

复杂小断块边水油藏采收率预测新方法

刘睿, 姜汉桥, 刘同敬, 陈民锋

(中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249)

摘要:在复杂小断块边水油藏中,天然能量差异大,边水影响程度成为采收率预测的敏感因素,造成采收率预测准确率低。参考现有采收率标定经验关系式,筛选复杂小断块边水油藏采收率预测的主要影响因素;提出等效水井的概念,将边水能量的作用转化为边缘注水模式下水井的作用;借助数值模拟虚拟开发,应用多元回归确定了采收率标定经验关系式中各影响因素的系数;并从油层物理渗流机理角度对公式进行了修正。与以往的采收率标定经验关系式的预测结果对比可以看出:边水能量较弱时,二者预测的采收率误差较小,为0~13%;边水能量较强时,二者预测的采收率误差较大,为3%~88%。新建立的采收率标定经验关系式综合考虑了边水、驱油效率、储量动用和储层物性等因素,更符合复杂小断块边水油藏的实际,预测结果更合理。

关键词:小断块;边水油藏;采收率;等效水井;经验关系式

中图分类号:TE347

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2010)01-0064-04

复杂小断块边水油藏含油面积小,不能形成规则的面积井网,边水能量的大小对合理井网密度影响大,采收率标定过程中边水的影响程度成为比较敏感的因素^[1-3]。然而,已有的采收率标定经验关系式没有考虑边水的影响,造成大量小断块边水油藏采收率预测准确率很低^[4-5]。因此,对于复杂小断块边水油藏的采收率预测研究,考虑边水能量对采收率标定经验关系式的影响就显得尤为重要。

通过将边水能量的作用转化为边缘注水模式下水井的作用,来灵活表征不同级别边水的情况,从而建立复杂小断块边水油藏采收率标定经验关系式。通过与以往的采收率标定经验关系式预测结果的对比可看出:笔者新建立的采收率标定经验关系式更符合复杂小断块边水油藏的实际,预测结果更合理。

1 采收率预测方法筛选

常规油藏采收率预测方法主要有4类^[5-9]:数值模拟方法、室内岩心实验方法、动态水驱曲线分析方法和经验关系式方法。一般来讲,数值模拟是断块油藏标定采收率预测公式最为准确的方法,但由于断块资料往往难以达到要求的资料水平,因此数值模拟的应用受到限制。同时,由于断块的复杂性,室内驱油实验使用的岩心一般代表性不强,使得实验

结果可靠性差。此外,对于人为干预较多的断块油藏来讲,所采取的措施可能会明显影响水驱曲线的走向,使得水驱曲线的准确性较差。

因此,在很多情况下,中国通过经验关系式的方法来预测复杂小断块油藏的采收率。经验关系式的获得一般有2种途径:①对已开发至废弃区块的资料进行归纳总结;②利用数值模拟建立具有代表性的地质模型,进行“虚拟开发”,然后归纳得到。由于获得经验关系式的第1种途径具有很强的限制性,因此,考虑采用第2种方式。

2 采收率标定经验关系式的建立

2.1 经验关系式的形式

结合复杂小断块边水油藏的实际特点,通过对比分析中外采收率标定经验关系式^[5-11],筛选出复杂小断块边水油藏采收率标定的主要影响因素:①储量级别,包括油藏面积和厚度;②储层参数级别,包括平均空气渗透率和储层有效厚度;③非均质系数,即储层渗透率变异系数;④油水粘度比;⑤边水能量,即利用单井控制面积,将边水能量的作用转化为边缘注水模式下的水井作用来表征。

初步建立复杂小断块边水油藏采收率标定经验关系式为

收稿日期:2009-10-15;改回日期:2009-12-28。

作者简介:刘睿,女,在读博士研究生,主要从事油气田开发理论与系统工程方面的研究。联系电话:(010)89733096,E-mail:lrbeij@163.com。

基金项目:国家“863”项目“渤海油田聚合物驱提高采收率技术研究”(2007AA090701)子课题

$$E_r = A_1 + A_2 \lg \mu_r + A_3 \lg K + A_4 \exp(A_5 a) + A_6 v_k^3 + A_7 h \quad (1)$$

式中: E_r 为油藏最终采收率; $A_1, A_2, A_3, \dots, A_7$ 为系数; μ_r 为油水粘度比; K 为平均空气渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; a 为油水井平均单井控制面积, $\text{km}^2/\text{口}$; v_k 为渗透率变异系数; h 为油藏的总有效厚度, m 。

边水弹性能可以提供的油藏累积水侵量为

$$W_e = V_{pw} C_{tw} \Delta p = V_w \phi C_{tw} \Delta p \quad (2)$$

式中: W_e 为油藏累积水侵量, m^3 ; V_{pw} 为边水区域孔隙体积, m^3 ; C_{tw} 为边水区域的综合压缩系数, MPa^{-1} ; Δp 为地层压降, MPa ; V_w 为边水区域总体积, m^3 ; ϕ 为油藏孔隙度。

于是, 边水等效水井数为

$$n_w' = \frac{W_e}{W_i} \quad (3)$$

式中: n_w' 为边水等效水井井数; W_i 为油藏含水率达到 98% 时平均单井累积注水量, m^3 。

因此, 考虑了边水能量等效水井数目的油水井平均单井控制面积为

$$a = \frac{A}{n_o + n_w + n_w'} \quad (4)$$

式中: A 为含油面积, km^2 ; n_o 为实际油井井数; n_w 为实际水井井数。

2.2 数值模拟方案及结果

参考复杂小断块边水油藏的实际资料, 构建中高渗透复杂小断块边水油藏典型模型。通过数值模拟虚拟开发, 采用单因素分析的方法, 确定各影响因素对应的系数。

首先确定 1 组基础参考数据: ①油水粘度比为 4; ②平均空气渗透率为 $200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; ③单井控制面积为 $0.0625 \text{ km}^2/\text{口}$, 由 15 倍水体的边水能量及实际生产的油水井井数换算而来; ④渗透率变异系数为 0.7; ⑤储层有效厚度为 30m。然后, 在进行单个因素对采收率的影响分析时, 只改变对应单个因素的取值, 其他因素的取值不变, 等于基础参考数据, 从而达到单因素分析的目的。根据不同的 μ_r , K , v_k 和 h , 分别设计了 6 组模拟方案。另外, 鉴于式 (1) 中的 a 项涉及到了 A_4 和 A_5 共 2 个待定系数, 为满足解方程的条件, 对单井控制面积 a 这个影响因素设计了 7 组模拟方案。各方案对应着不同的油藏最终采收率模拟计算结果(表 1)。

表 1 油藏最终采收率数值模拟计算结果

μ_r	E_r	$K/10^{-3} \mu\text{m}^2$	E_r	$a/(\text{km}^2 \cdot \text{口}^{-1})$	E_r	v_k	E_r	h/m	E_r
2	0.462 4	50	0.332 7	0.01	0.460 3	0.1	0.495 5	4.5	0.423 4
4	0.422 1	100	0.378 8	0.022 5	0.448 1	0.2	0.491 1	10.5	0.422 9
8	0.379 1	200	0.422 1	0.04	0.437 7	0.35	0.482 6	15	0.422 7
16	0.325 0	400	0.447 1	0.062 5	0.422 1	0.5	0.463 9	22.5	0.422 4
30	0.273 3	600	0.478 9	0.09	0.413 8	0.7	0.422 1	30	0.422 1
50	0.227 6	800	0.500 4	0.122 5	0.392 2	0.9	0.312 3	45	0.421 6
				0.202 5	0.340 8				

从上面 5 个影响因素数值模拟的预测结果可以看出: 随着某个影响因素数值的改变, 油水粘度比、平均空气渗透率、单井控制面积、渗透率变异系数这 4 个影响因素, 对油藏最终采收率的影响较大; 而储层有效厚度这个影响因素对油藏最终采收率的影响很小。由此可见, 对于复杂小断块边水油藏的采收率预测, 边水能量的大小不容忽视。

2.3 经验关系式的系数推导

系数 A_2 根据数值模拟结果, 可得到不同油水粘度比对应的油藏最终采收率 $E_{r1}(\mu_{r1}), E_{r2}(\mu_{r2}), E_{r3}(\mu_{r3}), E_{r4}(\mu_{r4}), E_{r5}(\mu_{r5}), E_{r6}(\mu_{r6})$, 代入式 (1) 并消去与 μ_r 无关的项, 得到油藏最终采收率的差值

$$\Delta E_{r1}(\mu_r) = E_{ri}(\mu_{ri}) - E_{r1}(\mu_{r1}) = A_2 (\lg \mu_{ri} - \lg \mu_{r1}) \quad (5)$$

式中: $\Delta E_{r1}(\mu_r)$ 为油藏最终采收率差值, $i = 2,$

3, 4, 5, 6。

对式 (5) 累加求和可以得到

$$\sum_{i=2}^6 E_{ri}(\mu_{ri}) - 5E_{r1}(\mu_{r1}) = A_2 \sum_{i=2}^6 (\lg \mu_{ri} - \lg \mu_{r1}) \quad (6)$$

计算出系数 $A_2 = -0.156 3$ 。

将系数 A_2 代入式 (5), 得到不同油水粘度比下油藏最终采收率的计算差值, 即 $-0.156 3 \times (\lg \mu_{ri} - \lg \mu_{r1})$, 模拟差值为 $E_{ri}(\mu_{ri}) - E_{r1}(\mu_{r1})$, 二者基本吻合(表 2)。

系数 A_3, A_6 和 A_7 系数 A_3, A_6 和 A_7 用类似方法可以计算出, 系数 $A_3 = 0.136 6, A_6 = -0.245 8, A_7 = -5.014 9 \times 10^{-5}$ 。

系数 A_4 和 A_5 计算系数 A_4 和 A_5 时, 采用迭代计算的方法推导。首先按照推导其他系数的方法,

表 2 改变油水粘度比时油藏最终采收率模拟差值与计算差值对比

差值	模拟差值	计算差值
$\Delta E_{r21}(\mu_r)$	-0.040 3	-0.047 0
$\Delta E_{r31}(\mu_r)$	-0.083 4	-0.094 1
$\Delta E_{r41}(\mu_r)$	-0.137 4	-0.141 2
$\Delta E_{r51}(\mu_r)$	-0.189 1	-0.183 9
$\Delta E_{r61}(\mu_r)$	-0.234 8	-0.218 6

消去式(1)中与 a 无关的各项,再累加求和可以得

$$\sum_{i=2}^7 E_{ri}(a_i) - 6E_1(a_1) = A_4 \left[\sum_{i=2}^7 \exp(A_5 a_i) - 6 \exp(A_5 a_1) \right] \quad (7)$$

式中: $i=2,3,4,5,6,7$ 。

采用迭代方法试算可求得 $A_4 = -6.669 3, A_5 = 0.095 31$ 。

将计算出的 A_4 和 A_5 代入式(7),得到油藏最终采收率的计算差值,即 $-6.669 3[\exp(0.095 31a_i) - \exp(0.095 31a_1)]$,模拟差值为 $E_{ri}(a_i) - E_{r1}(a_1)$,二者吻合较好(表 3)。

表 3 改变边水能量时油藏最终采收率模拟差值与计算差值对比

差值	模拟差值	计算差值
$\Delta E_{r21}(a)$	-0.012 2	-0.008 0
$\Delta E_{r31}(a)$	-0.022 6	-0.019 1
$\Delta E_{r41}(a)$	-0.038 2	-0.033 5
$\Delta E_{r51}(a)$	-0.056 6	-0.051 1
$\Delta E_{r61}(a)$	-0.068 1	-0.071 9
$\Delta E_{r71}(a)$	-0.119 5	-0.123 6

系数 A_1 将上述求出的 6 个系数 $A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$ 代入式(1)中,一共可以得到 31 个仅含未知数 A_1 的方程。累加后求平均,即可求得系数 $A_1 = 6.995 2$ 。

采收率标定经验关系式 通过多元回归得到了各个影响参数的系数,代入式(1),即可初步得到复杂小断块边水油藏的采收率标定经验关系式为

$$E_r = 6.995 2 - 0.156 2 \lg \mu_r + 0.136 6 \lg K - 6.669 3 \exp(0.095 31a) - 0.245 9 v_k^3 - 4.993 5 \times 10^{-5} h \quad (8)$$

2.4 经验关系式的修正

从油藏工程角度来讲,笔者新建立的复杂小断块边水油藏的采收率标定经验关系式——式(8)考虑因素相对周全,出发点更为合理,因此,理论上认为其采收率预测结果更可靠。然而,鉴于式(8)是在概念模型的基础上建立的,所模拟的井间连通情况、

井网控制情况等都是非常理想的,且不同类型储层的微观可流动空间差距较大。因此,考虑到油田的实际复杂情况,需要对式(8)进一步完善,由此得

$$E_{ru} = E_1 E_2 E_r \frac{(1 - S_{wc} - S_{or})(1 - S_{wc}')}{(1 - S_{wc}' - S_{or}')(1 - S_{wc})} \quad (9)$$

式中: E_{ru} 为修正后的油藏最终采收率; E_1 为井间厚度连通系数; E_2 为井网控制因子; S_{wc}, S_{or} 分别为实际油藏的束缚水饱和度和残余油饱和度; S_{wc}', S_{or}' 分别为标定过程中典型模型采用的束缚水饱和度和残余油饱和度。

由于在典型模型中 $S_{wc}' = 0.35, S_{or}' = 0.25$,所以式(9)可化简为

$$E_{ru} = 1.625 E_1 E_2 E_r \frac{1 - S_{wc} - S_{or}}{1 - S_{wc}} \quad (10)$$

式(10)即为修正后的复杂小断块边水油藏的采收率标定经验关系式。

3 采收率标定经验关系式的验证

为了检验笔者所建立的复杂小断块边水油藏的采收率标定经验关系式的合理性,选取中外现有的多组采收率经验关系式^[11],代入不同边水能量级别的实际油藏数据,与式(10)预测的油藏最终采收率结果进行对比(表 4)。

表 4 不同采收率标定经验关系式的采收率预测结果对比

经验关系式	边水能量较强		边水能量较弱	
	Y21 块	Y25 块	H10 块	H12 块
Guthrie 和 Greenberger 法公式	0.31	0.33	0.26	0.21
美国石油学会水驱油藏经验关系式	0.46	0.47	0.25	0.25
前苏联 Кожакин 的相关经验关系式	0.45	0.50	0.26	0.24
Maftoc 等的相关经验关系式	0.57	0.60	0.24	0.26
中国水驱砂岩相关经验关系式	0.45	0.47	0.25	0.23
复杂小断块边水油藏采收率标定经验关系式	0.36	0.32	0.24	0.23

通过表 4 可以看出:①当边水能量较弱时,复杂小断块边水油藏采收率标定经验关系式同已有采收率标定经验关系式相比,采收率预测结果相近,误差较小,为 0~13%;但当边水能量较强时,已有经验关系式预测的结果偏高,误差较大,为 3%~88%。②新建立的复杂小断块边水油藏采收率标定经验关系式,综合考虑了边水、驱油效率、储量动用、储层物

性和展布等油藏实际情况,考虑因素相对周全,理论上更加符合实际,预测结果更可靠。

4 结论

复杂小断块边水油藏的采收率除了与油水粘度比、平均空气渗透率、渗透率变异系数等因素有密切的关系之外,边水能量的大小也不能忽略。通过将边水能量转化为边缘注水模式下的水井作用,来灵活表征不同级别边水的情况,从而实现边水能量对复杂小断块边水油藏采收率预测过程中的标定作用。利用数值模拟进行虚拟开发和多元回归的方法,可标定复杂小断块边水油藏采收率的经验关系式。这种方法有一定的可靠性,对其他油田有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 陈国利. 英台地区天然水驱油藏的开发特点及稳产技术[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(6): 45-47.

[2] 曾祥平. 边底水稠油油藏水侵预警分析与治理——以孤岛油田中二北 Ng5 为例[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(1): 80-83.

[3] 郭秀文. 边底水油藏见水时间及无水期采收率的确定[J]. 断块油气田, 2003, 10(1): 51-52.

[4] 王光付, 许坚, 王端平, 等. 中国石化不同类型断块油藏水驱采收率分析[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(4): 96-98.

[5] 张以根. 胜利油田断块油藏产量递减影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(3): 90-93.

[6] 尤启东, 周方喜, 张建良. 复杂小断块油藏水驱开发效果评价方法[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(1): 78-81.

[7] 吴宜禄, 李晓平, 李海涛. 凝析气藏自然衰竭式开采的采收率预测方法[J]. 西南石油学院学报, 2004, 26(4): 38-40, 43.

[8] 魏兴华. 储层因子在疏松砂岩油藏采收率预测中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(6): 51-52, 55.

[9] 冉启佑. 碳酸盐岩油藏采收率标定的新型经验公式[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(1): 50-52.

[10] 刘桂玲, 谭旭东, 张连. 江苏油田复杂小断块油田采收率标定方法的应用评价[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(1): 53-55.

[11] 刘德华, 刘志森. 油藏工程基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 36-47.

编辑 刘北羿

(上接第 63 页)

个数据。一类油层的数据较少,这可能是其采出程度定量关系式精度相对较低的原因。故在实际应用中,建议用于拟合采出程度的数据个数大于 20 个。

4 结论

高含水期采出程度不受单一因素控制,而是受多种因素共同影响。采用逐步回归的方法优选对采出程度影响大的参数,对于不同油层类型,影响采出程度的主要因素不同。采用逐步回归的方法确定了各参数与采出程度之间的定量关系式,由定量关系式计算的采出程度与实际采出程度较为接近,其精度符合实际生产要求。该方法可用于预测非取心层段的采出程度,可以为油田开发方案调整、措施井层优选提供重要的依据。

参考文献:

[1] 刘鹏程. 逻辑斯蒂旋回模型预测油田采出程度的广义形式[J].

油气采收率技术, 2000, 7(3): 31-34.

[2] 蒋焱, 曹功泽, 赵凤敏, 等. 聚合物驱后微生物提高采收率的可行性分析[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(5): 63-65, 68.

[3] 钱杰, 张国珍, 原观军, 等. 萨尔图北一、二排西上返区块采出程度分析[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(2): 61-63.

[4] 郝磊. 简化历史拟合法计算水驱空白阶段采出程度[J]. 油气田地面工程, 2006, 25(9): 10.

[5] 吴湛, 彭鹏商. 水驱油田采出程度计算及措施效果评价[J]. 石油学报, 1994, 15(1): 76-82.

[6] 金宏坤, 姚小明. 潜江凹陷潜江组原油采收率经验公式的确定[J]. 江汉石油科技, 2007, 17(4): 1-3.

[7] 张武, 丁晓军, 陈晓冬. 注水利用率方法评价油藏开发效果[J]. 内蒙古石油化工, 2009, (13): 40-41.

[8] 韩大匡. 深度开发高含水油田提高采收率问题的探讨[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(5): 47-55.

[9] 李汉林, 赵永军. 石油数学地质[M]. 东营: 石油大学出版社, 1998: 26-54.

编辑 刘北羿