

[引著格式] 刘新光, 田冀, 朱国金, 等. 一种实验相渗残余油饱和度确定的新方法 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (3+4): 29~33.

# 一种实验相渗残余油饱和度确定的新方法 ——张型广适水驱曲线法

刘新光, 田冀, 朱国金, 谭先红  
丁祖鹏, 张晓亮, 彭世强, 李卓林

(中海油研究总院开发研究院, 北京 100028)

[摘要] 提出了一种新的实验相渗残余油饱和度外推求解方法, 即通过张型广适水驱曲线计算残余油饱和度、通过指数式相对渗透率曲线外推计算残余油饱和度下水相相对渗透率。张型广适水驱曲线法很好地解决了行业标准中“截断法”应用于高油水黏度比时的残余油饱和度截断误差较大的问题。经过经典相渗实验数据及相渗数值模拟验证, 该方法原理清晰、流程简单, 残余油饱和度计算误差在±1%以内。

[关键词] 相对渗透率曲线; 残余油饱和度; 张型广适水驱曲线

[中图分类号] TE312

[文献标志码] A

[文章编号] 1000-9752 (2015) 03+04-0029-05

相对渗透率曲线 (以下简称相渗曲线) 是描述多相流体在岩石中渗流规律的最重要参数。相渗曲线中束缚水饱和度及残余油饱和度的值共同决定了驱油效率, 驱油效率与波及系数的乘积即为采收率。近年来, 国内外许多水驱油田开发后期出现了标定采收率高于驱油效率的“反常”现象。如大庆油田主力层位采收率预测为 60%<sup>[1]</sup>, 其相渗预测驱油效率仅 58%<sup>[2]</sup>; 渤海埕北油田预测采收率为 58%, 其相渗计算驱油效率仅 50%; 南海文昌油田预测采收率为 70%, 其相渗计算驱油效率仅为 52%。

由于束缚水饱和度相对确定, 驱油效率的“反常”就代表着残余油饱和度的“反常”。笔者从室内相渗实验过程中残余油饱和度确定方法着手, 对残余油饱和度的物理意义进行分析, 提出了计算实验相渗残余油饱和度的新方法, 并通过经典实验数据和相渗实验机理数值模拟模型对方法进行了验证。通过该方法处理油水相渗实验数据获得的残余油饱和度, 提高了驱油效率及采收率的预测精度, 对油田开发方案设计及调整方案编制具有重要的指导意义。

## 1 残余油饱和度计算方法现状

残余油饱和度的物理意义为含水率 100% 时的岩心含油饱和度。相渗实验过程中, 含水率在达到 95%~98% 之后开始缓慢增长, 至含水 100% 会经历一个很长的过程, 而在此过程中累计产油量还会逐渐增加。图 1 是采用数值模型模拟的岩心相渗实验过程, 模拟参数见表 1。模拟数据显示, 实验 33h 后含水率为 99.98%, 此时仅采出模型中可动油量的 83%。理论上, 含水率

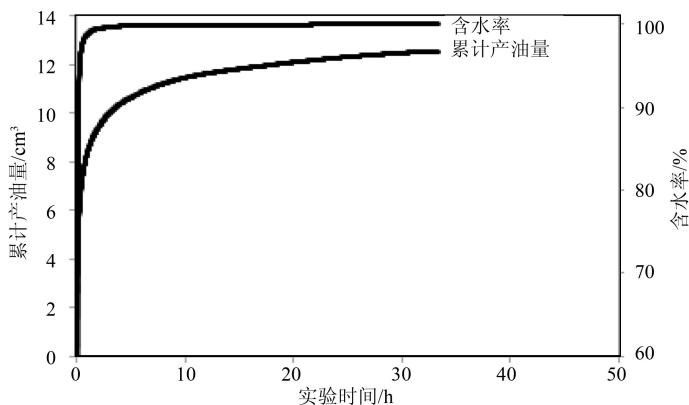


图 1 岩心相渗实验机理数值模拟结果

[收稿日期] 2014-10-06

[作者简介] 刘新光 (1984-), 男, 硕士, 工程师, 从事油田总体开发方案设计工作, liuxg4@cnooc.com.cn.

达到 100% 需要的时间趋于无穷大, 因此室内水驱油实验无法直接测得真正的残余油饱和度。基于以上原因, 目前求取残余油饱和度的方法可以归纳为截断法、外推求解法和新增实验法 3 类。

### 1.1 截断法

现行相渗实验行业标准<sup>[3,4]</sup>规定, 水驱油相渗实验的截止条件为“含水率达到 99.95% 或注水 30 倍孔隙体积”, 将此时岩心内的含油饱和度视同为残余油饱和度。这种方法条件简单, 实验室易于掌握, 但实验停止时岩心中仍剩余一部分可动油未被采出而被视为“残余油”, 造成残余油饱和度偏大。采用表 2 中的参数, 数模计算的残余油饱和度截断误差可达 2.74%~9.15%, 且随着油水黏度比的增大而增大。截断法仅适用于油水黏度比较小的相渗实验。

表 1 岩心相渗数值模拟模型参数表

岩心长度	岩心半径	孔隙度	渗透率	地层水黏度	3 种原油黏度		
/cm	/cm	%	/mD	/(mPa·s)	/(mPa·s)		
10	1.9	25	500	0.5	50	20	10

表 2 不同原油黏度下水驱油数值模拟实验“残余油”饱和度计算结果

原油黏度 /(mPa·s)	含水率 99.95%		残余油饱和度 截断误差/%	注水 30PV		残余油饱和度 截断误差/%
	累计产油量	模型中剩余可采油量		累计产油量	模型中剩余可采油量	
	/cm <sup>3</sup>	/cm <sup>3</sup>		/cm <sup>3</sup>	/cm <sup>3</sup>	
50	11.6304	2.2676	7.26	11.0402	2.8578	9.15
20	12.5957	1.3023	4.17	12.0335	1.8645	5.97
10	13.0423	0.8557	2.74	12.4895	1.4085	4.51

### 1.2 外推求解法

为了减小截断法产生的误差, 国内外很多学者探索了在水驱油相渗实验的基础上外推求解残余油饱和度的方法。1978 年, Jones 等<sup>[5]</sup>提出了图解法计算相对渗透率的方法。该方法原理清晰, 可以获得较为可靠的外推残余油饱和度, 但由于方法复杂, 实验人员难以掌握, 目前一般仅作为验证其他方法是否合理的标准。另外一些学者对 Jones 的方法进行了简化, 通常采用简单方程拟合曲线的方法, 如恒冠仁等<sup>[6]</sup>提出了采用 3 次多项式拟合曲线; 李克文等<sup>[7]</sup>采用指数函数拟合曲线; Tao 等<sup>[8]</sup>、侯晓春等<sup>[9]</sup>采用 3 次多项式与指数式相结合的方法拟合曲线。但以上的拟合方法, 仅是采用近似的数学公式逼近求解, 其物理意义不明确, 外推结果可靠程度较低, 因此推广程度较差。

### 1.3 新增其他实验法

由于以上 2 种方法存在的种种问题, 一些国外石油公司选择增加其他实验以确定残余油饱和度。壳牌公司 Shehadeh K. Masalmeh<sup>[10]</sup>采用离心实验法求解残余油饱和度, 并且将该值与非稳态相渗实验相结合以确定“完整的”相渗曲线。他的研究表明, 离心实验法所获得的残余油饱和度较传统的非稳态法低 15% 左右, 与北海油田长期水驱后的现场认识一致。该方法原理明确, 但需要在相渗实验后进行离心实验, 需要对同一块岩心重新洗油、饱和, 容易造成非胶结岩心的孔渗参数发生变化, 同时增加了实验成本, 延长了实验时间。

## 2 张型广适水驱曲线法计算残余油饱和度方法的提出

### 2.1 残余油饱和度求解思路的转变

根据残余油饱和度的定义, 水驱油相渗实验过程中残余油饱和度可以表示为:

$$S_{or} = (1 - S_{wc}) \left( 1 - \frac{N_R}{N} \right) \quad (1)$$

式中:  $N_R$  为岩心中的可动油量,  $\text{cm}^3$ ;  $N$  为岩心中的饱和油量,  $\text{cm}^3$ ;  $S_{wc}$  为束缚水饱和度, 1;  $S_{or}$  为残余油饱和度, 1。

式 (1) 中, 束缚水饱和度  $S_{wc}$ 、岩心中的饱和油量  $N$  均可在水驱油实验开始前准确测量, 可动油

量  $N_R$  未知。求解残余油饱和度实质上是对岩心中可动油量的求解。

在油藏工程中，可以通过水驱曲线的方法预测油藏、单井的可采储量。水驱曲线方法一般是由一维水驱油理论推导得出的，自然可以将该方法应用于岩心实验数据的拟合，以求解岩心内的可动油量。目前国内外已有的水驱曲线种类较多，通过比选研究，笔者选择使用可采储量拟合程度最高的张型广适水驱曲线。

## 2.2 高精度的水驱曲线选择——张型广适水驱曲线

张金庆对水驱曲线进行了长期的研究，在两相渗透率曲线的基础上推出近似程度极高的张型广适水驱曲线<sup>[11]</sup>。该曲线在中低含水阶段即可出现直线段，在高含水下不上翘，对含水率 100% 下的可采储量预测精度较高，并且适用于各种含水上升类型<sup>[12]</sup>。通过理论含水上升特征分析及大庆油田小井距注水试验验证，张型广适水驱在各类水驱曲线中预测精度最高（误差 1.81%），可以作为预测残余油饱和度的有效方法。张型广适水驱曲线表达式为：

$$N_p = N_R - a \frac{N_p^2}{W_p^q} \quad (2)$$

式中： $N_p$  为累计产油量， $\text{cm}^3$ ； $N_R$  为可采储量， $\text{cm}^3$ ； $W_p$  为累计产水量， $\text{cm}^3$ ； $a$ 、 $q$  为待定系数。

## 2.3 残余油饱和度求解过程

采用式 (2) 拟合室内油水相渗实验数据，可以获得岩心中对应的可采油量  $N_R$ ，将  $N_R$  代入式 (1) 中即可求出残余油饱和度，如图 2 (a)、图 3 (a) 所示。

在求出残余油饱和度后，可以根据水相相渗曲线的指数式表达式求解出残余油饱和度对应的水相渗透率。

水相相渗曲线的指数式表达式如下：

$$K_{rw} = K_{rw}(S_{or}) S_{wd}^{n_w} \quad (3)$$

两边取对数，可出现直线形式：

$$\ln K_{rw} = \ln K_{rw}(S_{or}) + n_w \ln S_{wd} \quad (4)$$

其中：

$$S_{wd} = \frac{S_w - S_{wc}}{1 - S_{wc} - S_{or}} \quad (5)$$

式中： $K_{ro}$ 、 $K_{rw}$  为油、水相对渗透率，1； $K_{rw}(S_{or})$  为残余油饱和度下的水相相对渗透率，1； $K_{ro}(S_{wc})$  为束缚水饱和度下的油相相对渗透率，1； $S_{wd}$  为归一化含水饱和度，1； $S_w$  为含水饱和度，1。

求解  $K_{rw}(S_{or})$  具体方法：首先使用行业标准的方法处理相渗实验数据，得到水相相渗曲线后使用式 (4) 对其进行拟合，曲线的截距即为  $\ln K_{rw}(S_{or})$ （对应  $S_w = 1 - S_{or}$ ），如图 2 (b)、3 (b) 所示。

## 3 张型广适水驱曲线法计算残余油饱和度方法的应用

采用张型广适水驱曲线法，分别处理了油水黏度比为 10.8 ( $\mu_o = 10.45 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ,  $\mu_w = 0.97 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ) 和 100 ( $\mu_o = 50 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ,  $\mu_w = 0.5 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ) 的水驱油相渗实验数据。

油水黏度比为 10.8 的数据为文献 [5] 中的真实相渗实验数据（表 3）。计算得可动油储量  $N_R = 10.63 \text{cm}^3$ （中间变量  $q = 0.696$ 、 $a = 0.164$ ，图 2 (a)），对应的残余油饱和度  $S_{or} = 30.86\%$ ，外推的  $K_{rw}(S_{or}) = 15.54\%$ （图 2 (b)）。计算结果与 Jones 图解方法<sup>[5]</sup> 及李克文拟合方法<sup>[7]</sup> 结果基本一致（如表 5 所示）。相比于“截断法”，残余油饱和度由 32.90% 降低至 31.32%，驱油效率由 49.38% 升高至 51.81%。

油水黏度比为 100 的数据来源于数值模型模拟的岩心实验数据 ( $\mu_o = 50 \text{mPa} \cdot \text{s}$ ，其他模拟参数见表 2)，按照行业标准规定模拟水驱油实验过程，得到的模拟实验数据如表 4，计算得可动油储量  $N_R = 13.9978 \text{cm}^3$ （中间变量  $q = 0.6053$ 、 $a = 1.4883$ ，图 3 (a)），对应的残余油饱和度  $S_{or} = 26.58\%$ ，推算的  $K_{rw}(S_{or}) = 44.64\%$ （图 3 (b)）。计算结果与模型中输入参数基本一致（如表 6 所示）。相比于

“截断法”，残余油饱和度由 34.16% 降低至 26.58%，驱油效率由 52.16% 升高至 62.77%。

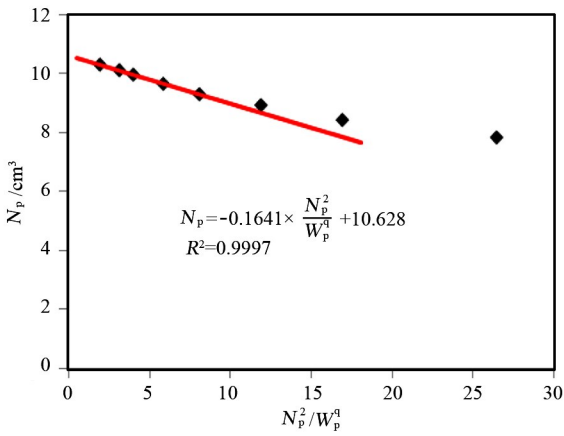
表 3 文献 [5] 中的相渗实验数据  
(原油黏度 10.45mPa·s)

$W_i/cm^3$	$W_p/cm^3$	$N_p/cm^3$	$\Delta p/psi$
3.11	0.00	3.11	120.40
7.00	0.00	7.00	97.50
11.20	3.36	7.84	91.90
16.28	7.85	8.43	87.80
24.27	15.34	8.93	83.70
39.20	29.90	9.30	78.50
62.30	52.65	9.65	74.20
108.80	98.84	9.96	70.00
155.60	145.49	10.11	68.10
311.30	301.00	10.30	65.40

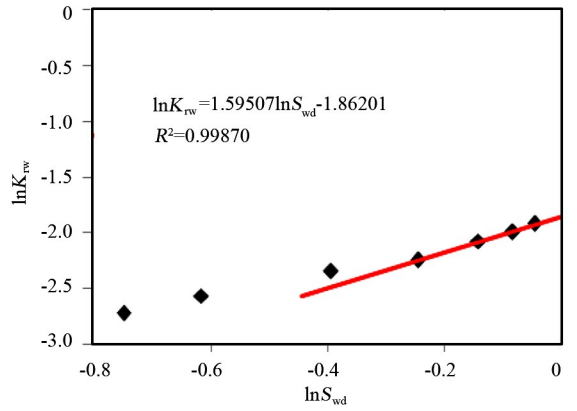
表 4 数值模型模拟的岩心实验数据  
(原油黏度 50mPa·s)

$W_i/cm^3$	$W_p/cm^3$	$N_p/cm^3$	$\Delta p/psi$
4.56	1.97	2.59	26.15
13.69	9.15	4.53	11.08
22.81	17.36	5.45	7.72
45.62	38.98	6.64	5.14
68.43	61.12	7.32	4.17
114.05	105.92	8.14	3.32
182.48	173.62	8.86	2.76
273.73	264.28	9.45	2.40
410.59	400.57	10.02	2.11
821.18	810.30	10.88	1.76

注:  $W_i$  为试验过程中累计注入水量;  $W_p$  为试验过程中累计产出水量;  $N_p$  为试验过程中累计产出油量;  $\Delta p$  为岩心两端的压差。

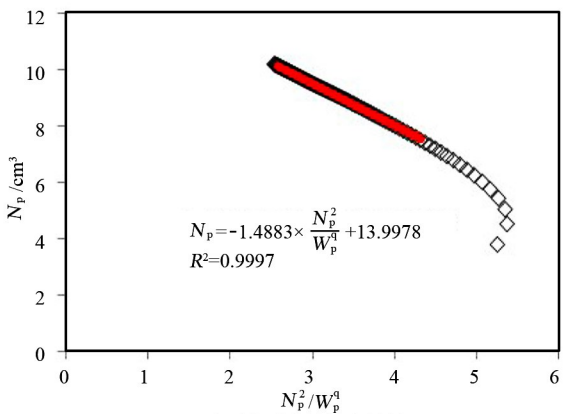


(a) 张型广适曲线拟合结果

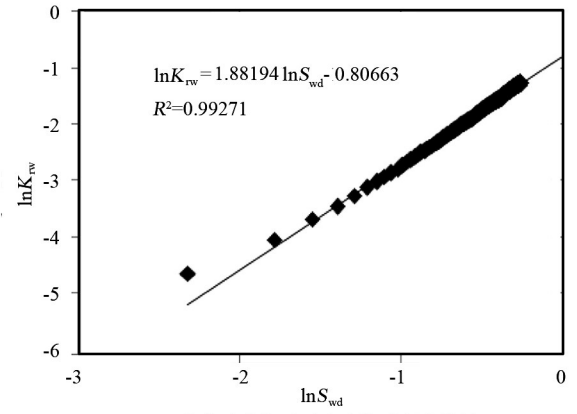


(b) 指数式水相渗透率表达式拟合结果

图 2 张型广适曲线法计算残余油饱和度过程 (文献 [5] 中实验数据)



(a) 张型广适曲线拟合结果



(b) 指数式水相渗透率表达式拟合结果

图 3 张型广适曲线法计算残余油饱和度过程 (相渗实验数值模拟数据)

表 5 张型广适水驱曲线法与其他方法比较  
(文献 [5] 实验数据)

参数	可动油量/cm <sup>-3</sup>	S <sub>or</sub> / %	K <sub>rw</sub> (S <sub>or</sub> ) / %
截断法	9.993	32.9	13.82
Jones 图解方法	10.491	31.3	16
李克文方法	10.485	31.32	15.62
本文方法	10.628	30.86	15.54

表 6 张型广适水驱曲线法与其他方法比较  
(数值模拟数据)

参数	可动油量/cm <sup>-3</sup>	S <sub>or</sub> / %	K <sub>rw</sub> (S <sub>or</sub> ) / %
模型	13.898	26.9	47.1
截断法	11.6304	34.16	27.94
本文方法	13.9978	26.58	44.64

## 4 结论和认识

1) 目前国内油水相渗行业标准中采用残余油饱和度计算方法为“截断法”,计算稠油残余油饱和度时截断误差较大,容易造成残余油饱和度偏大,预测的驱油效率偏小。

2) 张型广适水驱曲线计算残余油饱和度较 Jones 方法简单,较李克文方法物理意义明确,其计算误差在±1%以内,是一种很好的计算油水相渗实验中残余油饱和度的方法;通过指数式相渗表达式可以外推水相相对渗透率曲线得到  $K_{rw}(S_{or})$ ,计算误差在±3%以内,可以满足油藏工程应用。

### [参考文献]

- [1] 康大臣,郭占谦.以理论创新支持大庆油田的可持续发展[J].大庆石油地质与开发,2003,22(1):63~66.
- [2] 王曙光,赵国忠,余碧君.大庆油田油水相对渗透率统计规律及其应用[J].石油学报,2005,26(3):78~85.
- [3] SY/T 5345—2007,岩石中两相流体相对渗透率测定方法[S].
- [4] SY/T 6315—2006,稠油油藏高温相对渗透率及驱油效率测定方法[S].
- [5] Jones S C, Roszelle W Q. Graphical techniques for determining relative permeability from displacement experiments [J]. JPT, 1978, (5): 807~817.
- [6] 桓冠仁,沈平平.一种非稳态油水相对渗透率曲线计算方法[J].石油勘探与开发,1982,9(2):54~58.
- [7] 李克文,罗曼莉,王建新. JBN 方法的改进及相应的计算与绘图软件 [J]. 石油勘探与开发, 1994, 21 (3): 99~104.
- [8] Tao T M, Watson A T. Accuracy of JBN estimates of relative permeability [J]. SPE Journal, 1984, 24: 215~223.
- [9] 侯晓春,王雅茹,杨清彦.一种新的非稳态油水相渗相对渗透率曲线计算方法[J].大庆石油地质与开发,2008,27(4):54~56.
- [10] Shehadeh K, Masalmeh. The effect of wettability heterogeneity on capillary pressure and relative permeability [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2003, 39: 399~408.
- [11] 张金庆.水驱油田产量预测模型[M].北京:石油工业出版社,2013:72~77.
- [12] 张金庆,安桂荣,许家峰,等.广适水驱曲线适应性分析及推广应用[J].中国海上油气,2013,25(6):56~60.

[编辑] 黄鹏