

利用岩电参数计算聚合物驱相对渗透率

马 东¹, 刘昌为², 徐海民³, 刘 波⁴, 唐 唐⁵

(1. 长江大学石油工程学院, 湖北武汉 430100; 2. 中国地质大学能源学院, 北京 100083;

3. 中原油田分公司石油工程技术研究院, 河南濮阳 457099; 4. 吐哈油田分公司三塘湖采油厂, 新疆哈密 803009;

5. 中国石油西南油气田公司, 四川成都 610000)

摘要:常用的聚合物驱相渗曲线测试方法稳态法以及非稳态法都须精确确定聚合物黏度,而聚合物溶液具有明显的非牛顿流体特征,表现为其黏度随剪切速率变化而变化。针对现有的聚合物黏度修正模型计算结果差异较大、缺乏普适性的问题,提出一种从电阻率数据中计算聚合物驱相对渗透率的新方法,并通过相对渗透率-电阻率联测试验对该方法进行验证,与传统方法以及黏度修正法进行对比分析。结果表明,通过新方法计算得到的聚合物相相对渗透率数据较为准确、合理,可以解决传统方法计算得到的聚合物相相对渗透率值偏大的问题。

关键词:相对渗透率; 聚合物驱; 稳态法; 岩电参数; 电阻率

中图分类号:TE 311

文献标志码:A

引用格式:马东,刘昌为,徐海民,等. 利用岩电参数计算聚合物驱相对渗透率[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(1):118-123.

MA Dong, LIU Changwei, XU Haimin, et al. A new method for calculating relative permeability of polymer flooding based on core-electrical parameters[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(1): 118-123.

A new method for calculating relative permeability of polymer flooding based on core-electrical parameters

MA Dong¹, LIU Changwei², XU Haimin³, LIU Bo⁴, TANG Tang⁵

(1. Petroleum Engineering College, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Research Institute of Oil Production Technology, Zhongyuan Oilfield Company, Puyang 457099, China;

4. Santanghu Oil Production Plant, Tuha Oilfield Company, Hami 803009, China;

5. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: The precision of relative permeability data is crucial for the study of polymer flooding process. The steady-state and unsteady-state method are mostly used methods for measuring the relative permeability during polymer flooding, in which the viscosity of polymer solutions should be known. For most polymer solutions, their viscosity will vary with the shear rate or flow rate during the flooding process. Many polymer viscosity models have been proposed to correct the viscosity effect in the determination of the relative permeability, while different models can lead to different results and have limitations for field application. In this study, a new method for determining the relative permeability of polymer flooding was introduced based on the resistivity data of rocks saturated with polymer solutions. The new method was verified by the experimental data, and was compared with the traditional methods and the correction methods. The results show that the relative permeability of the polymer phase obtained by the new method is precise and reasonable, which can avoid the problem that the relative permeability

收稿日期:2016-05-16

基金项目:湖北省自然科学基金项目(2015CFB635);湖北省教育厅科学研究项目(B2016033)

作者简介:马东(1984-),男,讲师,博士,研究方向为油层物理和油藏工程。E-mail:madong@yangtzeu.edu.cn。

通讯作者:刘昌为(1988-),男,博士研究生,研究方向为油藏工程。E-mail:changweiliu@outlook.com。

might be over-estimated when using the traditional methods.

Keywords: relative permeability; polymer flooding; steady-state method; core-electrical parameter; resistivity

中高含水油田目前大部分都在使用聚合物驱油技术,聚合物驱相渗曲线的准确性对于聚合物驱开发方案的制定、实施和评价至关重要^[1-2]。聚合物溶液在多孔介质中流动复杂,其黏度随剪切速率或流速改变,具有明显的非牛顿流体特性,但聚合物相对渗透率测试方法须精确测定聚合物溶液的黏度^[3-5],这也是目前测定聚合物驱相对渗透率的主要困难。现有测量聚合物驱相对渗透率的方法大多是通过引入流变模型对聚合物黏度进行修正^[6]。但是这些方法也存在着明显的局限性,一是关于聚合物的流变模型较多,如 Black-Kozeny 模型以及在此基础上衍生推导的诸多模型,但此类流变模型并不具有普适性;二是聚物流变模型中的相关参数(如幂律模型中稠度系数和幂律指数)是通过流变仪测得,但流变仪所测得聚合物黏度并不能反映聚合物在多孔介质中的剪切过程,可能导致所测得的流变模型参数和实际有所区别。笔者提出一种新的聚合物驱相对渗透率计算方法,该方法计算相对渗透率时无须测定聚合物黏度,而是通过岩电参数计算相对渗透率。

1 电阻率指数-相对渗透率转换模型

笔者在毛细管束模型和阿尔奇电阻率公式的基础上^[7-8]引入迂曲度概念,推导一种从电阻率数据中计算相对渗透率数据的新方法,并通过现有文献数据和试验数据对该方法的准确性进行验证,该方法计算公式为

$$k_{rw} = \frac{1}{I} S_w S_{w*} \quad (1)$$

其中

$$S_{w*} = \frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{wi}}$$

式中, k_{rw} 为湿相(导电相,如水相)相对渗透率; S_w 为含水饱和度,%; S_{w*} 为修正含水饱和度,%; S_{wi} 为束缚水饱和度,%; I 为电阻率指数。

根据阿尔奇公式可知,电阻率指数和含水饱和度满足以下关系:

$$I = \frac{R_o}{R_w} = (S_w)^{-n} \quad (2)$$

式中, n 为含水饱和度指数; R_o 为岩心 100% 饱和水时的电阻率, $\Omega \cdot m$; R_w 为岩心某一含水饱和度时的电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

该模型主要用来计算湿相(导电相)相对渗透

率,对于非湿相则采用估算方法,采用 Li 在 Brooks-Corey 公式基础上提出的方法^[9-10]:

$$k_{rnw} = (1 - S_{w*})^2 [1 - (S_{w*})^{\frac{2+\lambda}{\lambda}}] \quad (3)$$

式中, k_{rnw} 为非湿相相对渗透率; λ 为孔径分布参数。

根据 Li 的方法, λ 可以由湿相相对渗透率和修正含水饱和度拟合得到:

$$k_{rw} = (S_{w*})^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}} \quad (4)$$

2 计算聚合物相对渗透率的新思路

式(1)~(4)构成了相对渗透率-电阻率指数转换模型,从中可以看出仅须获得电阻率指数以及束缚水饱和度便可求得湿相相对渗透率,然后通过拟合得到孔径分布参数 λ ,最后可以估算非湿相相对渗透率。该公式中并不包含聚合物黏度,从而避免了如何准确确定聚合物黏度这一难题。

式(1)~(4)在推导时假定两相流体只有其中一相可以导电,而另一相不能导电,而对于聚合物驱油,聚合物和油两相的导电能力都非常弱,几乎不能导电。但是如果在配置聚合物溶液时添加一定的无机盐,可以使聚合物溶液具有相应的导电性能,使聚合物驱油满足式(1)~(4)的使用条件。

事实上目前现场经常采用污水配置聚合物溶液,不仅可以节约大量清水资源,减少采油污水的处理费用,且有利于保护环境,同时还可以避免清水配置聚合物溶液和地层水混合不配伍带来的不良影响^[11]。这也意味着目前油田配置使用的聚合物溶液大多具有一定的导电性能,可以利用式(1)~(4)计算聚合物驱油相对渗透率。

3 聚合物黏度对电阻率的影响

提出的新方法表观上回避了对聚合物黏度的直接测定,但本质上聚合物黏度对聚合物相渗的影响已反映在电阻率指数参数中,为此设计了两组试验研究聚合物黏度变化对电阻率的影响。

第一组试验通过流变仪和电阻率仪测定不同剪切速率下聚合物黏度和聚合物溶液电阻率。试验用聚合物为阳离子型聚丙烯酰胺,采用矿化度为 5 g/L 的氯化钠溶液配制聚合物母液并分别稀释至聚合物浓度为 1 g/L,然后测定不同剪切速率下的聚合物黏度和聚合物溶液电阻率,试验结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出,聚合物黏度随剪切速率的增大

不断减小,当剪切速率增至 50 s^{-1} 时,聚合物黏度从 $55.56\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 下降到 $13.72\text{ mPa}\cdot\text{s}$,下降幅度为 75.30% ;而聚合物溶液电阻率随剪切速率增大同样呈现减小趋势,当剪切速率增至 50 s^{-1} 时,聚合物溶液电阻率从 $1.545\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 下降到 $1.39\text{ }\Omega\cdot\text{m}$,下降幅度为 10.03% 。这说明在流变仪测试中聚合物黏度对聚合物溶液的导电性能有一定影响。

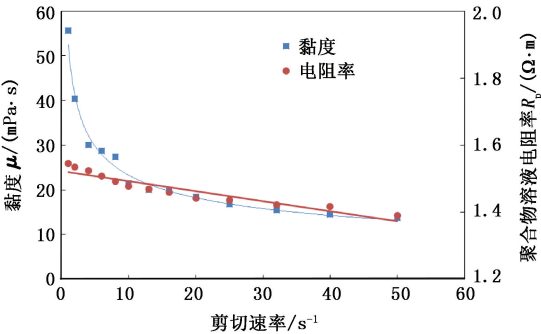


图 1 不同剪切速率下的聚合物黏度和聚合物溶液电阻率
Fig.1 Polymer viscosity and polymer solution resistivity at different shear rate

第二组试验是研究聚合物在多孔介质中受到的剪切作用,当黏度发生变化时其对岩心电阻率的影响。所用聚合物溶液和第一组试验相同,在 $0.5\text{ mL}/\text{min}$ 的驱替速度下,用聚合物溶液驱替岩样中的油至残余油状态,并测量此时岩心的电阻率;然后依次将驱替速度至增 1.0 、 1.5 和 $2.0\text{ mL}/\text{min}$,测量分别达到稳定状态后的岩心电阻率,试验结果如图 2 所示。

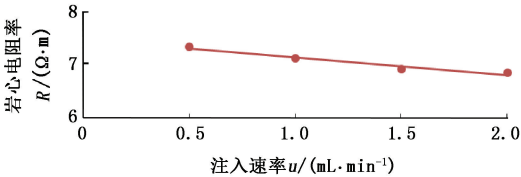


图 2 不同注入速度下的岩心电阻率
Fig.2 Core resistivity at different injecting rate

从图 2 可以看出,岩心电阻率随聚合物注入速度增大不断减小,当注入速度从 $0.5\text{ mL}/\text{min}$ 增至 $2.0\text{ mL}/\text{min}$ 时,岩心电阻率从 $7.338\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 下降到 $6.863\text{ }\Omega\cdot\text{m}$,下降幅度为 6.92% 。图 1 和图 2 呈现出相同的规律:当聚合物注入速度或剪切速率发生变化时,会引起聚合物溶液以及岩心电阻率的变化,而聚合物注入速度或剪切速率的变化也会引起聚合物黏度的改变,因此电阻率指数包含了聚合物黏度的变化。

聚合物黏度对聚合物相渗的影响不仅反映在电阻率指数 I 参数中,同样也反映在修正含水饱和度 S_{w*} 参数中。这是因为当聚合物黏度发生改变时会影响聚合物和油两相的分布以及饱和度,聚合物和

油两相的分布会影响电阻率指数,而饱和度的改变则会对新方法的计算结果产生影响。

4 试验验证及讨论

4.1 试验条件以及流程

此次试验为相对渗透率-电阻率联测试验,通过在岩心夹持器上安装电阻率测试仪,可以同时测定并换算得到不同含聚饱和度下的相对渗透率和电阻率。试验岩心采用中原油田某区块天然岩心,共 6 块,其中 4 块岩心采用稳态法,另外 2 块岩心采用非稳态法。试验温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,试验用水为氯化钠盐水,矿化度为 $5\text{ g}/\text{L}$,电阻率为 $1.628\text{ }\Omega\cdot\text{m}$;试验用油黏度为 $7.6\text{ mPa}\cdot\text{s}$,在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下其电阻率非常大,几乎不导电。试验所用聚合物溶液为氯化钠盐水配置,矿化度为 $5\text{ g}/\text{L}$,电阻率为 $1.563\text{ }\Omega\cdot\text{m}$,黏度为 $19.36\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。岩心相关物性参数、试验条件以及测试结果如表 1 所示。

表 1 岩心物性参数、试验条件以及测试结果

Table 1 Core samples properties, experimental condition and result

岩心 编号	渗透率 $k/10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$	孔隙度 $\varphi/\%$	束缚水 饱和度 $S_{wi}/\%$	残余油 饱和度 $S_{or}/\%$	饱和度 指数	测试 方法
1 [#]	312	24.63	0.343	0.249	2.188	稳态法
2 [#]	1054	26.89	0.324	0.238	2.213	稳态法
3 [#]	1563	27.89	0.306	0.219	2.155	稳态法
4 [#]	2389	30.97	0.264	0.207	2.056	稳态法
5 [#]	1459	28.31	0.304	0.213	2.051	非稳态法
6 [#]	1589	28.82	0.295	0.205	2.181	非稳态法

为了验证提出方法的计算准确性,将该方法和传统相对渗透率计算方法(聚合物黏度为定值)以及修正的聚合物相对渗透率计算方法(聚合物黏度随剪切速率变化)进行对比分析。聚合物黏度修正方法较多,选取具有代表性的由 Hirasaki 和 Pope 根据幂律流体修正的 Black-Kozeny 模型^[12],其剪切速率计算公式为

$$\gamma = \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^{\frac{n}{n+1}} \frac{12v}{(150k\varphi)^{0.5}} \tag{5}$$

式中, k 为渗透率, $10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$; φ 为孔隙度; v 为运移速度, mL/min 。

黏度与剪切速率之间的关系采用幂律模型,表达式为

$$\mu = A\gamma^{n-1} \tag{6}$$

式中, μ 为视黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; A 为稠度系数, $\text{mPa}\cdot\text{s}^n$; n 为幂律指数。

稠度系数和幂律指数通过流变仪测定不同剪切

速率下的黏度并拟合得到,其值分别为 52.465 和 0.647,如图 1 所示。

图 3 为不同性质岩心的电阻率指数与含聚饱和度的关系,图 4 为不同聚合物浓度下的电阻率指数与含聚饱和度的关系。从图 3、4 可以看出,在双对数坐标系下电阻率指数与含聚饱和度呈直线关系,这也表明阿尔奇公式仍然适用于聚合物驱油条件,这也与目前聚合物驱岩电参数相关文献得出的结论一致^[13]。拟合饱和度指数为 1.9~2.1。

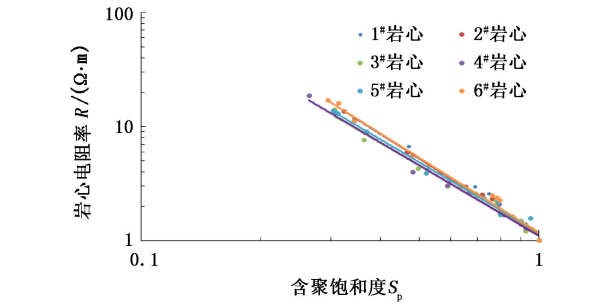


图 3 不同岩心下含聚饱和度与电阻率指数关系
Fig. 3 Relationship between polymer saturation and resistivity index of different core

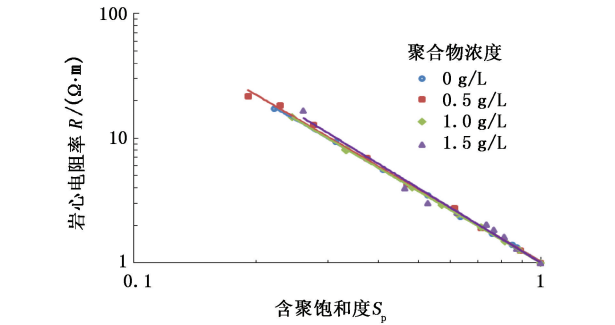


图 4 不同聚合物浓度下含聚饱和度与电阻率指数关系

Fig. 4 Relationship between polymer saturation and resistivity index at different polymer concentration

4.2 稳态法聚合物驱油试验结果讨论

图 5 为不同计算方法得到的 4 块岩心相对渗透率。4 块岩心的测试方法都为稳态法。从图 5 中可以看出:传统方法得到的聚合物相相对渗透率值明显偏大,与实际情况不符;通过本文方法和黏度修正法得到的聚合物相相对渗透率值较为接近,且更加符合实际情况。这主要是因为聚合物具有剪切稀化特征,即表观黏度随剪切速率的增加而减少,因此考

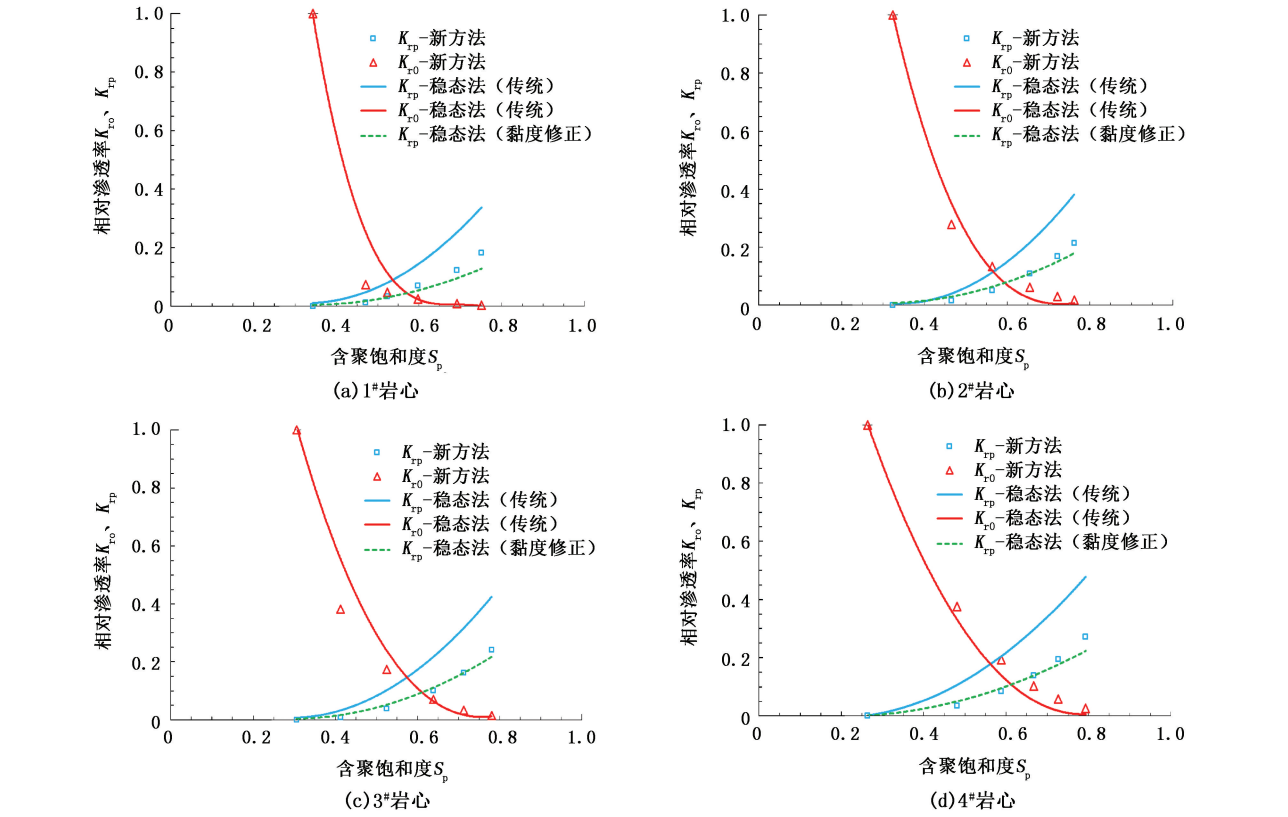


图 5 不同计算方法得到的相对渗透率(稳态法)
Fig. 5 Relative permeability calculated by different method (steady-state method)

虑聚合物黏度的动态变化后得到的聚合物相相对渗透率会明显变小。本文中方法得到的油相相对渗透率与试验数据基本一致。

图6为不同计算方法得到的不同渗透率岩心相对渗透率。从图6中可以看出,随着岩心渗透率的逐渐增大,3种方法计算得到的聚合物相相对渗透率满足相同的变化规律:①在同一含聚饱和度下的聚合物相相对渗透率逐渐增加,特别残余油饱和度

下的聚合物相相对渗透率显著增加;②相渗曲线的等渗点逐渐向右移动;③相渗曲线的两相跨度增大。图6中反映的聚合物相渗相关变化规律和现有文献得出的结论相一致^[6,14],这也说明所进行的聚合物驱油试验数据具有一定的准确性和合理性,同时也说明新方法得出的计算结果具有一定的准确性和合理性。

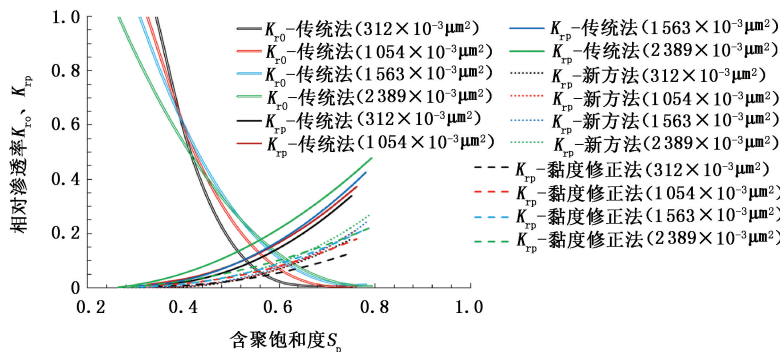


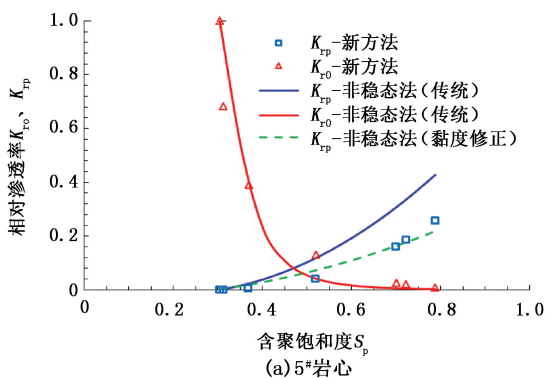
图6 岩心渗透率对相对渗透率的影响(稳态法)

Fig.6 Effect of core permeability on relative permeability (steady-state method)

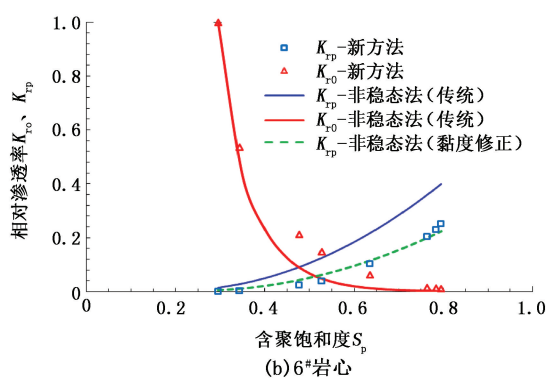
4.3 非稳态法聚合物驱油试验结果讨论

尽管非稳态法数据处理较为复杂,但其试验流程较为简单且耗时较短,为一种常用的相渗测试方法,为此本次试验采取非稳态法验证新方法的计算精度。图7为稳态法得到的不同计算方法下的两块岩心相对渗透率。从图7可以看出,尽管测试方法发生了改变,但非稳态法得到的相对渗透率呈现出

和稳态法相似的规律,新方法和黏度修正法得到的聚合物相相对渗透率较为接近,且远低于传统方法计算得到的聚合物相相对渗透率。本文中方法得到的油相相对渗透率与试验数据基本吻合。这说明新方法同样适用于非稳态条件下的聚合物驱油相对渗透率计算。



(a) 5#岩心



(b) 6#岩心

图7 不同计算方法得到的相对渗透率(非稳态法)

Fig.7 Relative permeability calculated by different method (unsteady-state method)

5 结论

(1)提出一种从电阻率数据中计算聚合物驱相对渗透率的新方法,该方法能够有效避免如何计算以及确定聚合物黏度这一难点问题,具有较高的计算准确性,可以解决传统计算方法带来的聚相相对

渗透率值偏大问题。

(2)随着渗透率的增加,相同含聚饱和度下的聚合物相相对渗透率增加,等渗点逐渐右移,两相渗流区扩大,说明本文中方法计算得到的相渗曲线具有一定合理性。

参考文献:

- [1] 秦同洛. 实用油藏工程方法[M]. 北京:石油工业出版社,1989.
- [2] 吴克柳,李相方,樊兆琪,等. 低渗-特低渗油藏非稳态油水相对渗透率计算模型[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013,37(6):76-81.
WU Keliu, LI Xiangfang, FAN Zhaoqi, et al. Unsteady state model for calculating oil-water relative permeability for reservoirs with low and ultra-low permeability[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2013,37(6):76-81.
- [3] 康万利,魏绍龙,胡雷雷,等. 两亲聚合物对 O/W 乳状液体系渗流的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016,40(1):140-145.
KANG Wanli, WEI Shaolong, HU Leilei, et al. Influence of amphiphilic polymer on the flowing of O/W emulsion system[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2016,40(1):140-145.
- [4] 李爱芬,付帅师,张环环,等. 实际油藏条件下毛管力曲线测定方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016,40(3):102-106.
LI Aifen, FU Shuaishi, ZHANG Huanhuan, et al. A capillary pressure measurement method at real reservoir conditions[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2016,40(3):102-106.
- [5] 李爱芬,孙强,张东,等. 单一缝洞内油水相对渗透率及其影响因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013,37(3):98-102.
LI Aifen, SUN Qiang, ZHANG Dong, et al. Oil-water relative permeability and its influencing factors in single fracture-vuggy[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2013,37(3):98-102.
- [6] 杨清彦. 两相驱替相对渗透率研究[D]. 北京:中国地质大学,2012.
YANG Qingyan. Study on relative permeability in condition of two-phase flooding [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [7] 马东,吴华,曾鸣. 从电阻率数据中得到相对渗透率的新方法[J]. 石油与天然气地质,2015,36(4):695-700.
MA Dong, WU Hua, ZENG Ming. A new method for estimating relative permeability with resistivity data[J]. Oil & Gas Geology, 2015,36(4):695-700.
- [8] MA D, LIU C, CHENG C. New relationship between resistivity index and relative permeability[J]. Journal of Energy Resources Technology, ASME, 2015, 137(3): 032904.
- [9] LI K. A new method for calculating two-phase relative permeability from resistivity data in porous media[J]. Transport in Porous Media, 2008,74(1):21-33.
- [10] LI K, HORNE R N. Comparison of methods to calculate relative permeability from capillary pressure in consolidated water wet porous media[J]. Water Resources Research, 2006,42(6):285-293.
- [11] 王振. 污水配制聚合物溶液黏度的影响因素及其机制探讨[D]. 青岛:中国石油大学,2009.
WANG Zhen. Influencing factors and mechanism discussed on the viscosity of polymer solution preprated by oilfield produced water[D]. Qingdao: China University of Petroleum,2009.
- [12] HIRASAKI G J. Analysis of factors influencing mobility and adsorption in flow of polymer-solution through porous-media[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1974,14(4):337-346.
- [13] 焦翠华,王军,刘兵开,等. 聚合物溶液对岩石电阻率及岩石参数的影响[J]. 石油与天然气地质,2011,32(4):631-636.
JIAO Cuihua, WANG Jun, LIU Bingkai, et al. Influences of polymer solution on rock resistivity and various indexes[J]. Oil & Gas Geology,2011,32(4):631-636.
- [14] 马骏. 二元复合体系相对渗透率曲线测定[D]. 大庆:东北石油大学,2014.
MA Jun. The determination of the relative permeability curve for sp systems[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.

(编辑 李志芬)