

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.05.010

# 高含水期新型水驱特征曲线研究与应用

陈存良<sup>1</sup>, 王 相<sup>2</sup>, 何 芬<sup>1</sup>, 刘 超<sup>1</sup>, 崔龙涛<sup>1</sup>

(1. 中海石油(中国)有限公司 天津分公司, 天津 300459; 2. 常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:**水驱特征曲线是水驱油藏计算技术指标的重要方法之一,但传统的水驱特征曲线在高含水期适应性差,出现偏离直线的“上翘”现象,严重影响了水驱开发指标的预测精度。为此,提出了一种新型水驱特征曲线。首先从油水相对渗透率比值与含水饱和度曲线特征出发,同时考虑水驱开发的极限问题,提出了一种适应性更强的新渗流特征表征方程。进而以此为基础,理论推导出了新型水驱特征曲线的方程,并通过公式变换给出了新方程未知参数的简易计算方法。新型水驱特征曲线能够较好地反映出高含水期油藏渗流特征,而且采出程度较低时常规水驱特征曲线是新型水驱特征曲线的一种特例。矿场应用表明,新型水驱特征曲线在高含水期进行开发效果预测时精度更高,误差仅为 0.4%,更符合油田的实际情况。

**关键词:**高含水;水驱特征曲线;相对渗透率;含水饱和度;上翘

中图分类号:TE 341

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)05-0076-05

## Research and Application of New Water Flooding Characteristic Curve in High Water Cut Period

CHEN Cunliang<sup>1</sup>, WANG Xiang<sup>2</sup>, HE Fen<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>1</sup>, CUI Longtao<sup>1</sup>

(1. Tianjin Branch, CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China; 2. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** Water flooding characteristic curve is an important method for estimate recoverable reserves of water flooding reservoir. But conventional water flooding characteristic curve may deviate out from a straight line and up-warping phenomenon at the high water-cut stage, thus the adaptability of the conventional water flooding characteristic curve is poor for water flooding reservoirs. An improved water flooding characteristic curve is proposed. Firstly, a new characterization equation for the relationship between water-oil relative permeability ratio and water saturation, considering the limit problem of water flooding. Based on this equation, the new water flooding characteristic curve is derived theoretically. A method based on equation transformation is proposed to determine the parameters in the

收稿日期:2020-05-22。

基金项目:中海石油(中国)有限公司基金资助项目(YXKY-2018-TJ-04)。

作者简介:陈存良(1988—),男,山东莱芜人,硕士,工程师。E-mail:chencl4@cnooc.com.cn

引用本文:陈存良,王相,何芬,等. 高含水期新型水驱特征曲线研究与应用[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2020,32(5):76-80.

new equation. The new method is deduced to suit the development laws at the high water-cut stage. And the conventional water flooding characteristic curve can be a special case of the new method at high recovery conditions. The application case shows that the error is only 0.4%. The new method is more accurate than the conventional model in predicting production performance and meet the needs of oilfield production.

**Key words:** high water-cut; water flooding characteristic curve; relative permeability; water saturation; up-warping phenomenon

水驱特征曲线是注水开发标定可采储量、预测油藏动态的重要油藏工程方法之一<sup>[1-3]</sup>。随着水驱特征曲线研究的不断深入,室内实验研究发现高含水阶段油水相对渗透率比值与含水饱和度在半对数坐标下出现“下弯”现象<sup>[4-6]</sup>,传统的渗流特征表征方法已不再适用。同时,在水驱开发后期水驱特征曲线在半对数坐标上并不再是一条直线,而出现“上翘”现象,如果仍采用已有的水驱特征曲线,利用直线外推法预测可采储量和采收率,误差将非常大。为此,陈元千等<sup>[7]</sup>推导了高含水期的甲型和乙型水驱特征曲线的方程,并从相渗曲线出发指出了曲线“上翘”的原因;于波等<sup>[8]</sup>分析了不同因素对“上翘”现象出现时机和进行动态预测的影响;孙红霞<sup>[9]</sup>利用实验从微观角度分析了水驱特征曲线上翘的原因;杨勇<sup>[10]</sup>、邓森<sup>[11]</sup>、周鹏<sup>[12]</sup>等提出了高含水期水驱特征曲线的校正方法,但这些方法都是基于传统方法进行的,并未从根本上解决问题。近年来已有不少研究人员<sup>[13-18]</sup>从相渗曲线出发推导建立了新型的水驱曲线,但是均未考虑水驱开发的极限问题。在前人研究基础上,笔者考虑水驱开发的极限问题,提出了一种新的水驱特征曲线,新型水驱特征曲线能够很好的反映出高含水期油藏的渗流特征,且常规水驱特征曲线是新型水驱特征曲线在采出程度较低时的一种特例。

## 1 渗流特征方程的表征

水驱特征曲线的理论基础是渗流特征方程与物质平衡方程,大多数水驱特征曲线是以在半对数坐标下油水相对渗透率的比值与含水饱和度呈直线关系为推导基础<sup>[19]</sup>。

$$\ln\left(\frac{k_{ro}}{k_{rw}}\right) = m - nS_w \quad (1)$$

式中: $k_{ro}$ 为油相的相对渗透率; $k_{rw}$ 为水相的相对渗透率; $S_w$ 为含水饱和度; $m, n$ 为常数。

但是大量水驱室内实验发现(图1),高含水期阶段油水相对渗透率比值与含水饱和度在半对数坐标下出现“下弯”现象,明显公式(1)不能表征此现象。为此,很多研究者提出了表征“下弯”段的渗流特征方程,尽管这些方程可以较好地反映“下弯”现象,但这些方程仅从形式上拟合了曲线,却都忽略了当含水饱和度趋近于1时的极限问题。

传统的相渗实验一般驱替倍数较小,使得岩心驱替不充分,致使油水特性未能完全体现,为此需要进行高倍水驱实验。图2为常规水驱和高倍水驱情况下的相渗曲线,由曲线可以看出随着驱替倍数增大,剩余油饱和度不断变小,理想条件下,当驱替倍数足够大时,含水饱和度极有可能趋近于1<sup>[20-22]</sup>,此时

$$\ln\left(\frac{k_{ro}}{k_{rw}}\right) \Big|_{S_w \rightarrow 1} = -\infty \quad (2)$$

而当含水饱和度趋近于1时,式(1)为

$$\ln\left(\frac{k_{ro}}{k_{rw}}\right) \Big|_{S_w \rightarrow 1} = m - n \quad (3)$$

明显式(2)和式(3)矛盾。针对上述问题,为了更为准确的表征油水相对渗透率的比值与含水饱和度的

关系,提出了新的渗流特征方程。

$$\ln\left(\frac{k_{ro}}{k_{rw}}\right) = a + bS_w + c \ln(1 - S_w) \quad (4)$$

式中: $a, b, c$  为常数。

利用新方程对文献[14]中胜利油田某区块室内实验数据“下弯”段进行了拟合(图 1),可以看出新方程很好地表征了高含水阶段油水相对渗透率比值与含水饱和度的关系。

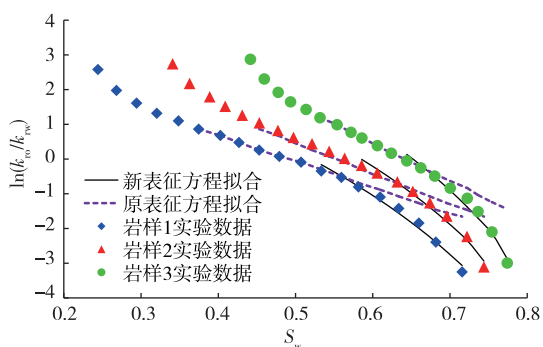


图 1 高含水阶段油水相对渗透率比值与含水饱和度关系

Fig.1 Relationship between oil-water relative permeability ratio and water saturation at high water cut stage

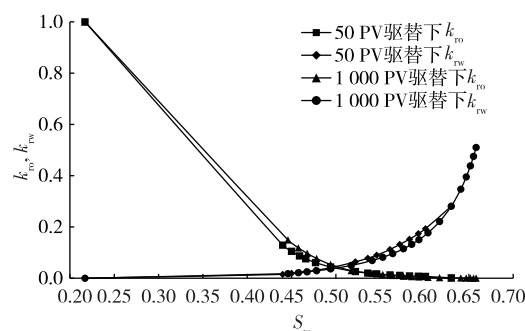


图 2 不同驱替倍数下水油相对渗透率与含水饱和度关系

Fig.2 Relationship between oil-water relative permeability and water saturation at different displacement multiples

## 2 新型水驱特征曲线推导

不考虑毛管力和重力的影响,水驱开发过程中水油比可表示为<sup>[23]</sup>

$$R_{wo} = \frac{Q_w}{Q_o} = \frac{\mu_o k_{rw} B_o \gamma_w}{\mu_w k_{ro} B_w \gamma_o} \quad (5)$$

式中: $R_{wo}$ 为水油比,无因次; $Q_w$ 为地面产水量,t/d; $Q_o$ 为地面产油量,t/d; $\mu_w$ 为地层水的黏度,mPa·s; $\mu_o$ 为地层油的黏度,mPa·s; $B_w$ 为地层水的体积系数,m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>; $B_o$ 为地层油的体积系数,m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>; $\gamma_w$ 为地面水的相对密度,g/cm<sup>3</sup>; $\gamma_o$ 为地面脱气原油的相对密度,g/cm<sup>3</sup>。

结合式(5)并两端取对数,整理得

$$\lg R_{wo} = \lg \frac{Q_w}{Q_o} = \lg \frac{\mu_o B_o \gamma_w}{\mu_w B_w \gamma_o} - 0.434 3 [a + bS_w + c \ln(1 - S_w)] \quad (6)$$

当油田进入高含水期后有<sup>[23]</sup>

$$\bar{S}_w = S_w \quad (7)$$

式中 $\bar{S}_w$ 为地层平均含水饱和度。

另外,由物质平衡方程可得

$$\bar{S}_w = (1 - S_{wc})R + S_{wc} \quad (8)$$

式中: $S_{wc}$ 为束缚水饱和度; $R$ 为采出程度。

综合式(6)、式(7)、式(8)整理得

$$\lg R_{wo} = \lg \frac{\mu_o B_o \gamma_w}{\mu_w B_w \gamma_o} - 0.434 3 \{a + b[(1 - S_{wc})R + S_{wc}] + c \ln\{1 - [(1 - S_{wc})R + S_{wc}]\}\} \quad (9)$$

即

$$\lg R_{wo} = A + BR + C \ln(1 - R) \quad (10)$$

式中:

$$A = \lg \frac{\mu_o B_o \gamma_w}{\mu_w B_w \gamma_o} - 0.434 \ 3a - 0.434 \ 3b S_{wc} - 0.434 \ 3c \ln(1 - S_{wc}) \quad (11)$$

$$B = -0.434 \ 3b(1 - S_{wc}) \quad (12)$$

$$C = -0.434 \ 3c \quad (13)$$

式(10)即为反映高含水阶段的新型水驱特征曲线。

当采出程度较低时,有

$$\ln(1 - R) \approx 0 \quad (14)$$

则式(10)可写为

$$\lg R_{wo} = A + BR \quad (15)$$

式(15)即为熟悉的乙型水驱特征曲线,可以看出式(15)是新型水驱特征曲线在采出程度较低时的一个特例。

为现场应用方便,提出了一种求解新型水驱特征曲线的方法。式(10)两端同时对  $R$  求导,则

$$\frac{d(\lg R_{wo})}{dR} = B + \frac{-C}{1 - R} \quad (16)$$

明显  $\frac{d(\lg R_{wo})}{dR}$  与  $\frac{1}{1 - R}$  呈线性关系,做二者的曲线图,直线斜率的负数即为参数  $C$  的值,直线的截距即为参数  $B$  的值,最后根据开发动态数据可以计算得到参数  $A$  的值,为了提高精度,一般取多组数据计算得到的平均值或者归一化值作为  $A$  的值。

### 3 矿场应用

以海上油田某区块为例,利用建立的新型水区特征曲线对该区块进行动态预测,并与传统水驱特征曲线进行比较。

传统水驱特征曲线

$$\lg R_{wo} = 0.445 \ 6 + 0.452 \ 5R \quad (17)$$

新型水驱特征曲线

$$\lg R_{wo} = 0.462 \ 2 - 0.349 \ 7R - 0.634 \ 7 \ln(1 - R) \quad (18)$$

从图 3 中可以看出,新型水驱特征曲线能很好的描述高含水期油田的水驱开发动态。到 2018 年底,该区块累积注水量  $5.891 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,累积采油量  $1.367 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,区块采出程度接近 0.38。利用传统的水驱特征曲线计算采出程度达 0.38 时,需要累积注水量达  $5.667 \times 10^6 \text{ m}^3$ ;利用新型水驱特征曲线计算,需要累积注水量为  $5.868 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,误差仅为 0.4%,可见新型水驱特征曲线在高含水期进行预测精度更高,满足工程需要。另外,从曲线也可以看出,高含水期油田再采出 1% 的油需要大量的注水保证,这将导致经济性变差,因此,高含水期油田开展综合调整是进一步提高采收率的重要方向。

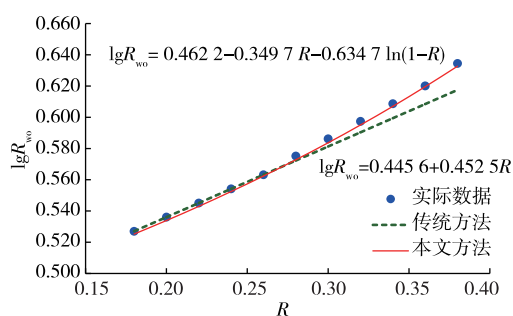


图 3 海上油田某区块水驱特征曲线结果对比

Fig.3 Comparison of water drive characteristic curves of a block in an offshore oil field

## 4 结 论

1)从油水相对渗透率比值与含水饱和度曲线特征出发,提出了一种新的渗流特征表征方程,该方程可以较好的反映特高含水期油藏的渗流特征。

2)基于新型渗流特征表征方程,推导并提出了一种新型水驱特征曲线,且给出了求解方法,并证明传统的乙型水驱特征曲线是新型水驱特征曲线在采出程度较低时的一个特例。

3)新型水驱特征曲线可以很好的表征高含水期上翘现象,较传统水驱特征曲线用于预测高含水期的开发动态精度更高。

## 参考文献:

- [1]冯沙沙,莫起芳,张伟,等.海相砂岩油田新型水驱特征曲线的改进与应用——以XJX油田为例[J].中外能源,2016,21(9):42-46.
- [2]李立峰,滕世婷,冯绪波,等.基于水驱开发全过程的新型水驱特征曲线[J].特种油气藏,2019,26(3):85-88.
- [3]田丰,杜晓康,王晓冬,等.丙型水驱曲线直线段出现时间的预测方法[J].大庆石油地质与开发,2018,37(3):1-5.
- [4]黄迎松.特高含水阶段油藏水驱规律研究[J].特种油气藏,2018,25(1):95-99.
- [5]管错,李宜强,石成方,等.对特高含水期水驱特征曲线上翘问题的新认识[J].大庆石油地质与开发,2017,36(2):64-68.
- [6]时凤霞,王容容,于波.高含水期水驱特征曲线上翘时机的定量表征[J].科学技术与工程,2015,15(11):53-57.
- [7]陈元千,陶自强.高含水期水驱曲线的推导及上翘问题的分析[J].断块油气田,1997,4(3):19-24.
- [8]于波,孙新敏,杨勇,等.高含水期水驱特征曲线上翘时机的影响因素研究[J].石油天然气学报,2008,30(2):127-131.
- [9]孙红霞.高含水期水驱特征曲线上翘新认识[J].特种油气藏,2016,23(1):92-95.
- [10]杨勇.高含水期水驱特征曲线上翘现象校正方法研究[J].石油天然气学报,2008,30(3):120-123.
- [11]邓森,王怒涛,孟令强,等.高含水期两种新型水驱特征曲线的建立与应用[J].大庆石油地质与开发,2017,36(4):58-63.
- [12]周鹏,陈明,徐锋,等.高含水期新型水驱特征曲线的建立及其应用[J].新疆石油地质,2014,35(3):329-332.
- [13]侯健,王容容,夏志增,等.特高含水期甲型水驱特征曲线的改进[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(6):72-75.
- [14]刘世华,谷建伟,杨仁锋.高含水期新型水驱特征曲线[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011,30(s1):158-163.
- [15]宋兆杰,李治平,赖枫鹏,等.高含水期油田水驱特征曲线关系式的理论推导[J].石油勘探与开发,2013,40(2):201-208.
- [16]OLSEN C, KABIR C S. Waterflood performance evaluation in a chalk reservoir with an ensemble of tools[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 124: 60-71.
- [17]范海军,朱学谦.高含水期油田新型水驱特征曲线的推导及应用[J].断块油气田,2016,23(1):105-108.
- [18]王继强,岳圣杰,宋瑞文,等.特高含水期油田水驱特征曲线优化研究[J].特种油气藏,2017,24(5):97-101.
- [19]王相,何岩峰,冯其红,等.基于均衡驱替理念的非均质油藏井组设计方法[J].常州大学学报(自然科学版),2018,30(6):41-46.
- [20]王华,邴绍献,张海燕,等.特高含水期水驱油效率计算新方法[J].断块油气田,2013,20(2):201-203.
- [21]窦宏恩.高含水期油田提高原油采收率的新理论[J].特种油气藏,2009,16(6):89-93.
- [22]崔传智,徐建鹏,王端平,等.特高含水阶段新型水驱特征曲线[J].石油学报,2015,36(10):1267-1271.
- [23]刘英宪,马奎前,穆鹏飞,等.一种水驱曲线直线段合理性判断新方法[J].特种油气藏,2016,23(5):86-88.
- [24]杨艳.低渗透油田童氏参数改进及应用分析[J].断块油气田,2018,25(3):350-353.

(责任编辑:殷丽莉)