

利用动态资料计算水驱波及系数方法研究

张顺康

(中国石化江苏油田勘探开发研究院, 江苏 扬州 225009)

摘要:水驱波及系数是影响水驱采收率的重要因素,对于实施注水开发的油田来说,水驱体积波及系数是判断水驱开发效果和研究开发调整的重要依据。以油田的实际动态资料为基础,根据水驱曲线与相渗参数之间的关系反求相关参数,结合Welge方程计算出水驱波及系数。应用实例表明,该方法计算出的水驱波及系数能够很好地反映调整措施对水驱波及状况的影响,具有较强的实际价值。

关键词:采收率 波及系数 水驱曲线 相对渗透率

中图分类号:TE341 文献标志码:A

Method based on dynamic data for calculating waterflooding sweep efficiency

ZHANG Shunkang

(Exploration and Development Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The waterflooding sweep efficiency is not only an important influence factor on oil recovery, but also an important criterion for judging the waterflooding effect and determining the development adjustment for waterflooding oil-fields. Based on dynamic data from waterflooding oilfields, the relevant parameters were resolved reversely according to the relationship between waterflooding curve and relative permeability parameter. And then combined with Welge equation, the waterflooding sweep efficiency was calculated. The application examples show that the method has considerable practical value and calculated the waterflooding sweep efficiency which can well reflect the effect of adjustment measures on waterflooding swept status.

Key words: oil recovery; sweep efficiency; water drive curve; relative permeability

对于水驱油田来说,水驱波及系数是评价水驱开发效果和水驱采收率的重要依据,对制定下步调整方向及调整策略具有重要意义。目前计算水驱波及系数的方法主要有室内测试、油藏数值模拟和水驱曲线法^[1-8]。室内测试方法由于所用岩心受平面位置和纵向层段的影响,存在实验结果能否反映整个油藏水驱规律的问题;油藏数值模拟方法需花费大量的时间进行数模计算才能反映实际油藏的水驱规律;水驱曲线法主要是利用特定水驱曲线直接计算水驱波及系数,该方法相对比较简单、实用,但目前存在一定的争议^[9-10]。本文利用乙型水驱曲线与相渗曲线的关系来求解相关参数,在此基础上,进一步结合Welge方程计算水驱波及系数。

1 基本原理

含水率的表达式为:

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{\mu_w}{\mu_o} \frac{k_{ro}}{k_{rw}}} \quad (1)$$

式中, f_w 为含水率, f ; μ_w 为地层水粘度, mPa·s; μ_o 为地层原油粘度, mPa·s; k_{ro} 为油相相对渗透率, f ; k_{rw} 为水相相对渗透率, f 。

在油水两相渗流条件下,油水两相的相对渗透率比与出口端含水饱和度应满足关系式

$$\frac{k_{ro}}{k_{rw}} = Ae^{-BS_{we}} \quad (2)$$

收稿日期:2017-11-07; 改回日期:2017-11-29。

作者简介:张顺康(1979—),博士,高级工程师,现从事油藏工程研究工作。E-mail: zhangsk.jsyt@sinopec.com。

基金项目:中国石化重大专项“高含水期水平井流场预测及调整技术研究”(P16051)。

式中, A 、 B 分别为油水相对渗透率比常数; S_{we} 为出口端含水饱和度, f 。

由式(1)、(2)可得

$$f_w' = \frac{AB \frac{\mu_w}{\mu_o} e^{-BS_{we}}}{\left(1 + \frac{A\mu_w}{\mu_o} e^{-BS_{we}}\right)^2} \quad (3)$$

式中, f_w' 为含水率导数, f 。

地下水油比 WOR_1 可以表示为:

$$WOR_1 = \frac{k_{rw}\mu_o}{k_{ro}\mu_w} \quad (4)$$

根据式(2)、(4), 式(3)可以改写为:

$$f_w' = \frac{BWOR_1}{(1 + WOR_1)^2} \quad (5)$$

对于储层非均质性较强, 含水率与采出程度曲线为凸型的油藏, 可用乙型水驱曲线进行回归, 其关系式为

$$\lg WOR = a + bR \quad (6)$$

式中, WOR 为地面水油比, R 为采出程度, f , 而:

$$a = \lg \frac{\mu_o B_o}{A\mu_w B_w} + \frac{BS_{wi}}{2.303}$$

$$b = \frac{B(1 - S_{wi})}{2.303}$$

式中, S_{wi} 为原始含水饱和度, f 。

由式(2)、(6)得:

$$S_{we} = \frac{\ln WOR - 2.303a + BS_{wi}}{B} \quad (7)$$

由 Welge 方程可知, 在油井见水以后, 地层内的水驱波及区平均含水饱和度 \bar{S}_w 与出口端含水饱和度 S_{we} 之间存在如下关系:

$$\bar{S}_w = S_{we} + \frac{1 - f_w}{f_w'} \quad (8)$$

将式(1)、(5)、(7)代入到公式(8)中, 便可计算出地层内水驱波及区的平均含水饱和度。

水驱波及部分驱动效率 E_d 可参考室内实验测试方法进行计算:

$$E_d = \frac{\bar{S}_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}} \quad (9)$$

水驱波及系数 E_v 为:

$$E_v = \frac{R}{E_d} \quad (10)$$

此外, 陈元千曾提出用丙型水驱曲线计算水驱波及系数的方法^[3], 水驱波及系数 E_v 为:

$$E_v = 1 - \sqrt{\alpha(1 - f_w)} \quad (11)$$

式中, α 为丙型水驱曲线回归系数。

可以看出, 由于丙型水驱曲线需要进行回归统计, 因而计算出的水驱波及系数与含水率之间存在着严格的数学关系, 其数值不能反映措施调整对于水驱波及状况的影响。而本文方法建立在直接计算水驱波及区平均含水饱和度的基础上, 计算得到的水驱波及系数能够更加真实地反映水驱波及状况的变化规律。

2 应用实例

选取江苏油田某区块资料, 利用本文提出的方法计算该区块的水驱波及系数, 该区块的含油面积为 0.7 km^2 , 地质储量 $362 \times 10^4 \text{ t}$, 原油地层体积系数 1.06, 地面原油密度 0.926 g/cm^3 , 残余油饱和度 0.33。该区块 1997 年投入开发, 截止到 2016 年底, 综合含水 88.5%, 采出程度 20.33%。

首先, 根据区块动态资料绘制乙型水驱曲线, 见图 1。根据图中回归数据, 得斜率为 5.063 2, 截距为 -0.220 6, 再结合区块动态和式(7)~(10)计算水驱波及系数, 相关参数及计算结果见表 1。

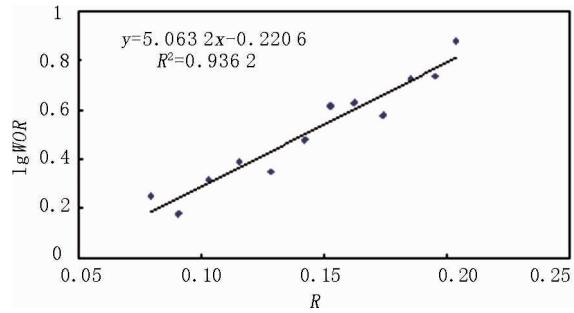


图 1 乙型水驱曲线

利用陈元千提出的丙型水驱曲线方法(式(11)), 在求取回归系数(如图 2 所示)以后, 计算不同含水时的水驱波及系数, 并将结果与本文提出的方法进行了对比, 结果如图 3 所示。从图中可以看到, 丙型水驱曲线法计算出的波及系数与含水率之间存在很好的数学关系, 因而其数值可以作为不同含水率条件下的参考值或者预测值, 但是不能作为实际值来处理。因为在实际水驱开发过程中, 由于受到油田调整措施的影响, 水驱波及系数与含水率之间往往不会严格遵循某种数学规律, 而利用本文方法的计算结果却能很好地反映水驱开发过程中调整措施对波及系数的影响。以 2014 年和 2016 年为例, 这两年该区块在保持现有井网和层系的基础上大幅度提高注水量, 局部区域形成优势通道, 含水快速上升。此时水驱驱动效率大幅度增加, 导致水驱波及系数没有明显变化, 甚至有所降低。

表1 相关参数及计算结果

年月	$f_w/\%$	$R/\%$	WOR	WOR_1	f_w'	S_{we}	\bar{S}_w	E_d	E_v
2005-12	64.5	7.94	1.7816	1.8151	3.9862	0.3924	0.4815	0.2261	0.3512
2006-12	60.6	9.09	1.5108	1.5392	4.1547	0.3829	0.4777	0.2204	0.4124
2007-12	67.8	10.32	2.0708	2.1097	3.7969	0.4010	0.4857	0.2324	0.4441
2008-12	71.4	11.52	2.4536	2.4997	3.5520	0.4108	0.4912	0.2406	0.4788
2009-12	69.6	12.83	2.2452	2.2874	3.6837	0.4057	0.4882	0.2362	0.5432
2010-12	75.4	14.21	3.0144	3.0711	3.2249	0.4226	0.4988	0.2519	0.5642
2011-12	80.7	15.27	4.1066	4.1838	2.7097	0.4404	0.5115	0.2710	0.5635
2012-12	81.1	16.25	4.2184	4.2977	2.6651	0.4419	0.5127	0.2727	0.5958
2013-12	79.4	17.41	3.7745	3.8454	2.8505	0.4355	0.5079	0.2655	0.6556
2014-12	84.3	18.52	5.2888	5.3881	2.2979	0.4549	0.5230	0.2881	0.6429
2015-12	84.8	19.49	5.4602	5.5628	2.2478	0.4567	0.5245	0.2903	0.6713
2016-12	88.5	20.33	7.5694	7.7116	1.7684	0.4755	0.5404	0.3140	0.6474

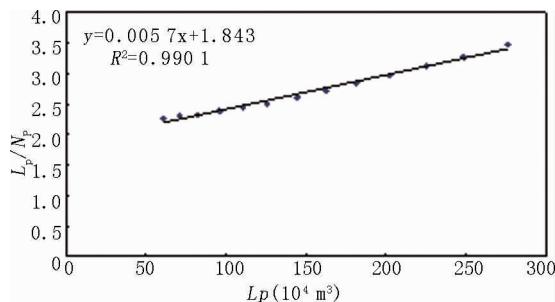


图2 丙型水驱曲线

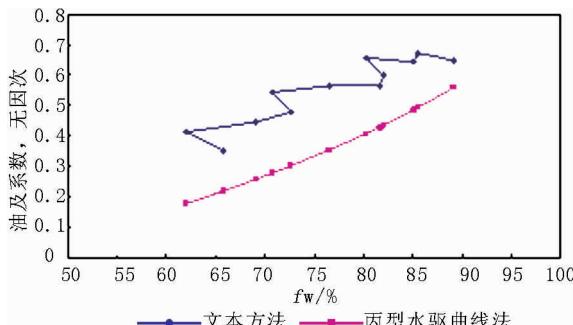


图3 不同方法计算的波及系数对比

在相同含水条件下,利用本文方法计算的水驱波及系数比丙型水驱曲线法计算结果偏大。因为在用丙型水驱曲线法计算波及系数时,其假定条件是水驱驱油效率为常数(可动油饱和度与原始含油饱和度之比)^[3,10],并且在数值上等于水驱油过程中的驱油效率最大值^[9]。在实际水驱开发过程中,驱油效率是不断变化的^[11],不可能一直按照最大驱油效率进行驱替,随着驱替的不断进行,驱油效率逐渐逼近最大值。因而在相同采出程度下,利用丙型水驱曲线法计算的水驱波及系数比实际数值小。从计算方法来看,丙型水驱曲线法计算的水驱波及系数本身就是通过回归计算的,并不是油藏真实的水驱波及系数,因而两者之间存在差异不可避免。

3 结论

(1) 本文基于乙型水驱特征曲线、Welge 方程中油水两相区间平均含水饱和度与出口端含水饱和度的理论关系,根据水驱驱油效率表达式,提出了水驱波及系数计算方法。

(2) 应用实例表明,根据本文方法计算出的水驱波及系数能较好地反映水驱开发过程中调整措施对波及系数的影响,因而在油田开发过程中对于分析及评价水驱开发调整措施具有很好的指导意义。

参考文献:

- 杜利,陈清华,戴胜群. 应用油水相对渗透率曲线和动态数据确定水驱波及状况[J]. 油气地质与采收率,2003,10(4):45-46.
- 王博,左松林,刘浪,等. 预测水驱油田体积波及系数的新方法[J]. 新疆石油地质,2011,32(4):387-389.
- 陈元千,王惠芝. 丙型水驱曲线的扩展推导及其在埕北油田的应用[J]. 中国海上油气,2004,16(6):392-394.
- 陈元千,邹存友,张枫. 水驱曲线法在油田开发评价中的应用[J]. 断块油气田,2011,18(6):769-771.
- 陈元千,郭二鹏. 预测水驱油田体积波及系数和可采储量的方法[J]. 中国海上油气,2007,19(6):387-389.
- 陈元千. 水驱体积波及系数变化关系的研究[J]. 油气地质与采收率,2001,8(6):49-51.
- 张利红,李涛,蔡蓉,等. 注水油田驱油效率和波及系数研究[J]. 内蒙古石油化工,2004,30(1):135-137.
- 谷建伟,秦国鲲,张永军. 利用数值模拟结果计算油藏水驱波及指标[J]. 河南石油,2004,18(4):35-36.
- 胡罡. 计算水驱油藏体积波及系数的新方法[J]. 石油勘探与开发,2013,40(1):103-106.
- 陈元千,邹存友,张枫,等. 预测水驱体积波及系数方法的推导、对比与应用——兼评胡罡的“新方法”[J]. 新疆石油地质,2014,35(3):293-298.
- 纪淑红,田昌炳,石成方,等. 高含水阶段重新认识水驱油效率[J]. 石油勘探与开发,2012,39(3):338-345.