

基于生产动态数据的水驱砂岩油藏井间 优势渗流通道识别

雷 霆¹,倪天禄²,季 岭³,王庆魁³

(1.中国地质大学(武汉),湖北 武汉 430079;2.大港油田分公司科技处 天津 300280;3.大港油田分公司第三采油厂,河北 沧州 061100)

摘要:注水开发的砂岩油藏中发育的优势渗流通道对于开发效果具有很大影响。优势通道的作用主要表现为注水低效循环,降低波及系数。提出一种改进的 CRM 模型,用生产动态数据来识别井间优势渗流通道。与其他方法相比,该方法具有成本低、识别结果准确的优点。将该方法用于实际油藏中,结果表明该方法的识别结果与其他测试方法如示踪剂和吸水剖面的测试结果一致,说明该方法具有较强的可靠性。

关键词:优势渗流通道;CRM 模型;砂岩油藏;生产动态数据

中图分类号:TE343 **文献标志码:**A

Identification of predominant seepage channels between wells in waterflooding sandstone reservoirs based on production performance data

LEI Ting¹, NI Tianlu², JI Ling², WANG Qingkui²

(1.China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430079, China; 2.Scientific and Technological Department of CNPC Dagang Oilfield, Tianjin 300280, China; 3.The Third Oil Production Plant of Dagang Oilfield Company, Cangzhou 061100, China)

Abstract: Predominant seepage channels developed in waterflooding sandstone reservoirs has a great influence on the development effect. Their effects are mainly presented as inefficient water injection cycles and reducing sweep coefficient. In this study, an improved CRM model was proposed to identify high permeability channels based on production performance data. Compared with other methods, this method has the advantages of low cost and high accuracy. This method was used in actual reservoirs, and the results showed that the results of this model are consistent with those of other methods such as tracer and water absorption profiles, indicating that this method has strong reliability.

Key words: predominant seepage channels; CRM model; sandstone reservoir; production performance data

砂岩油藏经过长期的注水开发后,由于注入水的冲刷作用使得地层的孔渗特性会发生一定程度的改变,主要表现为进一步加剧储层的非均质性。在储层的高渗部位,注入水的冲刷作用远大于低渗部位,最终在高渗部位形成次生高渗透条带^[1],即优势渗流通道。优势渗流通道会加剧油水关系矛盾,造成注入水低效循环,降低开发效果。因此,有必要研究识别优势渗流通道的方法。

1 优势渗流通道识别方法

优势渗流通道的识别方法可以分为静态方法和动态方法两大类。静态方法主要是利用静态资料,如岩心、测井等资料进行地质分析。通过对岩心

的观察描述可以从地质角度分析优势通道的分布规律。廖明光等^[2]根据压汞曲线建立了描述孔喉半径、孔隙度和渗透率的模型,进而根据孔喉半径的大小和分布可以描述优势渗流通道。该方法主要受到取心数量的限制。李国娟等^[3]利用同位素测井资料,通过对比多次测井的结果来识别优势渗流通道。该方法需要进行多次同位素测井,成本较高。动态方法主要是利用示踪剂测试资料、试井资料、生产动态资料等来进行分析。冯其红等^[4]采用自动拟

收稿日期:2019-11-05;改回日期:2019-12-25。

第一作者简介:雷霆(1973—),博士,讲师,现主要从事油气藏数值模拟及试井解释方面的研究工作。E-mail:leiting@cug.edu.cn。

合算法对示踪剂产出曲线进行拟合,识别结果较为准确。该方法需要进行示踪剂测试,成本较高。史有刚等^[5]用井口压力采用试井模型来解释优势渗流通道。高慧梅等^[6]用水油比典型曲线来识别优势渗流通道。另外也有很多学者综合使用静态资料和动态资料,如黄斌等^[7]采用层次分析法综合了优势通道相关的多种静态和动态因素,建立了模糊识别方法。

除以上方法外,利用生产数据反演井间连通性也已成为油藏连通性研究的一类重要方法^[8],其模型主要包括相关分析模型、多元线性回归模型、弹性压缩模型、系统分析模型等。优势渗流通道本就是油藏连通性的一种特例,因此这些方法也可用于优势渗流通道的研究。本文提出一种改进的弹性压缩模型,基于生产动态数据来识别优势渗流通道。

2 基于弹性压缩模型的识别方法

2.1 弹性压缩模型

弹性压缩模型(CRM)^[9-11]是基于物质平衡和信号处理理论推导出来的,其中把注入速率作为输入信号,生产速率作为单井的输出信号,井间的连通性和时间响应延迟构成了未知的系统参量。因此,模型的参数反映了注水井与生产井间的连通性。

假设油藏中流体、岩石孔隙体积均微可压缩,CRM模型将油藏的注采系统简化表征为多个注采井对,每个注采井对包含一口注入井和一口生产井。每个注采井对由两个特征参数描述:时间系数 τ_{ij} 和比例系数 f_{ij} ,如图1所示。图中黑点表示井位,I1为注水井,P1为生产井。时间系数 τ_{ij} 是指注水压力从注水井I1波及到生产井P1所需的时间。比例系数 f_{ij} 是指注水井I1的注入量中流入到生产井P1的部分占I1井总注入量的比例。

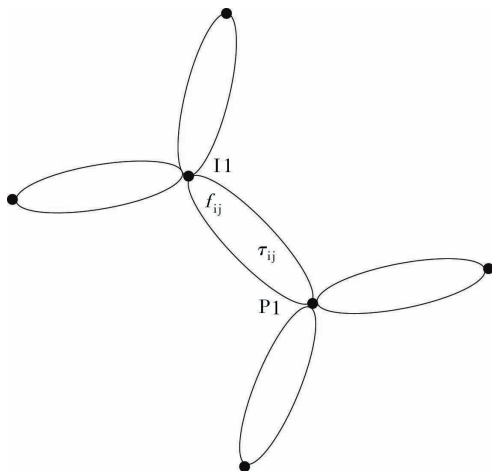


图1 注采系统模式

对于图1所示一个由注入井I1和生产井P1组成的注采井对来说,根据物质平衡方程,有

$$C_t V_p \frac{d\bar{p}}{dt} = I(t) - q(t) \quad (1)$$

式中, C_t 为地层综合压缩系数,1/MPa; V_p 为注采井对间的控制体积, m^3 ; \bar{p} 为控制体积内的平均压力,MPa; $I(t)$ 为注入井I1的注水量, m^3/d ; $q(t)$ 为生产井P1的产液量, m^3/d 。

根据采液指数的定义,有

$$q = J(\bar{p} - p_{wf}) \quad (2)$$

式中, J 为生产井P1的采液指数, m^3/MPa ; p_{wf} 为生产井P1的井底流压,MPa。

将式(1)和(2)合并,消去平均压力 \bar{p} ,得

$$\tau \frac{dq(t)}{dt} + q(t) = I(t) - \tau J \frac{dp_{wf}}{dt} \quad (3)$$

其中, τ 是时间系数,定义为

$$\tau = \frac{C_t V_p}{J} \quad (4)$$

τ 值越大,说明时间延迟越大。

方程(3)的解为

$$q(t) = q(t_0) e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau}} + \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \int_{\xi=t_0}^{\xi=t} e^{\xi/\tau} I(\xi) d\xi + J \left[p_{wf}(t_0) e^{\frac{-(t-t_0)}{\tau}} - p_{wf}(t) + \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \int_{\xi=t_0}^{\xi=t} e^{\xi/\tau} p_{wf}(\xi) d\xi \right] \quad (5)$$

为了简化计算,忽略井底流压 p_{wf} 的变化^[18],并进行离散化,则上式可以写为:

$$q(n) = q(n_0) e^{\frac{-(n-n_0)}{\tau}} + \sum_{m=n_0}^n \frac{\Delta n}{\tau} e^{\frac{m-n}{\tau}} I(m) \quad (6)$$

式中, n 为当前计算的时间点, n_0 为初始时间点。

将式(6)扩展到包含 N_i 口注水井和 N_p 口采油井的系统。对于每一口采油井 P_j ,与其关联的有 N_i 口注水井,其采液量表示为:

$$q_j(n) = q_j(n_0) e^{\frac{-(n-n_0)}{\tau_{ij}}} + \sum_{i=1}^{N_i} \left\{ f_{ij} \left[\sum_{m=n_0}^n \frac{\Delta n}{\tau_{ij}} e^{\frac{m-n}{\tau_{ij}}} I_i(m) \right] \right\} \quad (7)$$

式中, q_j 为采油井 P_j 的产量, m^3/d ; τ_{ij} 为采油井 P_j 的时间系数; I_i 为注水井 i 的注水量, m^3/d ; m 和 n 为时间步; f_{ij} 为注水井 i 的注水量中流入到采油井 P_j 的比例系数; τ_{ij} 为从注水井 i 到采油井 P_j 的时间系数。

根据 f_{ij} 的定义,注水井 i 的注水量要么分配到其他采油井中,要么保留在地层里。因此,有限制条件

$$\sum_{j=1}^{N_p} f_{ij} \leq 1 \quad (8)$$

注采井对模型考虑每个生产井和注水井形成的注采井对具有一个控制体积,因此每个注采井对有一个时间系数。此模型未知量包括: $N_i \cdot N_p$ 个时间系数 τ_{ij} , $N_i \cdot N_p$ 个比例系数 f_{ij} , N_p 个初始流量 $q_i(n_0)$ 和 N_p 个初始流量时间系数 τ_{pi} 。完整的模型包含 $2(N_i+1)N_p$ 个未知参数,可以采用粒子群等最优化的算法进行求解。

2.2 井间渗透率的计算

通过拟合生产井的产液量,CRM模型能够获得任一注采井对的时间系数 τ_{ij} 和比例系数 f_{ij} 。时间系数 τ_{ij} 反映的是产量波动信号从注水井传递到生产井所需要的时间。根据不稳定试井中探测半径的计算公式^[12],有

$$r_{ij} = 18.59 \sqrt{\frac{k_{ij} \tau_{ij}}{\phi \mu C_i}} \quad (9)$$

式中, r_{ij} 为注采井间的距离,m; k_{ij} 为注采井对间的渗透率, μm^2 ; ϕ 为孔隙度; μ 为地层流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; C_i 为地层综合压缩系数, $1/\text{MPa}$; τ_{ij} 为信号在注采井间的传递时间,d。

从以上公式可以写出井间渗透率的计算公式为:

$$k_{ij} = \frac{\phi \mu C_i r_{ij}^2}{345.6 \tau_{ij}} \quad (10)$$

3 应用实例

3.1 井间连通关系的确定

将本文提出的模型运用在大港油田N区块。该区块为断块构造油藏,无边底水。目前有64口生产井,13口注水井。区块非均质性较强,经过长期注水开发,目前综合含水87%,地下油水关系复杂,注水利用率低,调控难度大。

采用CRM模型对N区块的生产数据进行分析。由于CRM模型不能考虑补孔、封层等调整措施,因此采用分段分析的方法来降低油田实际生产调整措施对分析结果的影响。选取2016年至2018年的产量数据进行分析,对生产井产液量的拟合情况如图2所示。图2为区块产液量拟合情况,拟合相对误差为8%。图3和图4分别是经过拟合后得到的注水量比例系数和时间系数分布。拟合数据见表1和表2。表中每一横行代表一口注水井,每一竖行代表一口生产井,表中空白格表示对应注采井间不连通。从图3可以看出,不同注采井对间的比例系数差异很大。比例系数大的方向代表着水量多,容易发育优势渗

流通道。比如:N52461井的注水主要分配到N5147和N5248井,N5249的注水主要分配到N5147井和N5248井。从图4可以看出,时间系数的分布主要与井间距离有关。井间距离越远,时间系数就越大。但是在优势渗流通道发育的方向,时间系数往往偏小,甚至小于较近的井。与比例系数相比,时间系数的变化对产液量不是很敏感,因此识别优势通道时主要使用比例系数。

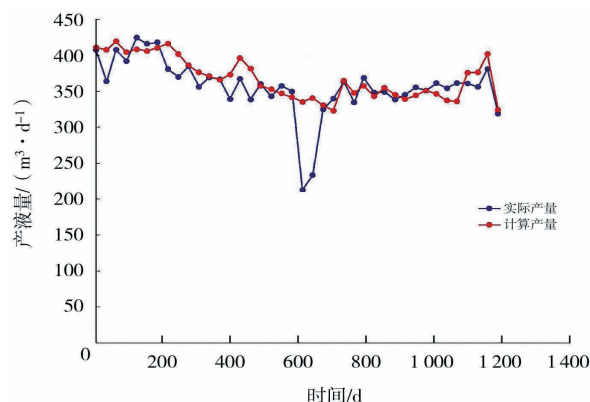


图2 N区块产液量拟合

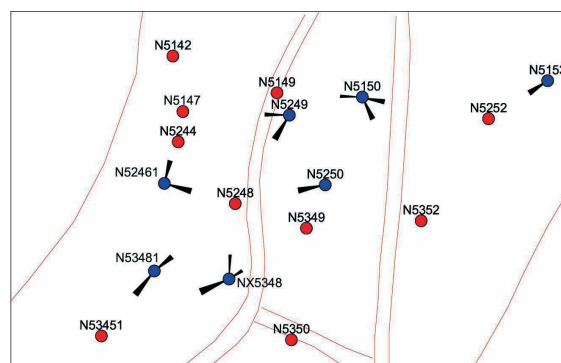


图3 N区块各井比例系数

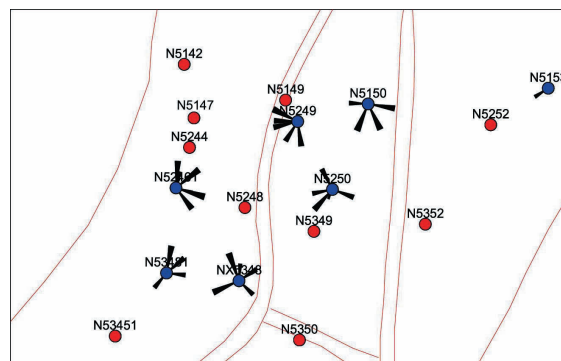


图4 N区块各井时间系数

3.2 优势通道的识别

优势渗流通道的本质是连通注采井的高渗通道。由于优势渗流通道通常是由高渗条带发展而来,因此往往与普通的高渗条带没有一个清晰的界

限,所以需要根据区块的实际情况来设定优势通道的识别条件。

基于此特点,制定了识别优势渗透通道的两个筛选条件:1. 注水井的大部分注入水沿优势通道运动,即 f_{ij} 值在该注水井中应占主要地位;2.沿优势通道地层渗透率远大于该区块平均地层渗透率。基于以上两个识别条件,根据模型的拟合结果,设定N区块优势通道的识别条件为 $f_{ij}>0.35$,并且 $K_{ij}>2\cdot\bar{K}$ 。 \bar{K} 代表地层平均渗透率。根据表1的比例系数和表2的时间系数,最终N区块识别出三条优势渗流通道:N52461井到N5248井,N5249井到N5248井,N5250井到N5248井。

从表1可以看出,N区块平均比例系数为0.08,而N52461井到N5248井的比例系数为0.37,N5249井到N5248井的比例系数为0.40,N5250井到N5248井的比例系数为0.42,均远大于平均值,说明这三个注采井对分配了对应水井的大部分水量。从表2可以看出,N区块平均时间系数为8.66,而N52461井到

N5248井的时间系数为4.95,N5249井到N5248井的时间系数为6.14,N5250井到N5248井的时间系数为5.73,均小于平均值。虽然表2中有些时间系数很小,但是对应的比例系数也非常小,说明分配的水量非常少,不可能是优势渗流通道,可以排除。因此,能同时满足前述2个识别条件的仅有这三个注采井对,即识别出的优势渗流通道。

从图中也可以看出,N52461井的注水主要分配到N5147和N5248井。虽然N5244井距离N52461井更近,但是分配的注水反而较少。这一结论与示踪剂测试结果一致。表3是该区块部分井的示踪剂测试结果。N52461井在2017年2月进行了示踪剂测试,结果显示示踪剂从该井到N5147井和N5248井的速度远快于N5244井。

此外,N5249的注水主要分配到N5147井和N5248井,中间穿越了一条断层。这一结论也与示踪剂结果一致。表3示踪剂结果显示N5249井与N5147井和N5248井连通,证实断层是开启性的。

表 1 N 区块比例系数

f_{ij}	N5142	N5147	N5149	N5244	N5248	N5252	N5349	N5350	N5352
N52461	0.01	0.09	0.03	0.05	0.37		0.07	0.03	
N53481	0.01	0.16	0.05	0.09	0.19		0.06	0.04	
N5153						0.08			0.05
N5249	0.01	0.10	0.04	0.08	0.40	0.04	0.05	0.03	0.02
N5250	0.01	0.22	0.03	0.05	0.42	0.02	0.03	0.02	0.02
NX5348	0.02	0.09	0.06	0.08	0.13		0.09	0.07	0.04

表 2 N 区块时间系数

	N5142	N5147	N5149	N5244	N5248	N5252	N5349	N5350	N5352
N52461	7.14	4.95	7.96	3.95	4.95		8.19	10.61	
N53481	11.22	8.80	11.31	7.34	6.23		8.60	8.37	
N5153						4.81			9.98
N5249	7.32	6.29	3.53	6.62	6.14	10.54	6.58	11.68	9.07
N5250	10.51	9.00	6.14	8.43	5.73	9.45	4.04	8.56	6.08
NX5348	11.90	9.29	10.13	8.02	4.99		5.67	5.45	10.61

表 3 N 区块示踪剂测试结果

注水井	时间	井号	与水井距离 /m	天数 /d	水驱速度 / (m·d ⁻¹)	高渗层渗透率 /10 ⁻³ μm ²
N52461	2017-02	N5248	163	44	3.70	327.77
		N5147	159	48	3.31	226.20
		N5244	177	80	2.13	125.09

续表 3 N 区块示踪剂测试结果

注水井	时间	井号	与水井距离 /m	天数 /d	水驱速度 / (m·d ⁻¹)	高渗层渗透率 /10 ⁻³ μm ²
N5249	2018-03	N5248	172	50	3.44	301.54
		N5147	158	54	2.93	196.49
		N5149	126	66	1.91	126.36

4 结论

本文提出一种基于动态数据的优势渗流通道识别方法。该方法采用CRM模型,通过对油井产量的拟合来获得井间参数,并基于此参数来识别优势渗流通道。该方法的优点是成本低,无需进行专门的测试,且识别效率高,准确度较好。

参考文献:

[1] 姜汉桥.特高含水期油田的优势渗流通道预警及差异化调整策略[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5):114-119.

[2] 廖明光,李仕伦,谈德辉.根据压汞曲线估算储集层渗透率的模型[J].新疆石油地质,2001,22(6):503-505,456.

[3] 李国娟,梁杰,李薇.测井资料识别大孔道的方法研究[J].油气田地面工程,2008(9):11-12.

[4] 冯其红,李淑霞.井间示踪剂产出曲线自动拟合方法[J].石油勘探与开发,2005,32(5):121-124.

[5] 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):48-50,84.

[6] 高慧梅,姜汉桥,陈民锋.疏松砂岩油藏大孔道识别的典型曲线方法[J].石油天然气学报,2009,31(1):108-111,393.

[7] 黄斌,许瑞,傅程,等.注采井间优势通道的多层次模糊识别方法[J].岩性油气藏,2018,30(4):105-112.

[8] 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):91-94,98.

[9] YOUSEF A A,GENTIL P H,JENSEN J L,et al A capacitance model to infer interwell connectivity form production -

and injection-rate fluctuations[J]. SPEREE(December), 2006:630 - 646.

[10] SAYARPOUR M, ZULUAGA E, KAABIR C S. The use of capacitance - resistance models for rapid estimation of waterflood performance and optimization [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2009: 227 - 238.

[11] SAYARPOUR M, KABIR C S, LAKE L W. Field applications of capacitance-resistive models in water-floods [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering,2009,12 (6).

[12] 李晓平,张烈辉,刘启国.试井分析方法[M].石油工业出版社.2012:40-41.

[13] 王代刚,李勇,陈百炼,等.基于油水产出动态的水驱油藏连通性评价新方法[J].中国科学:技术科学,2017,47(12):1331-1340.

[14] 禹影.聚合物驱后油层优势渗流通道识别与治理[J].大庆石油地质与开发,2017,36(4):101-105.

[15] 赵辉,谢鹏飞,曹琳,等.基于井间连通性的油藏开发生产优化方法[J].石油学报,2017,38(5):555-561.

[16] JAMALI A,ETTEHADTAVAKKOL A.应用电容电阻模型研究大型成熟油田井间连通性[J].石油勘探与开发,2017,44(1):130-136.

[17] 赵辉,康志江,孙海涛,等.水驱开发多层油藏井间连通性反演模型[J].石油勘探与开发,2016,43(1):99-106.

[18] LIANG X M. A simple model to infer interwell connectivity only from well -rate fluctuations in waterfloods [J].Journal of Petroleum Science and Engineering. 2010, 70(1):35-43.

(编辑 谢 葵)