

确定水驱油藏水侵量和经济可采储量的新方法

唐林¹,赵长虹²,王丽²,杨公渠³,高佳⁴

(1.中国石油天然气管道局,河北廊坊 065000; 2.中国石油新疆油田分公司 风城油田作业区,新疆克拉玛依 834000;
3.中国石油长城钻探工程有限公司 固井公司,辽宁盘锦 124010; 4.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东青岛 266580)

摘要:为了更加准确、简便地预测水驱油藏水侵量和经济可采储量,通过对其计算方法的研究,基于张金庆水驱特征曲线和 Welge 方程,结合实际生产动态资料,利用经济极限产量推导出出水渗流特征及经济可采储量与经济极限含水率的关系式,再结合水侵量的物质平衡原理,确立计算水驱油藏水侵量和经济可采储量的新方法。不同综合含水率阶段的水侵量变化规律表明:水驱油藏的综合含水率越大,水侵量越大;当综合含水率小于 60% 时,水侵量随综合含水率呈线性增长;当综合含水率为 60%~80% 时,水侵量增幅变大;当综合含水率大于 80% 时,水侵量随综合含水率呈“上翘”式增长,水驱油藏水淹程度加快。

关键词:水驱油藏 水侵量 经济可采储量 水驱特征曲线 经济极限含水率

中国分类号: TE313.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2014)05-0084-03

水驱油藏水侵量和经济可采储量的确定是水驱油藏动态分析及合理高效开发的基础。许多学者对水驱油藏水侵量的计算进行了相关的研究^[1-6],常用的水侵量计算方法及模型主要有物质平衡法、Schilthuis 稳态模型^[7]、Van Everdingen & Hurst 非稳态模型^[8]和 Fetkovich 拟稳态模型^[9]。物质平衡法计算虽简单,但其所需参数较多且一些参数(如石油地质储量、原始水驱压力与地层压力差等)不易确定,而用其他 3 种模型计算过程则相当复杂。

在中国各大油区,水驱特征曲线法是预测水驱油藏技术可采储量的重要方法,利用经济极限产量的概算法可以得到经济极限含水率,结合两者计算得到的储量即为经济可采储量^[10-11]。张金庆水驱特征曲线是一种广义水驱特征曲线^[12-15],笔者以张金庆水驱特征曲线和经济极限产量概算法为基础,提出了确定经济可采储量的方法。基于张金庆水驱特征曲线和水侵量的物质平衡原理,利用 Welge 方程推导出计算水驱油藏水侵量的新方法,该方法只需要已知原始原油体积系数、地层水体积系数以及产油量、产水量等生产动态数据就可以计算出不同时刻的水侵量。由于张金庆水驱特征曲线可用于描述各种不同类型的综合含水率与采出程度的关系曲线,因此,采用该曲线计算水侵量和经济可采储量的新方法适用于所有水驱油藏。

1 水侵量的计算

张金庆提出一种简单实用的水驱特征曲线^[12],其表达式为

$$\frac{W_p}{N_p} = -a + b \frac{W_p}{N_p^2} \quad (1)$$

式中: W_p 为累积产水量, 10^4 m^3 ; N_p 为累积产油量, 10^4 m^3 ; a 和 b 为回归系数。

累积产油量与综合含水率以及水油比与综合含水率的关系式分别为

$$f_w = \frac{a - a \left(1 - \frac{N_p}{b}\right)^2}{(1-a) \left(1 - \frac{N_p}{b}\right)^2 + a} \quad (2)$$

$$F_{wo} = \frac{f_w}{1-f_w} \quad (3)$$

式中: f_w 为综合含水率, %; F_{wo} 为水油比。

将式(2)代入式(3)整理后得

$$F_{wo} = \frac{a - a \left(1 - \frac{N_p}{b}\right)^2}{\left(1 - \frac{N_p}{b}\right)^2} \quad (4)$$

收稿日期: 2014-06-23。

作者简介: 唐林,男,硕士,从事油气田开发及油气藏数值模拟研究。联系电话: 18728499475, E-mail: 865886594@qq.com。

基金项目: 国家科技重大专项“高压气藏安全高效开发技术”(2011ZX05015-002), 新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0950)。

由俞启泰定义可得,累积产油量与石油地质储量和含水饱和度的关系式^[16]为

$$N_p = N(\bar{S}_w - S_{wi}) \quad (5)$$

式中: N 为石油地质储量, 10^4 m^3 ; \bar{S}_w 为平均含水饱和度, %; S_{wi} 为束缚水饱和度, %。

由 Welge 方程可知,油水两相平均含水饱和度与出口端含水饱和度的关系式为

$$\bar{S}_w = S_w + \frac{1-f_w}{\frac{df_w}{dS_w}} \quad (6)$$

式中: S_w 为出口端含水饱和度, %。

整理式(2)、式(5)和式(6),由常微分方程手则^[17]积分整理后得

$$S_w = S_{wi} + \frac{b}{N} \left[1 - 2\sqrt{a} \sqrt{(a-1)(1-f_w)^2 + (1-f_w)} \right] - (1-f_w)C \quad (7)$$

式中: C 为系数。

当综合含水率为0时,含水饱和度等于束缚水饱和度,由式(7)得

$$C = \frac{b}{N}(1-2a) \quad (8)$$

整理式(7)和式(8)后可得

$$S_w - S_{wi} = \frac{b}{N} \left[f_w + 2a(1-f_w) - 2\sqrt{a} \sqrt{(a-1)(1-f_w)^2 + (1-f_w)} \right] \quad (9)$$

式(9)即为根据张金庆水驱特征曲线推导出的含水饱和度与综合含水率的关系式,应用该式可以计算不同生产阶段、不同综合含水率下水驱油藏的含水饱和度。

水侵量的物质平衡方程为

$$W_e = W_p B_w - W_i B_w + NB_{oi}(S_w - S_{wi}) \quad (10)$$

式中: W_e 为累积水侵量, 10^4 m^3 ; B_w 为地层水体积系数, m^3/m^3 ; W_i 为累积注水量, 10^4 m^3 ; B_{oi} 为原始原油体积系数, m^3/m^3 。

将式(9)代入式(10)整理可得

$$W_e = W_p B_w - W_i B_w + bB_{oi} \times \left[f_w - 2\sqrt{a} \sqrt{(a-1)(1-f_w)^2 + (1-f_w)} + 2a(1-f_w) \right] \quad (11)$$

由式(11)可知,当已知原始原油体积系数、地层水体积系数、累积注水量、累积产水量、累积产油量和综合含水率等参数时,由式(11)求得不同生产阶段水驱油藏水侵量。当累积注水量不等于0时,利用式(11)求得注水开发时水驱油藏水侵量;当累积注水量为0时,即水驱油藏采用天然水驱开采,也可以利用式(11)计算天然水驱油藏的水侵量。

2 经济可采储量的计算

当考虑经济极限时,由式(2)可得张金庆水驱特征曲线预测的经济可采储量为

$$N_{pE} = b \left[1 - \frac{a(1-f_{wEL})}{\sqrt{a(1-f_{wEL}) + f_{wEL}}} \right] \quad (12)$$

式中: N_{pE} 为经济可采储量, 10^4 m^3 ; f_{wEL} 为经济极限含水率, %。

当水驱油藏进入中高含水期后,产量将进入递减阶段,水油比和产油量的关系为

$$\lg F_{wo} = A - BQ_o \quad (13)$$

式中: A 和 B 为系数; Q_o 为产油量, 10^4 m^3 。

当考虑经济极限时,经济极限水油比和经济极限产油量的关系为

$$F_{woEL} = 10^{A-BQ_{oEL}} \quad (14)$$

式中: F_{woEL} 为经济极限水油比; Q_{oEL} 为经济极限产油量, 10^4 m^3 。

将式(3)代入式(14)整理后可得

$$f_{wEL} = \frac{1}{1 + 10^{BQ_{oEL} - A}} \quad (15)$$

陈元千根据投入与产出的平衡原理,得到水驱油藏经济极限产油量的关系式^[10]为

$$Q_{oEL} = \frac{C_i}{\eta(A_o + A_g GOR)(1 - T_x)} \quad (16)$$

式中: C_i 为油田每年生产总费用, 10^4 元/a ; η 为商品率; A_o 为目前原油价格, $\text{元}/\text{m}^3$; A_g 为目前天然气价格, $\text{元}/\text{m}^3$; GOR 为生产气油比, $\text{m}^3/10^4 \text{ m}^3$; T_x 为综合税率。

根据式(16)确定经济极限产量后,将其代入式(15)可得经济极限含水率,再将其含水率代入式(12)即可求得经济可采储量。

3 实例分析

以某水驱油藏为例,该油藏砂体展布具有一定稳定性,砂体分布较广,物性较好,原始原油体积系数为 $1.226 \text{ m}^3/\text{m}^3$,地层水体积系数为 $1.016 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。该油藏于2009年8月开始投产,至2013年12月累积产油量为 $72.51 \times 10^4 \text{ m}^3$,累积产水量为 $135.27 \times 10^4 \text{ m}^3$,综合含水率为81.65%。计算经济可采储量时所用的2013年经济评价参数包括:油田每年生产总费用为 $400 \times 10^4 \text{ 元/a}$;原油价格为 $4030 \text{ 元}/\text{m}^3$;天然气价格为 $2 \text{ 元}/\text{m}^3$;商品率为0.98;生产气油比为204

$\text{m}^3/10^4 \text{m}^3$;综合税率为0.35。

该油藏由水驱特征曲线法和产油量递减法确定的技术可采储量为 $89.26 \times 10^4 \text{m}^3$;由张金庆水驱特征曲线法计算的经济可采储量为 $87.57 \times 10^4 \text{m}^3$,占技术可采储量的98.1%。根据物质平衡法求得的水侵量为 $175.05 \times 10^4 \text{m}^3$;而用新方法求得的水侵量为 $179.96 \times 10^4 \text{m}^3$,两者之间的相对误差为2.81%。

新方法计算的水侵量和经济可采储量分别与其实际值吻合程度较好(图1),说明新方法计算结果准确、可靠。

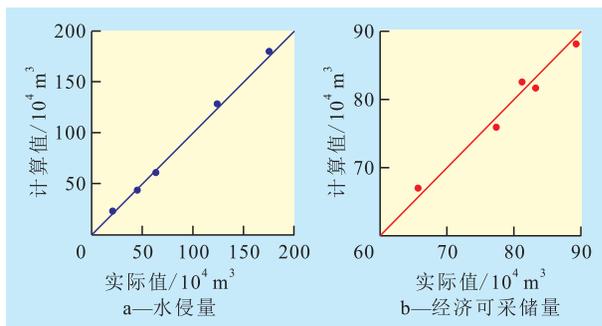


图1 新方法计算的水侵量和经济可采储量值与实际值的拟合结果

由式(11)得到的水侵量与综合含水率的变化曲线(图2)可看出,水驱油藏水侵量随着综合含水率的增加而增大,当综合含水率小于60%时,水驱油藏开发处于初期开发阶段,水侵量与综合含水率呈线性增长;当综合含水率为60%~80%时,水驱油藏开发进入中后期开发阶段,地层亏空体积增大,水侵量增幅变大;当综合含水率大于80%时,水侵量随综合含水率的增加呈“上翘”式增长,水驱油藏的水淹程度加快。

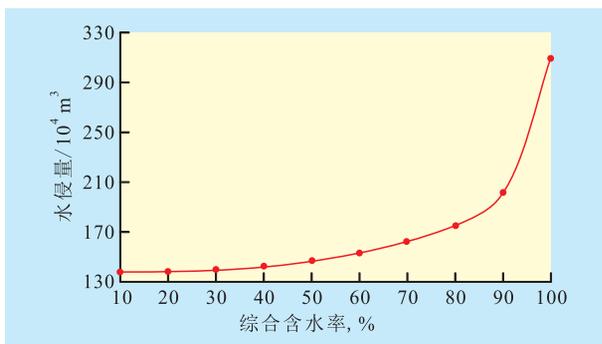


图2 水侵量随综合含水率的变化

4 结束语

张金庆水驱特征曲线作为一种既简单又能够

综合反映不同类型的综合含水率和采出程度的关系,适用于所有水驱油藏。以张金庆水驱特征曲线和水侵量的物质平衡原理为基础,利用 Welge 方程和经济极限产油量法推导出了计算水驱油藏水侵量和经济可采储量的新方法。该方法计算过程简单,计算结果准确、可靠,其经济极限含水率是通过经济极限产油量计算的,这较以前对于不同类型的油藏均选用98%作为经济极限含水率的方法更加合理。

参考文献:

- [1] 李传亮.气藏水侵量的计算方法研究[J].新疆石油地质,2003,24(5):430-431.
- [2] 雷刚,董平川,尤文浩,等.低渗透变形介质砂岩油藏注水见效时间及影响因素[J].油气地质与采收率,2013,20(6):69-72.
- [3] 王怒涛,陈浩,张爱红,等.边底水油藏水侵量计算最优化方法[J].大庆石油地质与开发,2006,25(1):56-58.
- [4] 张凤东,康毅力,刘永良,等.致密气藏开发过程中水侵量的最优化计算[J].油气地质与采收率,2007,14(6):85-87.
- [5] 吴克柳,李相方,许寒冰,等.考虑反凝析的凝析气藏水侵量计算新方法[J].特种油气藏,2013,20(5):86-88.
- [6] Munenori Shimada, Turhan Yildiz. Predicting water influx from common shared aquifers[R]. SPE 120897, 2009.
- [7] Schilthuis R J. Active oil and reservoir energy [R]. SPE 936033-G, 1936.
- [8] Van Everdingen A F, Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs [R]. SPE 949305, 1949.
- [9] Fetkovich M J. A simplified approach to water influx calculations—finite aquifer systems [R]. SPE 2603, 1971.
- [10] 陈元千.用水驱曲线确定经济极限含水率的方法及其应用[J].新疆石油地质,2010,31(2):158-162.
- [11] 尚明忠,苏映宏,侯春华,等.新增探明储量的经济可采储量计算方法[J].油气地质与采收率,2002,9(5):42-43.
- [12] 张金庆.一种简单实用的水驱特征曲线[J].石油勘探与开发,1998,25(3):56-57.
- [13] 王华.改进型水驱特征曲线计算技术可采储量的公式推导及其应用[J].油气地质与采收率,2012,19(4):84-86.
- [14] 俞启泰.关于《石油可采储量计算方法》标准中的水驱特征曲线法——兼答陈元千先生质疑[J].石油科技论坛,2002,21(6):30-35.
- [15] 俞启泰,谢绪权,李炎波. SY/T 5367—1998 石油可采储量计算方法[S].北京:石油工业出版社,1999.
- [16] 俞启泰.几种重要水驱特征曲线的油水渗流特征[J].石油学报,1999,20(1):56-60.
- [17] 卡姆克 E. 常微分方程手册[M].张鸿林,译.北京:科学出版社,1980:1-25.