

• 地质研究 •

# BZ油田井间动态连通性研究

张伟 陈存良 刘斌 刘喜林 姚君波

(中海石油(中国)有限公司天津分公司)

张伟,陈存良,刘斌,刘喜林,姚君波. BZ油田井间动态连通性研究. 2019,30(2):128-131

**摘要** BZ油田油藏是渤海典型的中高孔渗稠油油藏,目前处于高含水阶段,开展油藏井间动态连通性的研究对后期剩余油挖潜有重要指导意义。稠油油藏原油粘度较高,存在启动压力梯度,传统的井间动态连通性研究方法不适用于稠油油藏。为此,基于系统分析思想,将注水井、生产井及其井间介质看作一个系统,根据物质平衡原理和稠油油藏的产量描述模型,考虑启动压力梯度影响,利用油田的注采生产资料,建立稠油油藏注采井间动态连通性评价的新模型,并利用最小二乘原理反演得到注采关联系数,进而分析BZ油田的井间动态连通状况。研究结果为渤海BZ油田及其他相似油藏的井间动态连通性分析提供了科学依据。

**关键词** 稠油油藏 动态连通性 启动压力梯度 物质平衡 最小二乘法

**中图分类号**:TE 132.1 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1672-9803.2019.02.025

## 0 引言

油藏井间动态连通性是油田开发评价的重要指标之一,由于长期水驱开发导致储集层孔喉结构发生较大变化,传统的静态连通性无法满足目前生产需求,开展动态连通性研究意义重大<sup>[1-3]</sup>。目前可用于稠油油藏的井间动态连通性评价方法有色谱指纹测试<sup>[4]</sup>、示踪剂测试<sup>[5]</sup>、干扰试井或脉冲试井<sup>[6-7]</sup>、灰色关联方法<sup>[8-10]</sup>等。色谱指纹测试是利用气相色谱指纹技术或紫外光谱技术,通过对油样进行全烃色谱分析、对比色谱指纹特征,达到研究井间动态连通性的目的,此分析技术费用较高;示踪剂测试是从注水井注入试剂,在生产井监测示踪剂突破时间、峰值的大小及个数等参数,通过模拟示踪剂产出曲线达到井间动态连通性的研究目的,该技术适用于含水较高的井组;干扰试井和脉冲试井通过注采井间压力的变化来判断井间连通性,因为需要改变工作制度,所以会影响生产井产量;灰色关联方法相对简单,通过计算注采参数的关联度来分析连通性,该技术简单易操作,但是物理意义不明确。针对上述问题,笔者推导建立了一种适用于稠油油藏开发的油

藏工程方法,并分析了BZ油田井间动态连通情况。

BZ油田位于辽东湾下辽河拗陷、辽西低凸起中段,为湖相三角洲沉积,平均渗透率为1100 mD,孔隙度为32%,原油粘度为50~300 mPa·s,平均原油粘度120 mPa·s,是典型的中高孔渗稠油油藏。油田自投入开发至今已有20余年,目前采出程度29.6%,综合含水率为79.2%,处于高含水阶段,开展油藏井间动态连通性的研究对后期剩余油挖潜有重要指导意义。

## 1 方法建立

基于系统分析思想<sup>[11]</sup>,将注水井、生产井及其井间介质看作一个系统,不考虑天然水驱、水侵等复杂情况,根据物质平衡原理,油藏体积变化等于地下产量,并结合前人研究成果<sup>[12]</sup>得到:

$$C_t V_p \frac{d\bar{p}}{dt} = \sum_{i=1}^{N_l} f_{ij} q_{wi}(t) - q_j(t) \quad (1)$$

式中: $C_t$ 为地层的综合压缩系数, $\text{MPa}^{-1}$ ;  $V_p$ 为泄油孔隙体积, $\text{cm}^3$ ;  $\bar{p}$ 为地层平均压力, $\text{MPa}$ ;  $t$ 为时间, $\text{s}$ ;  $N_l$ 为注水井数,整数;  $f_{ij}$ 为注水井*i*与生产井*j*之间的注采关联系数;  $q_{wi}$ 为注水井*i*的注水量, $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $q_j$ 为生产井*j*的产液量, $\text{cm}^3/\text{s}$ 。

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(编号:2016ZX05058-001)

张伟 工程师,1989年生,2011年本科毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,2014年硕士毕业于中国石油大学(华东)油气田开发工程专业。现在中海石油(中国)有限公司天津分公司从事油藏描述及提高采收率工作。通信地址:300459 天津市滨海新区海川路2121号渤海石油管理局。电话:(022)66500810。E-mail:zhangwei176@cnooc.com.cn

与常规油藏相比,稠油油藏原油粘度较高,存在启动压力梯度,而且有别于低渗透油藏,稠油油藏只有油相由于本身特性导致存在启动压力梯度,而水相并不存在<sup>[12]</sup>,因此增加了稠油油藏流体渗流规律的研究难度。渗流描述模型<sup>[13]</sup>是利用油藏工程方法建立的稠油油藏产量描述模型,如公式(2)所示,当油藏流体流动为单相流或者含水相对稳定(即含水饱和度变化不大)时,产量模型近似为线性产量模型:

$$q = C_J(p_e - p_{wf}) + C_q \quad (2)$$

其中:

$$C_J = \frac{2\pi K K_{ro} h}{\mu_o \ln \frac{r_e}{r_{wf}}} + \frac{2\pi K K_{rw} h}{\mu_w \ln \frac{r_e}{r_{wf}}} \quad (3)$$

$$C_q = \frac{2\pi K K_{ro} h (r_e - r_{wf})}{\mu_o \ln \frac{r_e}{r_{wf}}} \lambda_o \quad (4)$$

式中:  $q$  为产液量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $C_J$  为产液系数,  $\text{cm}^3/(\text{mPa} \cdot \text{s})$ ;  $p_e$  为外边界处压力,  $\text{MPa}$ , 一般取地层的平均压力  $\bar{p}$ ;  $p_{wf}$  为井底压力,  $\text{MPa}$ ;  $C_q$  为存在启动压力梯度影响的产量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;  $K$  为绝对渗透率,  $\text{mD}$ ;  $K_{ro}$  为油相相对渗透率;  $K_{rw}$  为水相相对渗透率;  $h$  为储集层厚度,  $\text{cm}$ ;  $\mu_o$  为油相粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $\mu_w$  为水相粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $r_{wf}$  为井径,  $\text{cm}$ ;  $r_e$  为外边界井径,  $\text{cm}$ ;  $\lambda_o$  为油相拟启动压力梯度,  $\text{MPa}/\text{cm}$ 。

注水引起的压力变化在生产井端得到响应需要经过一定时间,这种现象被称为注水压力波的延迟效应<sup>[14]</sup>。为了定量表征压力波这种特性,定义了时滞常数<sup>[14]</sup>为:

$$\tau_j = (C_i V_p / C_J)_j \quad (5)$$

式中:  $\tau_j$  为时滞常数,  $\text{s}$ 。

将公式(2)、(5)代入公式(1)得公式(6):

$$\tau_j \frac{dq_j(t)}{dt} + q_j(t) = \sum_{i=1}^{N_i} f_{ij} q_{wi}(t) - \tau_j (C_J)_j \frac{d(p_{wf})_j}{dt} \quad (6)$$

在忽略井底流压变化的情况下,对公式(6)进行积分,得到产液量和注水量的关系式为:

$$q_j(t) = c + q_j(t_0) e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_j}} + \frac{e^{-\frac{t}{\tau_j}}}{\tau_j} \int_{\xi=t_0}^{\xi=t} \sum_{i=1}^{N_i} f_{ij} q_{wi}(\xi) d\xi \quad (7)$$

式中:  $c$  为积分常数;  $t_0$  为初始时间,  $\text{s}$ ;  $\xi$  为积分过程代指时间变量  $t$  的符号。

对公式(7)进行离散化后得到公式(8):

$$q_j(n) = c + q_j(n_0) e^{-\frac{(n-n_0)}{\tau_j}} + \sum_{i=1}^{N_i} f_{ij} \left[ \sum_{m=n_0}^n \frac{\Delta n}{\tau_j} e^{-\frac{m-n}{\tau_j}} q_{wi}(m) \right] \quad (8)$$

式中:  $m, n$  为时间变量离散序号,  $\text{s}$ ;  $n_0$  为初始时间

对应离散序号,  $\text{s}$ ;  $\Delta n$  为时间步长,  $\text{s}$ 。

公式(8)即为适用于稠油油藏注采井间动态连通性评价的新模型。

## 2 模型求解

直接求解公式(8)难度较大,为此使用最小二乘原理<sup>[15-17]</sup>进行简化。最小二乘法是数学优化技术的一种,该方法通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配,使得求取数据与实际数据之间误差的平方和为最小,从而可以简便地求得未知的数据。根据未知参数的物理意义设置约束条件,利用最小二乘原理将原问题的求解转化为产液量与实际产液量间的历史拟合,公式如下:

$$\min F = \sum_{n=1}^{N_i} [q_j(n) - q_{sj}(n)]^2 \quad (9)$$

$$(0 \leq f_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^{N_p} f_{ij} \leq 1, 0 \leq \tau_j \leq 6)$$

式中:  $N_i$  为选用样本数据个数, 整数;  $q_{sj}$  为生产井  $j$  实际的产液量,  $\text{cm}^3$ ;  $N_p$  为生产井数, 整数;  $F$  为目标函数。

利用蛙跳算法<sup>[18]</sup>对公式(9)进行求解。蛙跳算法是仿生青蛙觅食原理而形成的一种智能优化算法,该算法具有全局搜索能力强、计算参数少、易于实现等特点,因此被广泛应用于各类研究。本文中的未知参数组合  $(f_{ij}, \tau_j)$  即为算法中青蛙的位置坐标,目标函数  $F$  即为食物位置(图1)。计算开始会随机生成多组未知参数组合即青蛙群,将未知参数赋值代入公式(8)可计算对应的产液量  $q_j$ ,进而计算误差目标函数  $F$ ,根据  $F$  的大小排序确定最大值  $F_{\max}$  与最小值  $F_{\min}$ ,再计算目标函数最大值与最小值对应青蛙位置的距离,然后以该距离的随机倍数在原位置的基础上重新更新每个青蛙的位置即下一代青蛙位置,依此类推,直到满足误差要求,找到食物

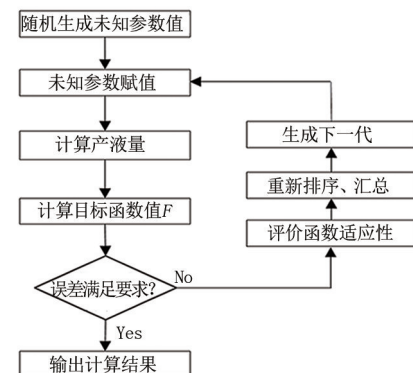


图1 蛙跳算法求解程序框图

最多的位置,即达到最优解。

3 矿场应用

应用本文方法对 BZ 油田 W 区进行了井间动态连通性的评价,连通性评价结果如表 1 所示。可以看出,各井组内注采井间的动态连通性存在差异性。W 8 井组内各生产井注水流向并不均衡,注入水主要流向 W 3、W 7、W 12、W 13 和 W 9 井,流向 W 2、W 4 和 W 14 井较少。这与动液面监测结果一致(图 2),注水供给充分的生产井动液面相对较高,也验证了方法的可靠性。另外,W 17 井组内注入水流向 W 12、W 13 和 W 14 井相对较多,流向 W 18 井相对较少。W 26 井组与 W 8 井组、W 17 井组相比注水流向相对均衡一些,但流向 W 30、W 31 和 W 21 井相对偏少。根据计算结果及动态分析结果,建议开展区块整体调剖调驱试验,改善平面注水效果。调剖后,区块增油降水效果显著(图 3),含水率下降 2.2%,考虑区块综合递减率情况下,累计增油  $3.80 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,提高采收率 0.51%,充分证明了该方法的可靠性。

表 1 BZ 油田 W 区动态连通性评价结果

注水井	生产井	注采连通系数
W 8	W 2	0.07
	W 7	0.16
	W 12	0.16
	W 3	0.18
	W 13	0.15
	W 4	0.09
	W 9	0.15
	W 14	0.04
W 17	W 12	0.22
	W 16	0.13
	W 21	0.16
	W 13	0.17
	W 22	0.06
	W 14	0.18
	W 18	0.03
	W 23	0.05
W 26	W 21	0.11
	W 25	0.13
	W 30	0.11
	W 22	0.15
	W 31	0.08
	W 23	0.16
	W 27	0.12
	W 32	0.15

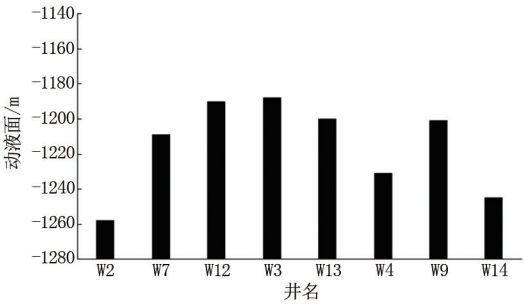


图 2 W 8 井组动液面分布

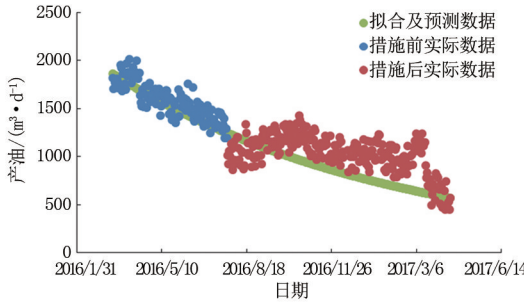


图 3 W 区调剖调驱措施前后数据对比

4 结 论

- (1)根据物质平衡原理,基于线性产量描述模型,考虑注水的延迟性,利用生产资料建立了稠油油藏注采井间动态连通性计算模型。
- (2)利用最小二乘原理将模型求解转化为产液量与实际产液量间的历史拟合,切实降低了计算难度。
- (3)现场应用指导调剖调驱实践,增油降水效果显著,具有较好的应用价值。

参 考 文 献

[1] 张明安. 油藏井间动态连通性反演方法研究[J]. 油气地质与采收率,2011,18(3):70-73.  
ZHANG Ming'an. Research on inversion method of dynamic inter-well connectivity in oil reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2011,18(3):70-73.

[2] 陈存良,韩晓冬,赵汉卿,等. 低渗透油藏井间动态连通性研究[J]. 特种油气藏,2018,25(2):102-106.  
CHEN Cunliang,HAN Xiaodong,ZHAO Hanqing,et al. Dynamic inter-well connectivity in low-permeability oil reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018,25(2):102-106.

[3] 何芬. 渤中 34-1 油田稳产挖潜与对策[J]. 录井工程, 2016,27(2):35-40.  
HE Fen. Stable tapping potential and countermeas-

- ures for stable production of Bozhong 34-1 oilfield[J]. Mud Logging Engineering, 2016, 27(2): 35-40.
- [4] 徐耀辉, 陈丹, 向廷生, 等. 应用紫外光谱技术研究油藏连通性的探讨: 以 QHD32-6 油田西区稠油油藏为例[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2006, 28(5): 44-46.
- XU Yaohui, CHEN Dan, XIANG Tingsheng, et al. Studying the continuity of heavy oil reservoirs by using ultraviolet spectral technique: Taken heavy oil reservoirs in the west region of QHD 32-6 oilfield for example[J]. Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute), 2006, 28(5): 44-46.
- [5] 许向峰. 井间示踪剂监测在复杂断块油藏描述中的应用[J]. 录井工程, 2017, 28(1): 83-86.
- XU Xiangfeng. Application of cross-well tracer monitoring in description of complex fault block reservoirs [J]. Mud Logging Engineering, 2017, 28(1): 83-86.
- [6] 杜鹏红. 干扰试井技术在油藏描述和动态调整中的应用[J]. 油气井测试, 2008, 17(6): 32-34.
- DU Juanhong. Application of interference well testing technology in oil reservoir description and performance adjustment[J]. Well Testing, 2008, 17(6): 32-34.
- [7] 万新德, 吴逸. 脉冲试井在油田开发中的应用[J]. 特种油气藏, 2006, 13(3): 66-69.
- WAN Xinde, WU Yi. Application of pulse testing in oilfield development [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2006, 13(3): 66-69.
- [8] 冯其红, 陈存良, 杨光龙, 等. 利用注采数据研究岔 15 油田井间连通性[J]. 特种油气藏, 2014, 21(6): 87-89.
- FENG Qihong, CHEN Cunliang, YANG Guanglong, et al. Study on inter-well connectivity of Cha 15 oil-field by using injection production data [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(6): 87-89.
- [9] 王治国, 张继成, 宋考平, 等. 应用速率关联度分析井间连通情况[J]. 特种油气藏, 2011, 18(3): 91-93.
- WANG Zhiguo, ZHANG Jicheng, SONG Kaoping, et al. Analysis of inter-well connectivity by using rate correlation [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(3): 91-93.
- [10] 郭素杰, 马友生, 蔡军, 等. 基于灰色关联分析的产能指数在储集层评价中的应用[J]. 录井工程, 2016, 27(4): 40-44.
- GUO Sujie, MA Yousheng, CAI Jun, et al. Application of productivity index based on grey correlation analysis in reservoir evaluation [J]. Mud Logging Engineering, 2016, 27(4): 40-44.
- [11] 赵辉, 姚军, 吕爱民, 等. 利用注采开发数据反演油藏井间动态连通性[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(6): 91-94.
- ZHAO Hui, YAO Jun, LV Aimin, et al. Reservoir inter-well dynamic connectivity inversion based on injection and production data [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34(6): 91-94.
- [12] LIANG XiMing. A simple model to infer interwell connectivity only from well-rate fluctuations in water-floods [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010, 70(1/2): 35-43.
- [13] 许家峰, 孙福街, 田冀, 等. 考虑启动压力梯度时普通稠油非线性渗流模型解析求解方法[J]. 中国海上油气, 2011, 23(1): 32-35.
- XU Jiafeng, SUN Fujie, TIAN Ji, et al. An analytic solution method of nonlinear seepage models with ordinary heavy oil when taking threshold pressure gradient into consideration [J]. China Offshore Oil and Gas, 2011, 23(1): 32-35.
- [14] Sayarpour M, Zuluaga E, Kabir C S, et al. The use of capacitance-resistance models for rapid estimation of waterflood performance and optimization [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009, 69(3): 227-238.
- [15] 韩学辉, 卢时林, 支乐菲, 等. 应用最小二乘支持向量机识别 J13 井区杜家台油层岩性[J]. 特种油气藏, 2011, 18(6): 18-21.
- HAN Xuehui, LU Shilin, ZHI Lefei, et al. Identification of lithology of Dujiatai oil layer in J13 well block by least squares support vector machine [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(6): 18-21.
- [16] 陈存良, 王振, 牛伟, 等. 基于最小二乘支持向量机的大孔道定量计算方法[J]. 断块油气田, 2015, 22(1): 74-77.
- CHEN Cunliang, WANG Zhen, NIU Wei, et al. Quantitative calculation method of thief zone based on least square support vector machine [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2015, 22(1): 74-77.
- [17] 鲁港, 李晓光, 陈铁铮, 等. 钻井液卡森模式流变参数非线性最小二乘估计新算法[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 470-474.
- LU Gang, LI Xiaoguang, CHEN Tiezheng, et al. A new method for non-linear least square estimation on rheological parameter in Casson model of drilling fluid [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 470-474.
- [18] 崔文华, 刘晓冰, 王伟, 等. 混合蛙跳算法研究综述 [J]. 控制与决策, 2012, 27(4): 481-486.
- CUI Wenhua, LIU Xiaobing, WANG Wei, et al. Survey on shuffled frog leaping algorithm [J]. Control and Decision, 2012, 27(4): 481-486.