

基于扩展毛管数理论的化学驱相渗曲线研究

王友启,于洪敏,聂俊,许关利,卢刚

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:为了体现润湿性和孔隙结构对表面活性剂驱渗流特征的影响,在传统毛管数理论的基础上,通过物理模拟与数学处理相结合,提出了低渗透油藏包含润湿性和孔隙结构特征的扩展毛管数理论模型,并通过试验获得了不同低渗岩心对应的扩展毛管数与残余油饱和度,绘制了两者之间的关系图版,据此建立了基于扩展毛管数的相渗曲线非线性处理方法,并进行了油藏工程应用。研究表明,扩展毛管数理论能够体现出低渗透油藏中润湿性和孔隙结构的影响,而低渗透油藏化学驱油需要降低界面张力和改变储层润湿性的共同作用。扩展毛管数与残余油饱和度具有非线性递减函数关系,并只有当其超过临界值时,残余油饱和度才会随其增加而大幅度地下降。基于扩展毛管数的残余油饱和度非线性表征方法,与实验计算结果吻合很好。低渗透油藏化学驱相渗曲线处理新方法能够体现润湿性的影响和表面活性剂体系的驱替特征,为低渗透油藏化学驱油藏工程和数值模拟研究提供了依据。

关键词:孔隙结构;润湿性;残余油饱和度;扩展毛管数;相渗曲线;表面活性剂;低渗透

中图分类号:TE348

文献标识码:A

Study on chemical flooding relative permeability curves based on the extended capillary number theory

Wang Youqi, Yu Hongmin, Nie Jun, Xu Guanli, Lu Gang

(Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to reflect the effect of wettability and pore structure on seepage characteristics of surfactant flooding in low permeable reservoir, an extended capillary number (ECN) theoretical model is put forward, which contains wettability and pore structure on the basis of traditional capillary number (TCN) theory and combined physical simulation and mathematical treatment methods. ECN and residual oil saturation (ROS) values are collected in the different low permeability cores through experiments, and cross correlation chart between ECN and ROS is drawn. A nonlinear processing method of the relative permeability curve (RPC) is established with ECN, and reservoir engineering application is conducted. The results show that ECN theory can embody the wettability and pore structure in low permeability reservoirs, and the chemical flooding EOR needs combined action of interfacial tension reduction and reservoir wettability change in low permeability reservoirs. There is a nonlinear, negative correlation between ECN and ROS, and ROS will decrease drastically only when the increasing ECN exceeds a critical value. The nonlinear characterization method has a good agreement with the experimental results. Finally, the new method could reflect the effect of wettability and displacement characteristics of surfactant flooding, and thus provides a new tool for reservoir engineering and numerical simulation of chemical flooding in low permeability reservoirs.

Key words: pore structure, wettability, residual oil saturation, extended capillary number, relative permeability curve, surfactant, low permeability

收稿日期:2016-04-03;修订日期:2016-12-10。

第一作者简介:王友启(1968—),男,高级工程师,油藏工程和提高采收率。E-mail: wangyq_syky@sinopec.com。

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技攻关项目(P13124)。

低渗透油藏化学驱相渗曲线难以直接测定,中、高渗透油藏通常根据经典毛管数理论和毛管压力曲线求相渗曲线^[1],但也没有考虑润湿性和孔喉比的影响^[2-5]。而低渗透油藏中界面张力(σ)、润湿性($\cos\theta$)和孔隙结构对采收率的影响要远大于中、高渗透油藏^[6-7]。如何获得低渗透油藏化学驱相渗曲线?为此,本文在前人研究^[8-9]的基础上,考虑了界面张力、润湿性和孔隙结构的影响,提出了低渗透油藏扩展毛管数的概念,通过室内试验和数学处理相结合,绘制了扩展毛管数与残余油饱和度关系图版,建立了基于扩展毛管数的低渗透油藏化学驱相渗曲线确定方法,并在油藏工程中加以应用,可解决化学驱相对渗透率曲线难以获得的难题,为化学驱数值模拟和油藏工程研究提供理论依据。

1 扩展毛管数与残余油饱和度关系研究

1.1 低渗透油藏扩展毛管数理论模型

传统毛管数理论是评价采收率和残余油饱和度的关键性指标(公式1)。传统毛管数(N_c)与流速(v_w)和粘度(μ_w)成正比,与界面张力成(σ)反比,但没有考虑润湿性和孔隙结构的影响。

$$N_c = \frac{v_w \mu_w}{\sigma} \quad (1)$$

为了获得反映低渗特性的毛管数,将流速方程(公式2)引入传统毛管数理论中,获得含有驱动梯度的表达式。而要想让滞留在孔道中的油柱启动,施加的最小驱动力梯度要等于贾敏效应产生的附加阻力梯度,由此建立了油柱静止时不等径并联孔道模型(图1;公式3),并引入到上述方程中。

$$v_w = \frac{KK_{rw}}{\mu_w} \frac{\Delta p}{L} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{2\sigma \cos\theta}{l} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) \quad (3)$$

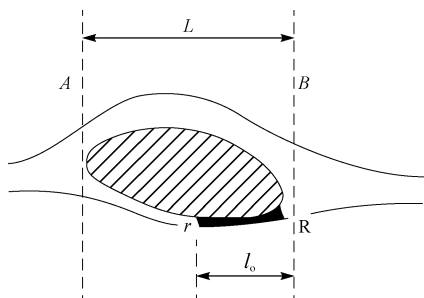


图1 不等径并联孔道模型

Fig. 1 A parallel channel model with varied diameters

为了体现润湿性和孔隙结构影响,联立公式1~公式3,并将润湿参数($\cos\theta$)、孔喉比(m)、孔隙半径(R)、绝对渗透率(K)移到方程左侧,经过整理得到低渗透油藏毛管数关系式,定义为扩展毛管数 N_{ec} (公式4)。

$$N_{ec} = \frac{R^2}{K \cos\theta (m-1)} \frac{v_w \mu_w}{\sigma} = f(S_{or}) \quad (4)$$

它在传统毛管数理论的基础上,又考虑了润湿性和孔隙结构等因素的影响,并与残余油饱和度 S_{or} 相关。相对于高渗透油藏而言,低渗透油藏要想降低残余油饱和度,需要考虑扩展毛管数中 σ 和 $\cos\theta$ 的综合作用。

1.2 扩展毛管数与残余油饱和度关系

1.2.1 室内试验研究

实验设备主要包括 DVT-10 动态界面张力仪、恒速压汞仪、接触角仪、高精度微流量泵、围压自动跟踪泵、数据采集及自动控制系统等。低渗岩心渗透率 $(20 \sim 40) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 注入流体为水和 0.1% ~ 3.0% 的表面活性剂体系。

前面已经给出了扩展毛管数的理论分析,为了研究扩展毛管数与残余油饱和度的关系,设计了大量不同界面张力、润湿性和孔隙结构的低渗储层驱油实验,利用 DVT-10 动态界面张力仪测定界面张力(σ),利用接触角法实验测定 $\cos\theta$ 、利用恒速压汞实验测定孔隙半径(R)、喉道半径(r)和孔喉比(m),由此根据理论模型(公式4)得到对应的扩展毛管数,同时获得水驱及表活剂驱对应的残余油饱和度(表1)。

1.2.2 扩展毛管数与残余油饱和度关系图版

基于实验结果,绘制了扩展毛管数与残余油饱和度关系图版,即扩展毛管数减饱和度曲线(图2)。

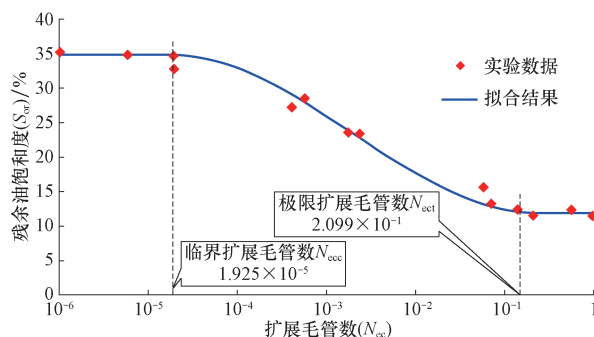


图2 扩展毛管数与残余油饱和度关系图版

Fig. 2 Relationship between extended capillary number and residual oil saturation

表1 低渗岩心驱油实验结果
Table 1 Displacement experiment results of low permeability cores

岩心编号	渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	界面张力/ ($\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$)	润湿角/($^\circ$)	孔隙平均 半径/ μm	喉道半径/ μm	孔喉比	残余油饱 和度/%	扩展毛管数
zsh-12	24.2	25.000	35.6	153.31	1.66	87.40	35.00	1.00×10^{-6}
zsh-42	24.4	25.000	36.4	157.28	1.65	82.60	34.60	5.93×10^{-6}
zsh-41	27.6	25.000	35.3	153.42	1.67	86.70	34.60	1.93×10^{-5}
gtz-2	36.7	25.000	42.8	166.19	1.67	72.19	32.63	1.96×10^{-5}
gtz-3	37.5	25.000	55.3	164.57	1.64	60.35	27.27	4.10×10^{-4}
zsh-14	20.7	1.950	59.7	158.16	1.46	79.95	28.45	5.82×10^{-4}
gtz-4	37.3	1.950	69.5	159.79	1.66	62.48	23.44	1.79×10^{-3}
zsh-10	23.5	0.785	72.7	165.73	1.45	94.2	23.35	2.38×10^{-3}
gtz-5	38.1	0.785	78.3	163.68	1.67	67.93	15.52	6.01×10^{-2}
zsh-44	29.5	0.052	95.4	159.69	1.59	76.63	13.05	6.96×10^{-2}
gtz-1	40.5	0.052	55.9	169.72	1.73	65.27	12.24	1.41×10^{-1}
gtz-6	35.1	0.025	77.6	160.45	1.57	58.35	11.39	2.10×10^{-1}
gtz-7	34.2	0.025	80.3	164.36	1.68	60.24	12.23	5.60×10^{-1}
gtz-8	35.3	0.009	89.4	168.75	1.69	57.53	11.39	9.80×10^{-1}

研究发现:①残余油饱和度与扩展毛管数具有非线性函数关系,这个关系可以用于后续化学驱相渗曲线的确定中;②扩展毛管数存在着界限值,左侧定义为临界值 N_{ecc} ,右侧定义为极限值 N_{ect} ,只有当扩展毛管数大于临界值时,残余油饱和度才会随着扩展毛管数增加而大幅度地下降,超过极限值后扩展毛管数变化对残余油饱和度影响不大,该图版为大幅度提高采收率驱油体系的设计提供了理论依据;③区别于高渗透油藏化学驱降低界面张力的驱油机理,低渗透油藏化学驱需要降低界面张力和改变储层润湿性的共同作用。

2 低渗透油藏化学驱相渗曲线确定方法

在化学驱模拟过程中,由于受到吸附、扩散弥散和离子交换等作用的影响,每个网格化学体系的浓度都是在不断变化的,对应油水相渗值也不断更新^[10]。在传统化学驱相渗曲线处理方法中,并未考虑润湿性和孔隙结构的影响,为此对其进行了改进,建立了基于扩展毛管数的化学驱相渗曲线确定方法,用于确定实际化学驱相渗曲线。

2.1 基于扩展毛管数的非线性处理方法

2.1.1 非线性处理方法

非线性处理方法主要通过低扩展毛管数(水驱)和高扩展毛管数相渗曲线的非线性插值处理,得到不同化学体系的油水相渗。相对于传统处理方法^[11],此

方法主要进行了3个方面的改进。具体做法分4步:

① 用扩展毛管数代替传统方法中的捕集数,依据化学体系用理论模型(公式4)计算扩展毛管数。

② 拟合实验确定扩展毛管数与残余油饱和度的关系图版,用非线性关系代替传统的线性处理,基于扩展毛管数计算残余油饱和度。

$$S_{or} = S_{or}^{low} - \frac{3(S_{or}^{low} - S_{or}^{high})}{(\lg N_{ect} - \lg N_{ecc})^2} (\lg N_{ec} - \lg N_{ecc})^2 + \frac{2(S_{or}^{low} - S_{or}^{high})}{(\lg N_{ect} - \lg N_{ecc})^3} (\lg N_{ec} - \lg N_{ecc})^3 \quad (5)$$

③ 初始化两条基本相渗曲线,即低扩展毛管数(水驱)和高扩展毛管数相渗曲线,并利用非线性插值方法代替传统的线性插值方法,标定出油水相渗端点值与指数值。

油水相渗端点值 K_{ri}^0 非线性插值处理($l = o, w$):

$$K_{ri}^0 = K_{ri}^{0low} - \frac{3(K_{ri}^{0low} - K_{ri}^{0high})}{(\lg N_{ect} - \lg N_{ecc})^2} (\lg N_{ec} - \lg N_{ecc})^2 + \frac{2(K_{ri}^{0low} - K_{ri}^{0high})}{(\lg N_{ect} - \lg N_{ecc})^3} (\lg N_{ec} - \lg N_{ecc})^3 \quad (6)$$

油水相渗指数值 n_l 的非线性插值处理:

$$n_l = n_l^{low} - \frac{3(n_l^{low} - n_l^{high})}{(\lg N_{ect} - \lg N_{ecc})^2} (\lg N_{ec} - \lg N_{ecc})^2 + \frac{2(n_l^{low} - n_l^{high})}{(\lg N_{ect} - \lg N_{ecc})^3} (\lg N_{ec} - \lg N_{ecc})^3 \quad (7)$$

④ 插值得到某一饱和度下的相渗值,利用经典的霍纳普(Honarpour, 1982)指数函数相渗公式计算相渗曲线。

$$K_{rw} = K_{rw}^0 \left(\frac{S_w - S_{wi}}{1 - S_{or} - S_{wi}} \right)^{n_w}$$

$$K_{ro} = K_{ro}^0 \left(\frac{1 - S_w - S_{or}}{1 - S_{or} - S_{wi}} \right)^{n_o} \quad (8)$$

2.1.2 与常规方法对比分析

$$N_{To} = \frac{|\bar{K} \cdot \nabla \Phi_l + \bar{K}[g(\rho_l - \rho_i) \cdot \nabla h]|}{\sigma_{ll'}} \quad (9)$$

$$S_{or} = \min \left[S_o, S_{or}^{high} + \frac{S_{or}^{low} - S_{or}^{high}}{1 + T_o \cdot N_{To}} \right] \quad (10)$$

传统方法一般采用捕集数计算残余油饱和度,实验回归系数 T_o 取值为 22000,它与新方法对应的扩展毛管数与残余油饱和度关系拟合曲线的对比结果见图 3。研究表明,相对于传统方法^[12-15]而言,新方法模型的拟合结果与图版实测数据十分吻合,可用于化学驱相渗表征。

2.2 实例应用

选用渗透率为 $27.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (zsh-41 岩心) 的低渗岩心,进行了确定方法的实例应用。通过拟合计算低扩展毛管数 (1.93×10^{-5}) 和高扩展毛管数 (1.41×10^{-1}) 的两条基本相渗曲线(图 4),确定它们的端点值和指数值。然后通过非线性插值处理,标定出任一扩展毛管数 (1.79×10^{-3}) 对应的端点值和指数值(表 2),根据霍纳普公式计算对应化学驱相渗曲线(图 5 中虚线所示)。

3 化学驱相渗曲线油藏工程应用

3.1 润湿性与极限驱油效率

基于残余油饱和度与扩展毛管数的非线性关系[公式(5)]和驱油效率公式,计算润湿性对极限驱油效率的影响(图 6)。

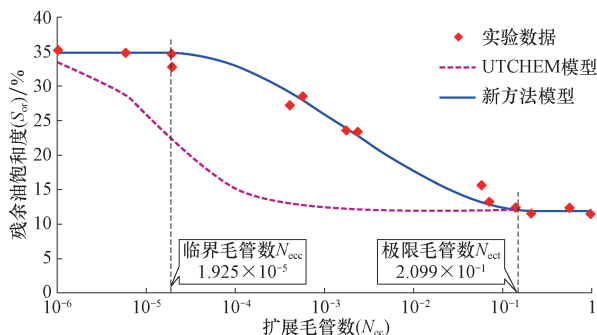


图 3 不同方法扩展毛管数与残余油饱和度关系对比
Fig. 3 Comparison of desaturation curves in different models

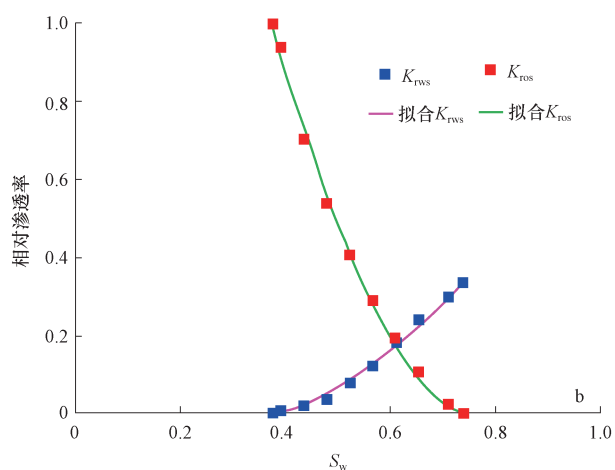
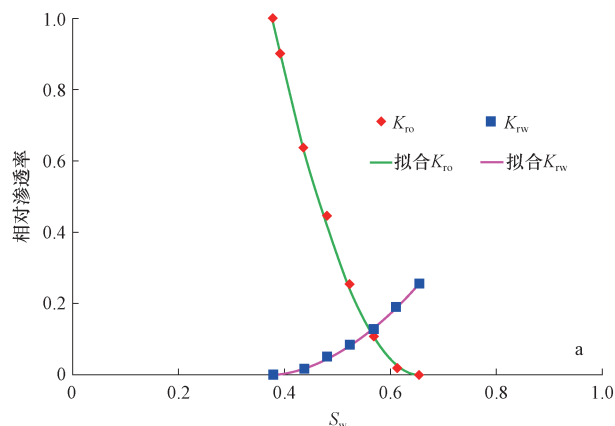


图 4 低扩展毛管数和高扩展毛管数相渗曲线拟合
Fig. 4 Relative permeability curve fitting under low and high extended capillary numbers

a. 低扩展毛管数(水驱); b. 高扩展毛管数(化学驱)

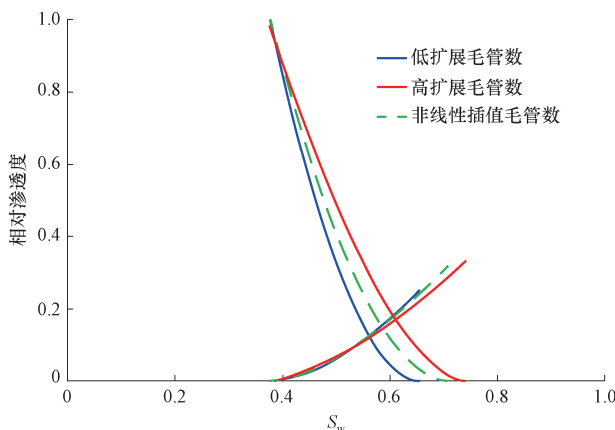


图 5 任一扩展毛管数对应的相渗曲线插值
Fig. 5 Relative permeability curve under any extended capillary number

极限驱油效率公式:

$$E_r = \frac{1 - S_{wi} - S_{or} N_{ec}}{1 - S_{wi}} \quad (11)$$

表2 任一扩展毛细管数相渗曲线的端点值与指数值

Table 2 Endpoint values and index values of relative permeability curve under any extended capillary numbers

参数	低扩展毛细管数	高扩展毛细管数	扩展毛细管数
S_{or}	0.346 0	0.260 0	0.284 2
K_{rw}^0	0.252 6	0.331 5	0.300 0
K_{ro}^0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
n_w	1.662 3	1.493 9	1.620 0
n_o	1.892 4	1.701 9	1.844 0

研究表明,相同界面张力与孔隙结构下,仅润湿性的改变就会使极限驱油效率提高10个百分点左右(润湿角 90° 最高)。因此,需要考虑润湿性的影响。

3.2 含水率与极限驱油效率

基于非线性处理、分流量和驱油效率公式,计算不同扩展毛细管数对应的含水率 f_w 与驱油效率 E_d 关系(图7)。

分流量方程:

$$f_w = \frac{1}{1 + \frac{K_{ro} N_{ec} \mu_w}{K_{rw} N_{ec} \mu_o}} \quad (12)$$

驱油效率公式:

$$E_d = \frac{S_w - S_{wi} N_{ec}}{1 - S_{wi} N_{ec}} \quad (13)$$

研究表明,随着扩展毛细管数的增加,含水率与驱油效率曲线右移,且含水率98%对应的极限驱油效率显著提高(40.49%—74.83%),为化学驱方案的评价提供了参考依据。

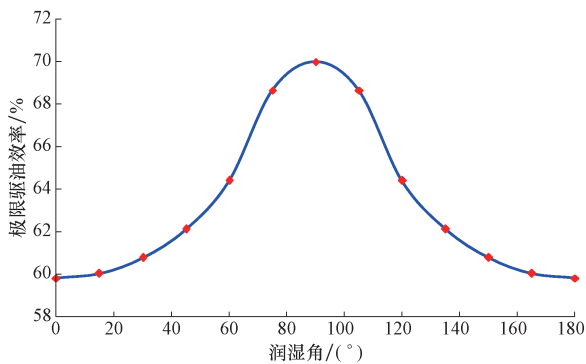


图6 润湿性对极限驱油效率的影响

Fig. 6 Effect of wettability on ultimate oil displacement efficiency

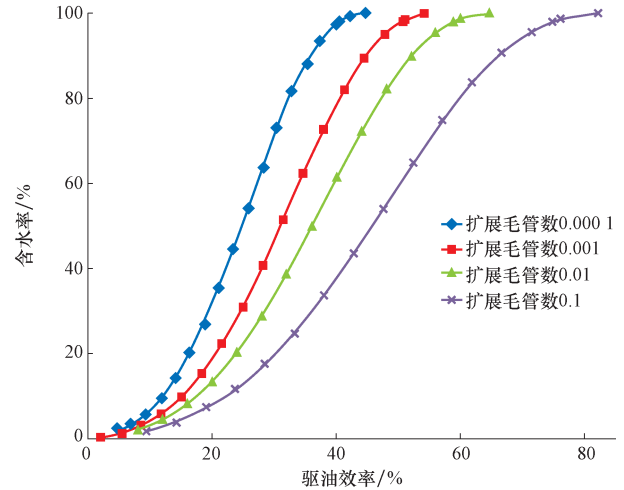


图7 不同扩展毛细管数对应的含水率与驱油效率关系

Fig. 7 Relationship of water contents and oil displacement efficiencies under different extended capillary numbers

4 结论

1) 在传统毛细管数理论上提出的扩展毛细管数,增加考虑了润湿性和孔隙结构的影响,更符合低渗油藏特点。

2) 当扩展毛细管数介于临界值与极限值之间,对应残余油饱和度下降很快,这为大幅度提高采收率的理想驱油体系设计提供了参考。

3) 基于扩展毛细管数建立的残余油饱和度非线性表征方法,与实验计算结果吻合很好,并沿用到相渗曲线的插值中,可用于油藏工程与数值模拟中。

4) 应用表明,低渗透油藏化学驱相渗曲线的处理方法能够体现润湿性的影响,可更真实地反映表面活性剂的驱替特征。

符号注释

$\cos\theta$ ——润湿参数,无量纲;

E_d, E_r ——驱油效率、极限驱油效率;

f_w ——含水率。

h ——液柱高度,m;

K ——绝对渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

K_{rw}, K_{ro} ——水相、油相相对渗透率,无量纲;

K_{rl}^0 ——油水相渗端点值,小数; $l=O$ 或 w ,即油或水;

$K_{rl}^{low}, K_{rl}^{high}$ ——低、高扩展毛细管数下相渗曲线端点值;

$\bar{K}$ ——渗透率张量, $10^{-3} \mu\text{m}^2$;

l_o, L ——油柱长度,m;

m ——孔喉比;

N_c ——传统毛管数,无量纲;
 N_{ec} ——扩展毛管数,无量纲;
 N_{ecc}, N_{ect} ——扩展毛管数临界值、极限值,无量纲;
 n_1 ——油水相渗指数值,小数;
 n_1^{low}, n_1^{high} ——低、高扩展毛管数下相渗曲线指数值;
 N_{T_0} ——捕集数,无量纲;
 R, r ——孔隙、喉道半径, m;
 S_{or}, S_{wi} ——残余油、束缚水饱和度, 小数;
 S_w ——含水饱和度, 小数;
 $S_{or}^{low}, S_{or}^{high}$ ——低、高扩展毛管数下残余油饱和度;
 S_l, S_{rl} ——相饱和度、相残余饱和度, 小数;
 $S_{rl}^{low}, S_{rl}^{high}$ ——低、高毛管数下相残余饱和度, 小数;
 T_o ——油相的实验回归捕集系数;
 v_w ——水相流速, m/s;
 μ_w, μ_o ——水相、油相粘度, mPa · s;
 σ ——油水界面张力, mN/m;
 $\frac{\Delta p}{L}$ ——驱替压力梯度, MPa/m;
 $\Phi_{I'}$ ——势能;
 $\rho_l, \rho_{I'}$ ——液相密度, kg/m³;

参 考 文 献

- [1] 唐永强, 吕成远, 侯吉瑞. 用毛细管压力曲线计算相对渗透率曲线的方法综述[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(22): 89-98.
Tang Yongqiang, Lv Chengyuan, Hou Jirui. A review of methods to calculate relative permeability curve by using capillary pressure curve [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(22): 89-98.
- [2] 杨胜来, 魏俊之. 油层物理学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 256-260.
Yang Shenglai, Wei Junzhi. Reservoir physics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 256-260.
- [3] Qi Lianqing, Liu Zongzhao, Yang Chengzhi, et al. Supplement and optimization of classical capillary number experimental curve for enhanced oil recovery by combination flooding [J]. Science China (Technological Sciences), 2014, 57(11): 2190-2203.
- [4] 翟上奇. 聚表二元体系的毛管数对驱油效率的影响研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2014.
Zhai Shangqi. The effect of capillary number on oil displacement efficiency of polymer-surfactant system [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2014.
- [5] 戚连庆, 刘宗昭, 杨承志, 等. 毛管数实验曲线再研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2009, 28(6): 247-251.
Qi Lianqing, Liu Zongzhao, Yang Chengzhi, et al. Deep research on the experimental curve of capillary number [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2009, 28(6): 247-251.
- [6] 薛家锋. 杏1-3区表外储层剩余油描述及注表活剂挖潜技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2004.
Xue Jiafeng. Remaining oil description of untapped reservoir and tapping potential technology research of surfactant flooding in Xing1-3 Region [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2004.
- [7] 王国锋. 低渗透油层活性水驱油数值模拟研究[D]. 东北石油大学, 2005.
Wang Guofeng. Study of numerical simulation of surfactant flooding in low permeable layer [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2004.
- [8] 李堪运, 李翠平, 赵光, 等. 非均质油藏二元复合驱合理毛管数实验[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(1): 87-91.
Li Kanyun, Li Cuiping, Zhao Guang, et al. Experiment on reasonable capillary number for binary compound flooding in heterogeneous reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 87-91.
- [9] 计秉玉, 赵宇, 宋考平, 等. 低渗透油藏渗流物理特征的几点新认识[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 129-133.
Ji Bingyu, Zhao Yu, Song Kaoping, et al. New insights into the physical percolation features of low-permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 129-133.
- [10] Faiz Koyassan Veedu. Scale-up Methodology for Chemical Flooding [D]. Texas: The University of Texas at Austin, 2010.
- [11] 戴涛, 席开华, 戴家林, 等. 基于毛管数插值的二元驱油藏模拟方法[J]. 山东大学学报(理学版), 2012, 47(8): 55-59.
Dai Tao, Xi Kaihua, Dai Jialin, et al. A method for numerical simulation of binary combination flooding based on interpolation of capillary number [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2012, 47(8): 55-59.
- [12] Hourshad Mohammadi. Mechanistic modeling, design and optimization of alkaline/surfactant/polymer flooding [D]. Texas: The University of Texas at Austin, 2008.
- [13] 王万彬. 低渗透油藏表面活性剂驱数值模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2010.
Wang Wanbin. Numerical simulation of surfactant flooding in low permeability reservoirs [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2010.
- [14] 戚连庆, 王为, 汪佑江, 等. 复合驱相渗率曲线再研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2010, 29(3): 137-142.
Qi Lianqing, Wang Wei, Wang Youjiang, et al. Further study on relative permeability curves for ASP flooding [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2010, 29(3): 137-142.
- [15] 赵明, 赵伟, 刘海成, 等. 复合驱流度设计方法研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(6): 131-134.
Zhao Ming, Zhao Wei, Liu Haicheng, et al. Study on the mobility design method for combination flooding [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(6): 131-134.

(编辑 张玉银)