

特高含水期甲型水驱特征曲线的改进

侯 健¹, 王容容¹, 夏志增¹, 邴邵献², 苏映宏², 王 华²

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院, 山东东营 257015)

摘要:室内试验和矿场实践表明,现有水驱特征曲线在特高含水期适用性差,出现偏离直线段上翘的现象,影响水驱开发动态的准确预测。为此,提出适用于特高含水期的新型水驱特征曲线。首先提出适用性较强的油水相对渗透率比值与含水饱和度关系表征方程,得到可以充分考虑开发后期上翘现象的新型水驱特征曲线,指出原有水驱特征曲线是新型水驱特征曲线在含水率较低时的一个特例,并提出通过公式转化和线性试差的方法求解新型水驱特征曲线方程中的参数。计算结果表明,新型水驱特征曲线在特高含水期预测开发动态比传统的水驱特征曲线更为准确。

关键词:油藏; 水驱特征曲线; 相对渗透率曲线; 水驱; 特高含水期

中图分类号:TE 341

文献标志码:A

Improvement of water displacement curve for water flooded oil reservoirs at ultra-high water cut stage

HOU Jian¹, WANG Rong-rong¹, XIA Zhi-zeng¹, BING Shao-xian², SU Ying-hong², WANG Hua²

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257015, China)

Abstract: A lot of experimental results and field practices show that the water displacement curve may deviate out from a straight line and unwrap at an ultra-high water cut stage, thus the adaptability of the conventional water displacement curve is poor for water flooded reservoirs at the ultra-high water cut stage. An improved water displacement curve suitable for ultra-high water cut stage was proposed. Firstly, a new characterization equation for the relationship between water-oil relative permeability ratio and water saturation suitable for high water cut was proposed, and then a new water-flooding characteristic curve was derived accordingly. It is found that the conventional water displacement curve can be as a special case of the improved model at low water cut conditions. A method based on equation transformation and linear trial and error method was proposed to determine the parameters in the new water displacement curve equation. A case study was conducted, and the result shows that the new water displacement curve is more accurate than the conventional model in predicting the production performance for reservoirs at ultra-high water cut stage.

Key words: reservoir; water displacement curve; relative permeability curve; water displacement; ultra-high water cut stage

水驱特征曲线是标定可采储量、预测油田开发动态的油藏工程方法^[1-8],但随着对水驱曲线研究的日益深入,发现其在油田开发后期在半对数坐标上存在上翘现象^[9-11];同时室内试验也观察到油水相对渗透率比值与含水饱和度在半对数坐标下于高含水阶段存在“下弯”现象,使得应用水驱特征曲线预

测油田开发动态的效果变差。笔者提出一种新的水驱特征曲线,以提高特高含水期开发动态预测的准确性。

1 新型水驱特征曲线的提出

目前描述油水相对渗透率比值与含水饱和度定

收稿日期:2013-01-15

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05011);山东省自然科学基金项目(JQ201115);新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0734);中国石油大学研究生创新基金项目(CX-1207);长江学者和创新团队发展计划(IRT1249)

作者简介:侯健(1972-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事三次采油方面的科研与教学工作。E-mail:houljian@upc.edu.cn。

量关系较为简洁常用的模型为 Craft 等^[12]提出的公式,即

$$\ln \frac{K_{ro}}{K_{rw}} = c + dS_w. \quad (1)$$

式中, K_{ro} 和 K_{rw} 分别为油相和水相相对渗透率; S_w 为含水饱和度; c 和 d 为常数。

油水相对渗透率比值与含水饱和度在半对数坐标下呈直线关系。但大量的室内试验观察到油水相对渗透率比值与含水饱和度在半对数坐标下高含水阶段存在“下弯”现象,为准确定量分析油水渗流特征,提出新的油水相对渗透率比值与含水饱和度的关系表征方程,即

$$\ln \frac{K_{ro}}{K_{rw}} = m + nS_w + p \exp(S_w). \quad (2)$$

式中, m 、 n 和 p 为常数。

选用胜利油区中高渗整装砂岩油藏三条典型相对渗透率曲线^[11],分别利用式(1)和(2)进行拟合,拟合计算结果如图 1 所示。可以看出,新型油水相对渗透率比值与含水饱和度关系表征方程在高含水饱和度的下弯段拟合精度较高。

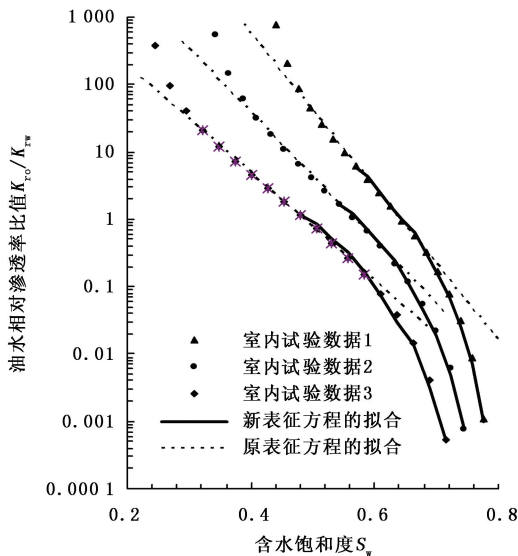


图 1 油水相对渗透率比值与含水饱和度的表征关系

Fig. 1 Characterization relationship between oil-water relative permeability ratio and water saturation

基于原水驱特征曲线的推导过程^[1-2,13]及油水相对渗透率比值与含水饱和度关系的新表征方程,可以推导得到新型水驱特征曲线。不考虑重力和毛管力的影响,在水驱的稳定渗流条件下,油水产量之间存在如下关系:

$$\frac{Q_o}{Q_w} = \frac{K_{ro}\mu_w B_w \gamma_o}{K_{rw}\mu_o B_o \gamma_w}. \quad (3)$$

式中, Q_o 和 Q_w 分别为地面原油和水产量, t/d ; μ_o 和 μ_w 分别为地层原油和地层水的黏度, $mPa \cdot s$; B_o 和 B_w 分别为地层原油和地层水的体积系数; γ_o 和 γ_w 分别为地面脱气原油和地面水的相对密度。

油田的累积产水量计算式为

$$W_p = \int_0^t Q_w dt. \quad (4)$$

式中, W_p 为累积产水量, $10^4 t$ 。

根据物质平衡方程,油田累积产油量计算式为

$$N_p = 100Ah\phi \frac{\gamma_o}{B_{oi}} (\bar{S}_w - S_{wc}). \quad (5)$$

式中, N_p 为累积产油量, $10^4 t$; $\bar{S}_w$ 为油藏平均含水饱和度; A 为油藏面积, km^2 ; h 为油层有效厚度, m ; ϕ 为油藏孔隙度; B_{oi} 为地层原油初始体积系数; S_{wc} 为油藏束缚水饱和度。

当油田进入高含水期^[5,7],有

$$\bar{S}_w = S_w. \quad (6)$$

由油田瞬时产油量与累积产油量的关系可得

$$Q_o = \frac{dN_p}{dt} = 100Ah\phi \frac{\gamma_o}{B_{oi}} \frac{dS_w}{dt}. \quad (7)$$

将式(3)、(5)、(6)、(7)带入到式(4),得到新型的甲型水驱特征曲线为

$$\lg(W_p + M) = A + BN_p + C \exp(DN_p). \quad (8)$$

式中, M 、 A 、 B 、 C 和 D 为常数。

当采出程度较低时,

$$C \exp(DN_p) \approx C(1 + DN_p). \quad (9)$$

则

$$\lg(W_p + M) = (A + C) + (B + CD)N_p. \quad (10)$$

记 $A + C = a$, $B + CD = b$, 则有

$$\lg(W_p + M) = a + bN_p. \quad (11)$$

即新型水驱特征曲线可简化为传统的甲型水驱特征曲线的形式。

随着油田开发的继续,累积产水量增大,常数 M 的影响逐渐减少,从而有

$$\lg W_p = A + BN_p + C \exp(DN_p). \quad (12)$$

可以看出,传统的甲型水驱特征曲线 $\lg(W_p + M) = a + bN_p$ 仅是新型水驱曲线 $\lg(W_p + M) = A + BN_p + C \exp(DN_p)$ 在采出程度较低时的一个特例。但随着油田开发的进行,采出程度增大,尤其到开发后期,一般采出程度和含水率都较高,式(2)的误差将变得较大,原有的水驱曲线后端仍为直线,而新型水驱特征曲线可以拟合实际曲线出现的上翘现象。

2 参数的求取

新型水驱特征曲线较原有形式复杂,参数不易

求取,现场应用不方便,为此提出了一种求解参数的新方法。

对式(12)两端关于累积产油量 N_p 求导数,有

$$\frac{d(\lg W_p)}{dN_p} = B + CD \exp(DN_p). \quad (13)$$

即

$$\frac{d(\lg W_p)}{dN_p} - B = CD \exp(DN_p). \quad (14)$$

两端取对数有

$$\ln \left(\frac{d(\lg W_p)}{dN_p} - B \right) = \ln CD + DN_p. \quad (15)$$

作 $\ln \left(\frac{d(\lg W_p)}{dN_p} - B \right) \sim N_p$ 的曲线图,两者应该

满足直线关系,通过线性试差确定 B 值,如图 2 所示。得到直线关系后,通过直线斜率确定 D 值,通过直线截距确定 C 值。最后根据开发动态数据可以计算得到 A 值,选取任意时刻 t_i ,则有 $A_i = (\lg W_p)_{t_i} - BN_{p_{t_i}} - C \exp(DN_{p_{t_i}})$,通过多组数据计算并对结果取平均值, $A = \sum_{i=0}^n A_i$,则可得到较为精确的 A 值,从而得到新型水驱特征曲线表达式中各个参数的值。

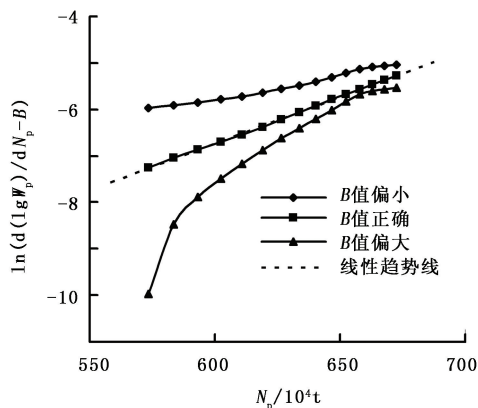


图 2 线性试差法确定新型水驱特征曲线参数

Fig. 2 Parameters determining in new water displacement curve by linear trial and error method

3 矿场应用

以胜利油田特高含水期典型区块为例,利用建立的新型水驱特征曲线对该油藏进行动态预测,并与现场实际动态及传统水驱特征曲线预测结果对比,验证新型水驱特征曲线的适用性。

胜二区沙二 1-2 单元位于胜坨油田东部构造高点西南翼,是一个正韵律、高渗透、非均质严重的低饱和多层砂岩油藏。本区块地质储量为 1407 万 t,含油

面积 9.6 km²,油藏埋深为 1.82 ~ 2.06 km,有效厚度为 8.4 m,原始含油饱和度为 0.68,孔隙度为 0.3,原始油藏压力 20.1 MPa,油藏饱和压力 12.1 MPa,原油黏度 26.32 mPa · s,原油相对密度 0.9237,原始地层水矿化度为 24 g/L,渗透率变异系数为 0.5,平均渗透率为 1.8 μm²,是典型的中高渗透水驱开发油藏。

该区块于 1986 年 7 月投产,1987 年 5 月起进行注水开发,目前区块含水率已达到 97.7%,采收率为 37.7%,其含水率随采出程度关系如图 3 所示。在特高含水阶段通过注采调整、改善注采对应关系、提高多向注采对应率等措施,使含水率有一定程度的降低。

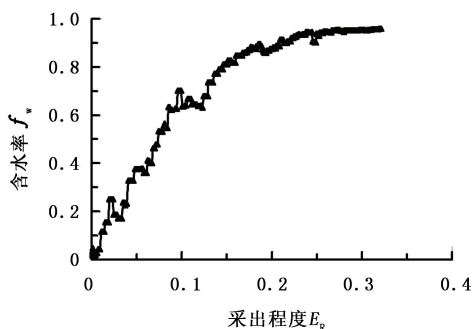


图 3 采出程度与含水率关系曲线

Fig. 3 Relationship between recovery percent and water cut

根据典型区块实际开发数据,考虑注采调整后特高含水期的开发规律,分别采用改进前后水驱特征曲线进行拟合,得到定量表征关系式。

传统关系式为

$$\lg W_p = 2.787 + 0.00186N_p. \quad (16)$$

新型关系式为

$$\lg W_p = 2.824 + 0.00178N_p + 4.71 \times 10^{-6} \times \exp(0.0587N_p). \quad (17)$$

传统及新型的水驱特征曲线对比结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,新型水驱特征曲线可以很好地描述特高含水期的水驱开发动态,而原有水驱特征曲线只能拟合部分特征,不能表征水驱后半段曲线出现的上翘现象。同时,在累积产油量为 534.67 万 t 时,实际累积产液量为 6253.47 万 t,利用改进水驱特征曲线预测累积产液量为 6255.6 万 t,而利用传统水驱特征曲线预测的累积产液量为 6042.3 万 t。可见,新型水驱特征曲线在特高含水期适应性好,精度高,预测偏差较小,能够满足实际工程需要。

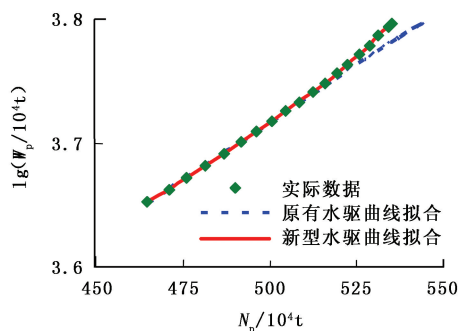


图 4 原有及新型水驱特征曲线结果对比

Fig. 4 Comparison of new water displacement curve and traditional one in predicting development performance

4 结 论

(1) 油水相对渗透率比值与含水饱和度关系新的表征方程 $\ln \frac{K_{ro}}{K_{rw}} = m + nS_w + p \exp(S_w)$ 可以充分反映特高含水期油藏渗流特征,对高含水饱和度的下弯段拟合精度高。

(2) 传统甲型水驱特征曲线只是新型水驱特征曲线 $\lg W_p = A + BN_p + C \exp(DN_p)$ 在采收程度较低时的一个特例。新型水驱特征曲线可以预测特高含水期开发动态且精度高,可以表征特高含水期上翘现象,在特高含水期适用性强。

(3) 公式转换及线性试差法可以方便求取新型水驱特征曲线表达式中的各参数,方便水驱特征曲线在矿场中的应用。

参考文献:

[1] 陈元千. 水驱特征曲线关系式的推导[J]. 石油学报, 1985,6(2):69-78.
CHEN Yuan-qian. A drive characteristic curve equation [J]. Acta Petrolei Sinica, 1985,6(2):69-78.

[2] 陈元千. 一种新型水驱特征曲线关系式的推导及应用[J]. 石油学报, 1993,14(2):65-73.
CHEN Yuan-qian. A new drive characteristic curve equation and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 1993, 14(2):65-73.

[3] 俞启泰,靳红伟. 关于广义水驱特征曲线[J]. 石油学报,1995,16(1):61-69.
YU Qi-tai, JIN Hong-wei. Generalized water displacement curve[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995,16(1):61-69.

[4] 俞启泰. 俞启泰油田开发论文集[M]. 北京:石油工业出版社,1999:29-37.

[5] 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.
YU Qi-tai. Oil and water flow characteristics of several important water drive curves [J]. Acta Petrolei Sinica, 1999,20(1):56-60.

[6] YU Q T. A generalized water displacement curve of forecasting oilfield development indexes [R]. SPE 64717, 2000.

[7] BONDAR V V, BLASINGAME T A. Analysis and interpretation of water-oil-ratio performance [R]. SPE 77569, 2002.

[8] MAKSIMOV M E. A method for estimating recoverable reserve of an water-displacement oil field at the last recovery stage[J]. Oil and Gas Geology, 1959,42(3):42-47.

[9] 陈元千,陶自强. 高含水期水驱特征曲线的推导及上翘问题的分析[J]. 断块油气田, 1997,4(3):19-24.
CHEN Yuan-qian, TAO Zi-qiang. Derivation of water drive curve at high water-cut stage and its analysis of upwarping problem [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 1997,4(3):19-24.

[10] 于波,孙新敏,杨勇,等. 高含水期水驱特征曲线上翘时机影响因素研究[J]. 石油天然气学报, 2008,30(2):127-131.
YU Bo, SUN Xin-min, YANG Yong, et al. Influential factor of upwarping moment of water-flooding characteristic curve at high water-cut stage[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008,30(2):127-131.

[11] 杨勇. 高含水期水驱特征曲线上翘现象的校正方法研究[J]. 石油天然气学报, 2008,30(3):120-123.
YANG Yong. Method for correcting upwarping water flooding characteristic curve at high water-cut stage[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008,30(3):120-123.

[12] CRAFT B C, HAWKINS M F. Applied petroleum reservoir engineering [M]. London: Prentice-Hall, 1959: 355-365.

[13] 姜汉桥,姚军,姜瑞忠. 油藏工程原理与方法[M]. 东营:中国石油大学出版社,2006:78-90.

(编辑 李志芬)