

# 一种新型水驱特征曲线及其应用

李珂<sup>1,2</sup>, 胡书勇<sup>3</sup>, 张金庆<sup>1,2</sup>, 朱国金<sup>1,2</sup>, 周文胜<sup>1,2</sup>, 耿艳宏<sup>1,2</sup>

(1. 中海石油研究总院海洋石油高效开发国家重点实验室, 北京 100028; 2. 中海石油研究总院有限责任公司, 北京 100028; 3. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500)

**摘要:** 目前常用的水驱曲线可以在中高含水期较好地表征水驱规律, 由于以指数类相渗作为理论基础并在推导过程中进行了近似处理, 此类水驱曲线难以描述低含水期或特高含水期的水驱规律, 可能出现低含水期出现直线段较晚、高含水期上翘等情况, 限制了该类曲线在实际中的应用。提出一种适用性更广的相渗形态表征式, 并据此推导出一种新的水驱特征曲线。该水驱曲线可以描述不同含水阶段下的动态规律, 并可通过拟合参数直接求取可采储量。实例应用表明, 采用该新型水驱曲线进行拟合, 直线段出现时间早、相关系数高、拟合效果好, 在不同含水阶段均具有较好的适用性, 能够更准确地描述水驱特征及方便地预测可采储量, 在油田动态分析和生产策略制定中具有较好的应用价值。

**关键词:** 相对渗透率; 水驱特征曲线; 低含水期; 高含水期; 可采储量

中图分类号: TE357

文献标识码: A

## A new type water flooding characteristic curve and its application

Li Ke<sup>1,2</sup>, Hu Shuyong<sup>3</sup>, Zhang Jinqing<sup>1,2</sup>, Zhu Guojin<sup>1,2</sup>, Zhou Wensheng<sup>1,2</sup> and Geng Yanhong<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China;

2. CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China; 3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

**Abstract:** The commonly used water flooding characteristic curves are suitable in describing the water flooding laws in the middle-high water cut periods. However, these curves can hardly describe the water flooding characteristics of low and high water cut periods because of their theoretical basis of exponential expression of relative permeability curves and approximation during the derivation process. The applications showed that, for different reservoir characteristics and the water cut rising features, the conventional water flooding curves might show as no straight line in the low water cut period and raise in the high water cut period, which resulted in poor fitting effect. So we proposed a new type of water flooding characteristic curve based on a new kind of widely applicable expression of relative permeability curve. This new curve could accurately describe the production dynamic rules under different water cut stages and directly calculate the recoverable reserves by fitting parameters. Applications showed that, by this method, the fitting straight line appeared earlier, the correlation coefficient was high, and the fitting effect was good. It had good applicability in different water cut stages, could describe the characteristics of water flooding more accurately and could easily predict the recoverable reserves. There was good application value in the dynamic analysis and making the production strategy of oil fields.

**Key words:** relative permeability, water flooding characteristic curve, low water cut stage, high water cut stage, recoverable reserve

## 1 引言

目前应用较广的 $W_p+C$ 族、 $L_p+C$ 族等水驱特征曲线大都基于对油水相对渗透率曲线的指数类描述

形式,并在推导过程中进行了近似处理<sup>[1-3]</sup>。这些常规水驱特征曲线能够较好地拟合中高含水期油藏的水驱规律。但是,大量实验分析结果表明,实测油水相对渗透率曲线不适宜用简单的指数形式进行描述<sup>[4-7]</sup>,实际上,由于孔渗结构、润湿性和渗流特征的

收稿日期:2018-08-14。

第一作者简介:李珂(1980—),男,博士,高级工程师,油气田开发。

基金项目:国家科技重大专项“海上稠油油田开发模式研究”(2016ZX05025-001)。

不同,  $K_{rw}$  和  $K_{ro}$  在低含水和高含水期将发生非指数形弯曲。其次, 在基于该指数式相渗的水驱特征曲线推导过程中, 油水相对渗透率比  $K_{rw}/K_{ro}$  只能在油田或油井生产的中—中高含水期(即含水饱和度位于两相渗流区中部附近时)再次用指数类形式进行近似, 低、高含水期均不适用。由此导致水驱特征曲线在低含水期未出现直线段; 特高含水期则由于实际油水相对渗透率比值明显低于指数式理论值, 水驱特征曲线发生上翘, 拟合结果与实际生产数据误差较大<sup>[8-13]</sup>, 难以准确反映和预测油田及单井的生产动态特征。笔者对现有的相渗描述形式进行了校正, 提出一种适用于不同相渗曲线  $K_{rw}/K_{ro}$  完整形态的最新表达式, 并据此推导一种新的、可适用于含水上全过程的水驱特征曲线。

## 2 新型水驱特征曲线推导

根据油水相渗参数定义, 有:

$$S_{wd} = (S_{wc} - S_{wi}) / (1 - S_{wi} - S_{or}) \quad (1)$$

在两相渗流中部区域, 油水相对渗透率可表示为:

$$K_{rw} = S_{wd}^{nw} \quad (2)$$

$$K_{ro} = (1 - S_{wd})^{no} \quad (3)$$

$$K_{rw}/K_{ro} = S_{wd}^{nw} / (1 - S_{wd})^{no} = a S_{wd}^b \quad (4)$$

式(1)~(4)中:  $K_{rw}$ 、 $K_{ro}$  分别为水相和油相相对渗透率, 小数;  $S_{wi}$  为束缚水饱和度, 小数;  $S_{wc}$  为出口端含水饱和度, 小数;  $S_{or}$  为残余油饱和度, 小数;  $S_{wd}$  为可动油饱和度, 小数;  $nw$ 、 $no$ 、 $a$ 、 $b$  均为常数。

考虑式(2)~(4)难以准确描述相渗曲线在低含水饱和度及高含水饱和度时的完整形态。将上式进行变形, 并引入混合三角函数表达式, 即:

$$\frac{K_{rw}}{K_{ro}} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} S_{wd}^{B+1}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{2} S_{wd}^{B+1}\right)} A S_{wd}^B \quad (5)$$

式(5)中,  $A$ 、 $B$  均为常数。以上对  $K_{rw}/K_{ro}$  的最新表征式可以更广泛地描述各类非指数式相渗曲线的完整形态。

在水驱稳定渗流条件下, 油水相对渗透率之比与油水产量之间关系式为:

$$\frac{K_{rw}}{K_{ro}} = \frac{Q_w \mu_w B_w}{Q_o \mu_o B_o} \quad (6)$$

式中:  $Q_o$ 、 $Q_w$  分别为油、水产量,  $m^3/d$ ;  $\mu_o$ 、 $\mu_w$  分别油、水黏度,  $mPa \cdot s$ ;  $B_o$ 、 $B_w$  分别为油、水体积系数, 小数。

将(6)式代入(5)式得产水量:

$$Q_w = Q_o \frac{\mu_o B_o}{\mu_w B_w} A \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} S_{wd}^{B+1}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{2} S_{wd}^{B+1}\right)} S_{wd}^B \quad (7)$$

已知出口端含油饱和度与日产油量的关系可分别表示为<sup>[1,14-15]</sup>:

$$Q_o = \frac{N_o}{1 - S_{wi}} \frac{2}{3} \frac{dS_{wc}}{dt} \quad (8)$$

式(8)中:  $N_o$  为原油地质储量,  $m^3$ 。

油田的累产水量  $W_p$  可表示为:

$$W_p = \int_0^t Q_w dt \quad (9)$$

将(5)、(7)、(8)式代入(9)式, 得:

$$W_p = A_1 \int_0^S \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} S_{wd}^{B+1}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{2} S_{wd}^{B+1}\right)} S_{wd}^B dS_{wd} \quad (10)$$

其中:

$$A_1 = A \frac{\mu_o B_o}{\mu_w B_w} \frac{N_o}{1 - S_{wi}} \frac{2}{3} \frac{1}{1 - S_{wi} - S_{or}} \quad (11)$$

对(10)式进行积分, 得:

$$W_p = A_2 \ln \left\{ \cos \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{N_p}{N_r} \right)^{B_1} \right] \right\} + C_1 \quad (12)$$

式中  $A_2$ 、 $B_1$ 、 $C_1$  均为常数。令  $\frac{1}{A_2} = A_3$ ,  $C_1 = 0$  可得以上广义水驱特征曲线的特解形式为:

$$\ln \{ \ar \cos [\text{Exp}(A_3 W_p)] \} = \ln \left( \frac{\pi}{2} \right) + B_1 \ln(N_p) - B_1 \ln(N_r) \quad (13)$$

再令  $\ln \left( \frac{\pi}{2} \right) - B_1 \ln(N_r) = B_2$  可得:

$$\ln \{ \ar \cos [\text{Exp}(A_3 W_p)] \} = B_1 \ln(N_p) + B_2 \quad (14)$$

即

$$\ln \{ Y \} = D \ln(N_p) + E \quad (15)$$

式(14)、(15)即为推导出的新型水驱特征曲线表达式。该水驱特征曲线可以描述以不同复杂相渗形态为基础的水驱规律。并且, 从表达式中不难看出, 可以从拟合曲线斜率  $D$  和截距  $E$  的值直接方便地计算得到可采储量:

$$N_r = \text{Exp} \left[ \frac{\ln \left( \frac{\pi}{2} \right) - E}{D} \right] \quad (16)$$

再对水驱特征曲线表达式继续进行求导, 有:

$$A_3 Q_w = -\frac{\pi}{2} D \tan\left[\frac{\pi}{2}\left(\frac{N_p}{N_r}\right)^D\right] \left(\frac{N_p}{N_r}\right)^{D-1} \frac{1}{N_r} Q_o \quad (17)$$

令可动油采出程度  $R = N_p/N_r$ , 对上式进行变形, 即可得到含水率  $f_w$  与  $R$  的关系式:

$$\frac{f_w}{1-f_w} = -\frac{\pi}{2} \frac{A_3 D}{N_r} \tan\left[\frac{\pi}{2} R^D\right] R^{D-1} \quad (18)$$

该新型水驱特征曲线可以描述不同类型的含水上 升规律。可采储量随水驱特征曲线斜率值  $D$  的提 高、常数  $A_3$  和水驱特征曲线截距值  $E$  的降低而增大。

### 3 实例应用

为验证本文所提出的新型水驱特征曲线应用效 果, 选取了两个典型油藏进行分析。这两个油藏均 有较为充足的天然水体能量, 但储层类型、流体性 质、所处含水阶段及动态规律不尽相同。A 油藏位于

中东地区南部, 为第三系碳酸盐岩孔隙型边底水油 藏, 水体能量较充足, 地层原油黏度  $1.6 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。油藏 利用天然能量衰竭开发, 地质油藏特征复杂, 投产单 井含水率波动较大, 含水上 升形态大至为“低爬”或 “S”型。油田目前总体处于低—中含水期(图 1a)。P 油藏位于我国南部海域, 为三角洲沉积环境下的层 状边底水稠油油藏, 高孔高渗, 水体倍数大于 50 倍, 地层原油黏度  $46.8 \sim 132 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。目前该油藏生产井 大都投产即见水, 含水上 升很快, 目前所有生产井含 水率都已高达 90% 以上, 属于特高含水期, 需要采用 适合的水驱特征曲线进行动态拟合和预测, 以满足 提液措施制定及油田产液结构整体优化调整需求 (图 1b)。

采取常用水驱特征曲线和新型水驱特征曲线, 对上述油藏生产井进行了拟合, 拟合结果及对比见 图 2 和表 1。

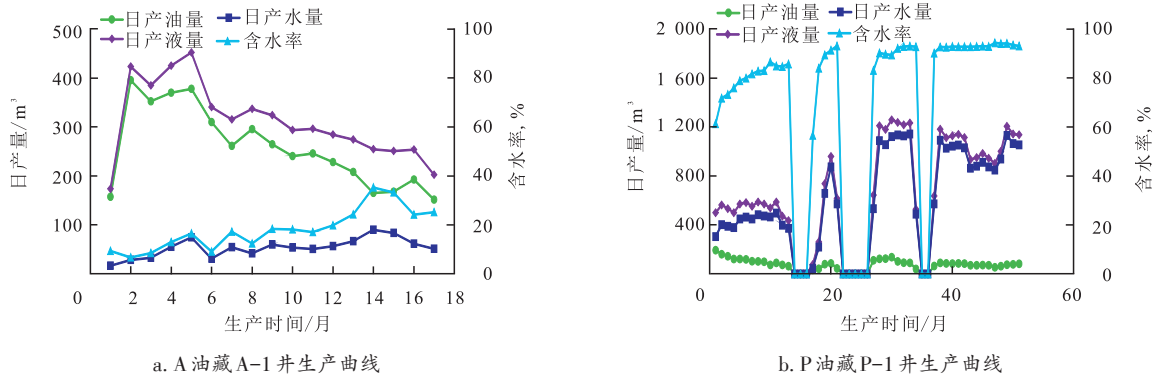


图 1 不同油藏单井生产曲线

Fig. 1 Production curves for single well in different reservoirs

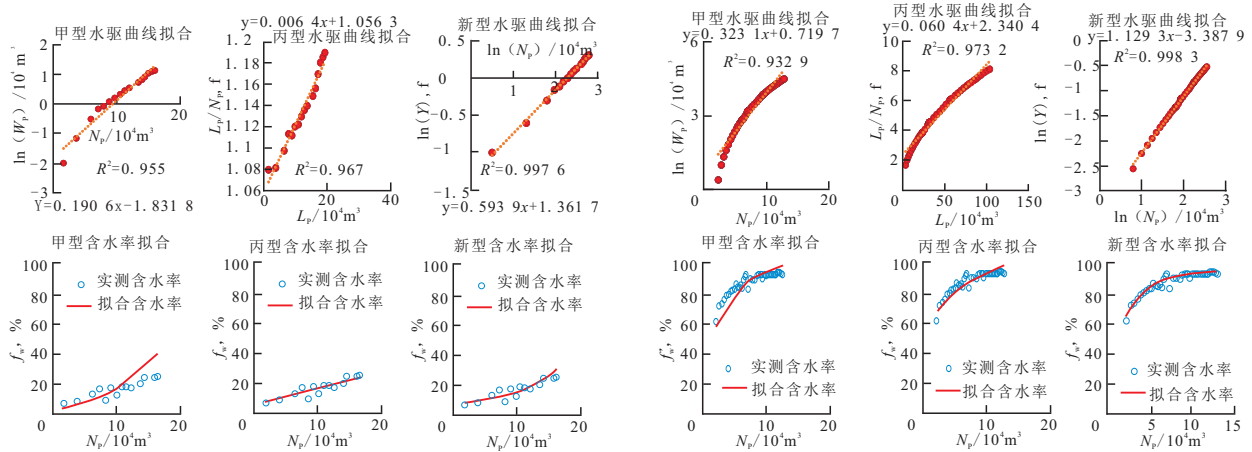


图 2 不同含水阶段水驱拟合效果对比

Fig. 2 Comparison of fitting effects of water flooding in different water-bearing stages

表1 不同油藏单井水驱特征曲线拟合结果对比数据

Table 1 Comparison of fitting results of water drive characteristic curves of single well in different reservoirs

油藏名	井名	目前累产油量/百万桶	目前含水率, %	甲型水驱曲线 $\ln(W_p) = A + BN_p$			丙型水驱曲线 $L_p/N_p = A + BL_p$			新型水驱曲线 $\ln(Y) = D\ln(N_p) + E$		
				水驱拟合相关系数, f	$f_w \sim N_p$ 残差平方和, f	水驱预测可采储量/百万桶	水驱拟合相关系数, f	$f_w \sim N_p$ 残差平方和, f	水驱预测可采储量/百万桶	水驱拟合相关系数, f	$f_w \sim N_p$ 残差平方和, f	水驱预测可采储量/百万桶
A	A-1	1.03	25.10	0.955 0	0.08	2.03	0.967 0	0.01	8.40	0.998 1	0.01	1.27
	A-2	17.52	35.16	0.992 4	0.16	24.15	0.983 2	0.58	68.60	0.994 3	0.15	27.40
	A-3	1.01	40.35	0.899 7	0.40	1.71	0.972 0	0.09	2.75	0.999 0	0.04	6.31
	A-4	0.68	45.50	0.995 3	0.10	1.72	0.994 5	0.11	1.97	0.998 9	0.10	3.25
P	P-1	0.78	93.79	0.933 0	0.09	0.84	0.973 0	0.04	0.82	0.999 0	0.01	1.79
	P-2	5.42	97.28	0.928 2	0.40	4.70	0.989 6	0.77	4.85	0.998 8	0.07	6.10
	P-3	0.76	97.18	0.926 5	0.17	0.69	0.988 6	0.33	0.70	0.992 1	0.09	1.17
	P-4	0.63	92.67	0.997 2	0.14	1.00	0.996 9	0.22	0.93	0.998 6	0.14	1.83

从图2的典型生产井水驱特征曲线拟合效果对比中可以看出,对于不同含水上升形态的井,采用新型水驱特征曲线拟合,低含水期和特高含水期均可出现明显的直线段,拟合效果相对较好,能够更好地描述水驱规律。

表1对包括图1、图2所示典型井在内的各生产井不同水驱特征曲线拟合效果进行了数据统计和对比,并预测了以含水率98%为上限的可采储量。

结合表1中统计不同油藏生产井的水驱拟合及可采储量预测结果,并以水驱特征曲线拟合相关系数及 $f_w \in N_p$ 拟合残差平方和的大小联合判断拟合效果。从表中数据对比可知,新型水驱特征曲线相关系数大,残差平方和小,拟合效果最好。因此,新型水驱特征曲线在不同生产时期和含水阶段均具有较好的适用性。

## 4 结论

1) 现有的水驱特征曲线基于指数式相渗假设进行推导得到,在进行生产数据拟合时可能出现低含水期出现直线段较晚、高含水期上翘等情况,与实际生产动态数据有较大误差,限制了该类曲线在实际中的应用。

2) 本文提出了一种新的水驱特征曲线,该水驱曲线基于对油水相对渗透率的最新表征式,可以描述以不同相渗形态及含水上升类型为基础的水驱规律,通过拟合生产动态数据,根据拟合直线段斜率和

截距方便地计算得到可采储量。

3) 实例应用表明,对于不同储层类型及复杂动态特征的油藏和生产井,采用该新型水驱特征曲线进行拟合,直线段出现得更早、相关系数高、拟合效果好,在低含水和高含水阶段均具有较好的适用性,能够更准确地描述水驱特征及预测可采储量,对油田动态分析和调整策略的制定等具有一定的应用价值。

### 参考文献

- [1] 陈元千. 水驱曲线关系式的推导[J]. 石油学报, 1985, 6(2): 69-78.
- [2] 高文君, 徐君. 常用水驱特征曲线理论研究[J]. 石油学报, 2007, 28(3): 89-92.
- [3] 高文君, 刘曰强, 王作进, 等. 过渡型水驱特征曲线的建立及研究[J]. 新疆石油地质, 2001, 22(3): 247-250.
- [4] 张玄奇. 油水相对渗透率曲线的测定[J]. 石油钻采工艺, 1994, 16(5): 87-90.
- [5] 张兵, 蒲春生, 朱建红, 等. 温度对不同黏度稠油油水相渗的影响规律[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2013, 28(1): 61-63.
- [6] 郭平, 张涛, 朱中谦, 等. 裂缝—孔隙型储层油水相渗实验研究[J]. 油气藏评价与开发, 2013, 3(3): 19-22.
- [7] 高慧梅, 姜汉桥, 陈民锋. 储层孔隙结构对油水两相相对渗透率影响微观模拟研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(2): 56-59.
- [8] 陈元千, 杜霞. 水驱曲线关系式的对比及直线段出现时间的判断[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(6): 55-63.
- [9] 陈元千. 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.

(下转第20页)