$$

在油田实际开发中, 当一口生产井与  $m_1$  口注水井窜通时, 式(6)可以写成:

$$q_w = \sum_{j=1}^{j=m_1} \lambda_j \left[ i_j - \frac{c_t V_{pj}}{I_{wj}} \frac{di_j}{dt} + c_t V_{pj} \frac{dp_{\text{wfi},j}}{dt} \right] \quad (7)$$

式中:  $i_j$  为第  $j$  口注水井的日注水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $\lambda_j$  为第  $j$  口注水井与生产井的窜通系数;  $V_{pj}$  为第  $j$  口注水井与生产井的窜通体积,  $\text{m}^3$ ;  $I_{wj}$  为第  $j$  口注水井的吸水指数,  $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ 。

假设选取  $n$  组动态数据, 则式(7)共有  $2m_1$  个未知量, 包括  $m_1$  个窜通系数和  $m_1$  个窜通体积,  $n$  个方程和  $n$  个动态数据点。当动态数据组数  $n \geq 2m_1$  且数据有较明显波动时, 利用最小二乘法可以求解式(7)。

### 3 动态资料的选取原则

在求解过程中,涉及的资料包括注水井的注入压力、注水量和生产井的产水量。而在生产过程中,不可避免地要对注采井采取各种操作,也就有了人为因素的影响,会严重影响计算结果。因此,要尽可能选取水窜后无人为因素干扰的时间段,采样周期最好与油田最小时间间隔的生产报表一致,这样计算结果的精度较高。

### 4 实例应用

克拉玛依油田某独立区块 57220 井区的井位分布如图 1 所示。生产井 57217 井周围有 4 口注水井,分别为 57211、57213、57216 和 57221 井。

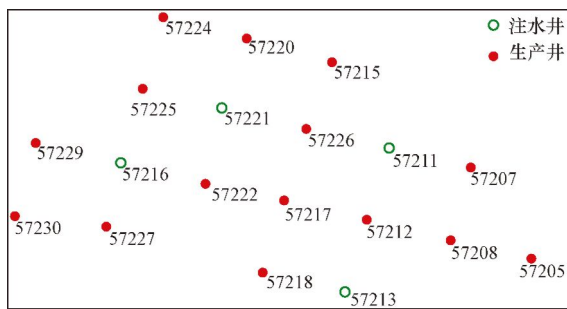


图 1 57220 井区的井位分布

Fig. 1 Well distribution in 57220 Field

2002 年 11 月到 2004 年 10 月,57217 井的井口含水率一直保持在 98% 以上,符合水窜特征,可判定该井已经发生水窜。注水井注水量变化曲线和生产井产水量变化曲线如图 2 所示。57217 井根据动态资料选取原则选取动态数据,利用式(1)进行判

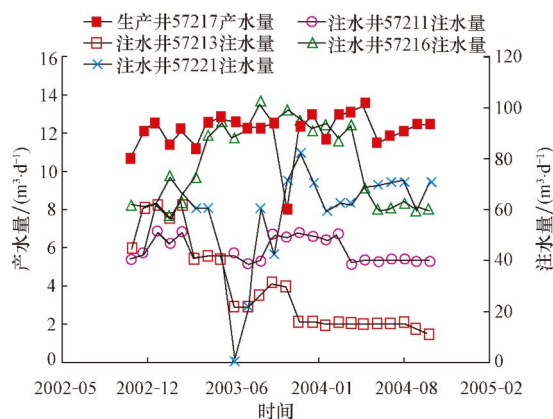


图 2 注水量和产水量的变化关系

Fig. 2 Variable curve of water injection and water production

断,得到各种组合情况下注水量变化和产水量变化的相关系数(见表 1)。

表 1 注水量变化和产水量变化的相关系数

Table 1 The correlation factors of water injection and water production under different conditions

组合情况	相关系数	组合情况	相关系数
57211	0.300	57213+57221	-0.049
57213	0.056	57216+57221	-0.149
57216	-0.189	57211+57213+57216	0.034
57221	-0.086	57211+57213+57221	0.024
57211+57213	0.182	57211+57216+57221	-0.073
57211+57216	0.004	57213+57216+57221	-0.111
57211+57221	0.006	57211+57213+	-0.043
57213+57216	-0.105	57216+57221	

从表 1 可以看出,57217 与 57211 井的动态数据相关系数最大,故 57217 井产水主要来自于 57211 井,这 2 口井之间形成了窜流通道。通过式(7)可以求得窜通系数为 0.113,窜通体积为 214.32 m<sup>3</sup>。

通过该方法可以得到其他窜通井周围的窜通情况,进而得到各注采井间的窜通体积(见表 2)和整个 57220 井区的窜流通道分布图(见图 3)。

表 2 57220 井区注采井间的窜通体积

Table 2 The breakthrough volumes of water between injection and production wells in 57220 Field

采油井	注采井间窜通体积/m <sup>3</sup>			
	57211	57213	57216	57221
57205	0	0	0	0
57207	0	274.94	0	0
57208	0	0	0	0
57212	0	229.83	0	0
57215	362.65	0	0	229.95
57217	214.32	0	0	0
57218	0	0	0	0
57220	0	0	0	206.02
57222	0	0	0	0
57224	0	0	0	312.84
57225	0	0	433.35	422.69
57226	0	0	0	0
57227	0	0	224.07	0
57229	0	0	229.67	0
57230	0	0	469.60	0

从表 2 和图 3 可以看出,57216 井和 57221 井周围水窜程度较重,57211 井和 57213 井周围水窜程度相对较轻;窜流现象具有很强的方向性,57216 和 57221 井尤为明显。虽然 57213 与 57207

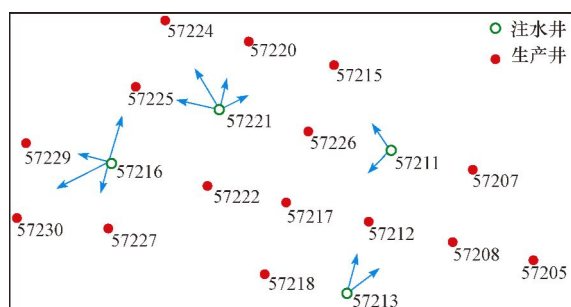


图3 57220井区窜流通道分布

Fig. 3 Distribution of water breakthrough channels in 57220 Well Field

井相距较远,但也发生了水窜。由此可见,水窜的发生不仅仅局限于井组内,还可能发生在不在同一井组的注采井之间。确定了窜流通道的体积,可以根据体积大小来优化堵剂的用量,达到更好的封堵效果。

## 5 结 论

1) 窜流具有很强的方向性,并且水窜的发生不仅仅局限于井组内,还可能发生在不同井组的注采井之间。

2) 利用动态数据定量计算油藏窜流通道的的方法避开了较难求得的参数,提高了计算精度,算法新颖实用,计算结果准确可靠。

3) 利用该方法定量描述注采井间的窜通关系,准确计算窜流通道的和窜流体积,可为油田调剖堵水提供参考,具有一定的现实意义。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 刘月田,孙保利,于永生. 大孔道模糊识别与定量计算方法[J]. 石油钻采工艺,2003,25(5):54-59.  
Liu Yuetian, Sun Baoli, Yu Yongsheng. Fuzzy identification and quantitative calculation method for big pore throat[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(5): 54-59.
- [2] 曾流芳,赵国景,张子海,等. 疏松砂岩油藏大孔道形成机理及判别方法[J]. 应用基础与工程科学学报,2002,10(3):268-275.  
Zeng Liufang, Zhao Guojing, Zhang Zihai, et al. The macroscopic throats forming mechanism of unsolidated sand-reservoir and their identifying method[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2002, 10(3): 268-275.
- [3] 程宇辉,张国华,陈广超,等. 油井水力压裂后层间水窜的处理工艺[J]. 石油钻探技术,2004,32(5):45-47.  
Cheng Yuhui, Zhang Guohua, Chen Guangchao, et al. Treatment of water channeling among layers after hydraulic fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(5): 45-47.
- [4] 毛源,张代森,张代红,等. 飞雁滩油田聚合物窜流封堵技术

[J]. 石油钻采工艺,2004,26(3):62-64.

Mao Yuan, Zhang Daisen, Zhang Daihong, et al. Polymer inter-aquifer flow plugging technology of Feiyantan Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2004, 26(3): 62-64.

- [5] 石广志,冯国庆,张烈辉,等. 应用生产动态数据判断地层连通性方法[J]. 天然气勘探与开发,2006,29(2):29-31.

Shi Guangzhi, Feng Guoqing, Zhang Liehui, et al. Inferring stratal connectivity from production performance data[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2006, 29(2): 29-31.

- [6] 史有刚,曾庆辉,周晓俊. 大孔道试井理论解释模型[J]. 石油钻采工艺,2003,25(3):48-50.

Shi Yougang, Zeng Qinghui, Zhou Xiaojun. Interpreting model of large pore well testing theory[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(3): 48-50.

- [7] 李淑霞,冯其红. 用图版法分析示踪剂产出曲线[J]. 石油钻采工艺,2003,25(3):51-54.

Li Shuxia, Feng Qihong. Type-curve matching method to analyze multi-well tracer test[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(3): 51-54.

- [8] Anh Dinh, Djebbar Tiab. Inferring interwell connectivity from well bottomhole pressure fluctuations in waterfloods[R]. SPE 106881, 2007.

- [9] Alejandro Albertoni, Lake Larry W. Inferring interwell connectivity from well-rate fluctuations in waterfloods [R]. SPE 75225, 2002.

- [10] Yousef A A, Lake L W, Jensen J L. Analysis and interpretation of interwell connectivity from production and injection rate fluctuations using a capacitance model[R]. SPE 99998, 2006.

- [11] 钟大康,朱筱敏,吴胜和,等. 注水开发油藏高含水期大孔道发育特征及控制因素:以胡状集油田胡12断块油藏为例[J]. 石油勘探与开发,2007,34(2):207-211.

Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Wu Shenghe, et al. Characteristics and controlling factors of high capacity channels of reservoirs at high water cut stage: a case from Block Hu 12 of Huzhuangji Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 207-211.

- [12] 付民,方立新,张松明,等. 疏松砂岩、细粉砂岩油藏防砂堵水及大孔道封堵工艺技术[J]. 油气井测试,2012,21(2):51-53.

Fu Min, Fang Lixin, Zhang Songming, et al. Sand control and water plugging for unconsolidated sandstone, fine sandstone reservoir and big pore plugging technology[J]. Well Testing, 2012, 21(2): 51-53.

- [13] 赵传峰,姜汉桥,王宏申,等. 根据油藏动静态资料判断窜流通道方向[J]. 石油天然气学报,2008,30(2):53-55.

Zhao Chuanfeng, Jiang Hanqiao, Wang Hongshen, et al. Judging the channeling path orientation based on static reservoir data[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(2): 53-55.

- [14] Yousef A A, Gentil P, Jensen J L, et al. A capacitance model to infer interwell connectivity from production and injection rate fluctuations[R]. SPE 95322, 2005.