

考虑水包油乳状液的复合驱数学模型

马德胜, 刘皖露, 王 强, 孙盈盈

(中国石油勘探开发研究院提高石油采收率国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:通过考察乳化液在多孔介质中的渗流规律,建立考虑乳化作用的复合驱数学模型。新模型既考虑水包油乳状液的形成可提高驱替相流度的作用,又考虑乳化降低残余油的机制;建立相对渗透率和相黏度的描述方式;将物理模型与数学模型结合,提出模型关键参数的获取方法。结果表明,复合驱中乳化可有效起到降水增油的作用,随着乳化性能增强,其降水增油能力也逐渐提升,但是增加的幅度逐渐减小。

关键词:乳化; 数学模型; 复合驱; 相对渗透率曲线; 残余油

中图分类号:TE 319 **文献标志码:**A

Mathematic model of alkali-surfactant-polymer (ASP) flooding with consideration of oil-in-water emulsion

MA De-sheng, LIU Wan-lu, WANG Qiang, SUN Ying-ying

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, State Key Laboratory of EOR, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the study on emulsion flow behavior in porous media, a new mathematical model of alkali-surfactant-polymer (ASP) flooding was established. The mechanisms were considered that emulsion can improve the mobility of displacing phase and emulsion also can reduce residual oil saturation in the new model. Accordingly, the description of choosing new relative permeability curve and modifying viscosity of displacing phase after emulsification was established. A laboratory method was proposed to obtain the key parameters of the new model which combined the physical model with the mathematical model. The results show that emulsification of ASP flooding can reduce the water cut and increase oil output effectively. This effectiveness increases with the increase of emulsifiability, but the rate of increase decreases gradually.

Key words: emulsification; mathematical model; ASP flooding; relative permeability curve; residual oil

研究^[1-2]表明,复合体系在多孔介质中驱油的过程中,在相同驱替方式下乳化产生时的驱油效果远远好于未乳化时的效果,乳化是复合驱最主要的驱油机制之一。考虑乳化驱油机制的数值模拟技术可以更好地预测各种地质条件和复杂动态下的矿场试验效果,现有的复合驱数值模拟软件未考虑乳化机制作用^[3]。现有乳化机制研究^[4-9]中,乳化对驱油效果的作用方式及影响因素的研究多未考虑乳化对采收率的影响,并且模型的建立多基于管流或流体动力学,与乳状液在多孔介质中的实际渗流理论存在差异。笔者基于乳状液在多孔介质中的渗流规律,深化乳化驱油机制及影响因素认识,建立考虑乳

化机制的复合驱数学模型。新模型既考虑乳化提高驱替相流度的作用,又考虑乳化降低残余油的机制。建立相对渗透率模型和相黏度模型,并将物理模型与数学模型结合,提出模型关键参数的实验获取方法。

1 乳化对提高采收率的影响

复合体系驱油过程中,在乳化剂的作用下,油水界面张力降低,油相成小液滴形式分散在水相中,可以形成稳定的水包油(O/W)型乳状液。乳化既可提高驱替效率,又可扩大驱替相的波及体积^[10-12]:
①乳化可剥离油膜,启动残余油,通过乳化携带作用把残余油滴携带到连续流动水相中,使原油流动性

能增强,原来水驱不动的剩余油滴与水混合生成乳状液一起向前运移,并与下游相遇的剩余油滴发生聚并,使分散的油滴变成连续的油相,促进油相的渗流,增加油相的分流量,从而提高驱替效率;②O/W型乳状液的形成可以提高驱替相的黏度,增加驱替相流动阻力,而多孔介质对乳化液滴的捕集作用,减小了驱替相对渗透率,其综合效果改变了驱替相的流度;③复合体系在驱替过程中优先进入高渗透层,并对这些层位产生一定的封堵作用,使驱替液转向中、低渗透层,进一步扩大了复合驱的波及体积;④W/O乳状液可能会增大油相黏度,增加油相流动阻力,进而对油井产能产生不利影响^[13]。

2 物理化学现象及主要影响因素

乳化液在多孔介质中的渗流规律与诸多因素有关:原油性质、化学剂类型及质量浓度、乳化程度、油水界面性质、碱性环境、乳滴、流速、油水比、孔隙结构等^[14-16]。若在数学模型中考虑所有因素,则可能造成影响因素重复作用,且模型过于复杂。因此,对上述诸多影响因素进行分析,发现乳化程度、油水界面性质、乳滴、碱性环境只是中间因素,原油性质、化学剂类型及质量浓度、流速、孔隙结构是影响乳状液

渗流的直接因素(图1)。由于乳状液在多孔介质中的作用方式复杂,很难从中间因素入手对乳化机制进行合理准确的数学描述,且相关参数难以获取,在数值模拟中也难以实现。因此突出主要矛盾,优选原油性质、化学剂类型及质量浓度、流速、孔隙结构等作为乳状液渗流的主要影响因素。

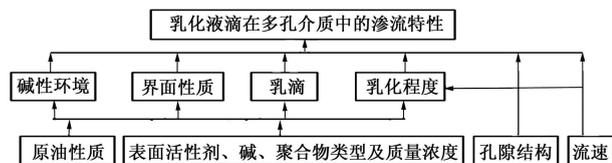


图1 乳状液渗流主要影响因素的层次分析

Fig.1 Analytic hierarchy process of main influencing factors of emulsions flow in porous medium

3 乳化数学模型原理

高含水油藏在复合驱前的水驱残余油饱和度已较低,复合体系与原油易形成水包油乳状液。根据乳化对复合体系驱油效果的影响,从数值模拟角度提出乳化降低残余油饱和度、提高驱替效率的机制,通过相对渗透率模型来实现;乳化改善流度、扩大波及体积的作用主要通过相黏度模型来实现,针对水包油型乳状液,主要修正水相黏度,见表1。

表1 乳化机制的数学模型实现原理

Table 1 Realization principle of mathematical model of emulsification mechanism

现象	机制	数学模型原理
乳化剥离油膜,启动残余油 乳化携带及乳化聚并作用,促进油相的渗流	提高驱替效率	相对渗透率模型
O/W型乳状液提高驱替相黏度,增加驱替相流动阻力 调制作用	扩大波及体积	相黏度模型
W/O型乳状液可增大油相黏度,增加了油相流动阻力	—	机率较低, 暂不考虑

4 数学模型的建立

4.1 基本假设及基本方程

(1)基本假设:①模型为局部热动力学平衡过程;②不考虑能量交换;③油藏等温;④因化学反应而引起的温度变化、压力和体积变化很小,可忽略不计;⑤扩展的达西定律适合于描述多相流动;⑥化学剂在岩石表面的吸附/滞留为不可逆过程;⑦多孔介质中多相流动时的多组分弥散现象符合扩展的费克定律;⑧油藏及流体均为不可压缩;⑨满足理想状态的混合规则;⑩固相静止稳定;⑪不考虑乳状液失稳的影响。

乳化机制复杂,影响因素较多,要合理描述乳状液在多孔介质中的渗流特性,还需做出以下阐明:①

乳状液在多孔介质的形成瞬间达到平衡;②一般情况下,水驱后剩余油饱和度较低,认为形成的乳状液均为水包油乳状液;③为了在数值模拟中较易实现,不将乳状液处理为独立于油相和水相的另一相,认为其均匀分布于连续相中;④乳化产生后,油相饱和度额外降低值所对应的那部分原油全部溶于水相,且瞬间发生,之后随水相流动。

(2)基本方程。模型设计为 n 组分,主要有水(W)、油(O)、表面活性剂(s)、聚合物(P)、碱、一价阳离子、二价阳离子、HA等。除油和气组分外,其余组分存在于水相中,表面活性剂、碱也可存在于油相中,流体相间交换仅发生在油、气相之间。

各组分质量守恒方程:

$$\operatorname{div}[F_i + D_i] + \frac{\partial A_i}{\partial t} = B_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (1)$$

其中

$$F_i = \sum_j C_{ij} \rho_j V_j,$$

$$V_j = -\frac{kK_{vj}}{\mu_j} (\operatorname{grad} P_j - \rho_j g),$$

$$D_i = -\varphi \sum_j S_j \rho_j D_{ij} \operatorname{grad} C_{ij},$$

$$A_j = [\alpha_i \varphi Z_i \sum_j \rho_j S_j + q_i],$$

$$B_i = Q_i + R_i.$$

式中, F_i 为对流项, V_j 为 j 相速度, D_i 为扩散项, A_j 为累积项, B_i 为源汇项; i 代表组分, j 代表相; P_j 为 j 相压力; ρ_j 为 j 相密度; k 为渗透率张量; K_{vj} 为 j 相相对渗透率; μ_j 为 j 相黏度; φ 为孔隙度; D_{ij} 为 i 组分在 j 相中的扩散系数; Z_i 为第 i 组分的总质量浓度; α 为几何因子系数; q_i 为 i 组分滞留反应量; Q_i 为 i 组分的注入或产出量; R_i 为 i 组分的反应生成量。

此外, 根据定义还有以下辅助方程: 各相饱和度之和 $\sum_j S_j = 1$; 毛管压力方程 $P_o - P_w = P_{caw}$; $\sum_i Z_i = 1$; 组分 i 在各相中的质量浓度之和 $\sum_j C_{ji} = 1$ 。

该方程系统中涉及的基本变量有 $(3n + 4)$ 个, 基本方程数与基本变量数相同, 上述方程系统原则上可解。为了求解该系统, 在基础模型上, 尚须补充乳化相关物化参数的数学描述。

4.2 物化参数描述

乳化机制较为复杂, 室内实验难以获得准确的乳状液相对渗透率曲线形态。从数值模拟角度出发, 直接考虑乳化对驱油效果的影响, 相应地提出了相对渗透率模型和相黏度模型。

4.2.1 相对渗透率模型

乳化发生后, 正确选取并处理油水相对渗透率曲线尤为重要。在其他条件相同的情况下, 化学驱中化学剂组合不同, 可存在 7 种情况, 对应的有 7 条相对渗透率曲线(图 2), 理论上, 这 7 条相渗的残余油右端点值依次右移。

- (1) 水驱, 无乳化发生, 驱至残余油饱和度 S_{or1} 。
- (2) 聚合物驱, 使用非黏弹聚合物, 不考虑聚表剂对乳化的影响, 忽略聚表剂产生的乳化, 因此无乳化现象。聚合物只有黏性, 驱至最终残余油饱和度 S_{or2} , 残余油的降低 ($\Delta S_{or1} = S_{or1} - S_{or2}$) 认为是由于聚合物的黏性所致。

(3) 聚合物驱, 使用黏弹聚合物, 不考虑聚表剂对乳化的影响, 因此无乳化现象。驱至最终残余油饱和度 S_{or3} , 残余油的降低 ($\Delta S_{or2} = S_{or1} - S_{or3}$) 认为是

由于聚合物的黏弹性所致, ($S_{or2} - S_{or3}$) 部分则是由聚合物的弹性所致。

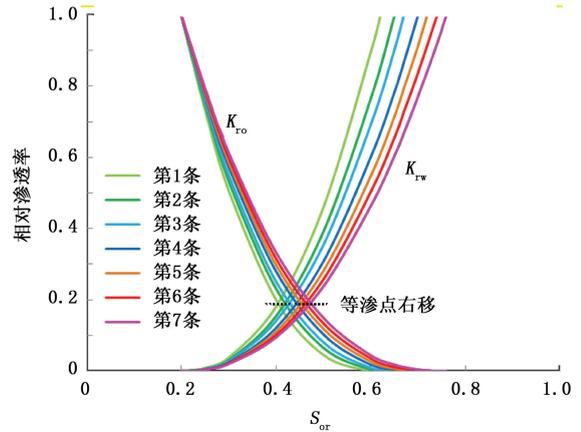


图 2 七条相对渗透率曲线

Fig. 2 Seven relative permeability curves

(4) 聚合物+表面活性剂二元驱, 无乳化配方, 驱至最终残余油饱和度 S_{or4} , 认为残余油的降低 ($\Delta S_{or3} = S_{or1} - S_{or4}$) 是由于聚合物的黏弹性驱油机制和表面活性剂降低界面张力所致, ($S_{or3} - S_{or4}$) 部分则全是由界面张力的降低引起的。

(5) 聚合物+表面活性剂二元驱, 乳化配方, 驱至最终残余油饱和度 S_{or5} , 认为残余油的降低 ($\Delta S_{or4} = S_{or1} - S_{or5}$) 是由于聚合物的黏弹性驱油机制、表面活性剂降低界面张力和乳化机制共同作用所致, ($S_{or4} - S_{or5}$) 部分则全是由表面活性剂引起的乳化机制导致。

(6) 聚合物+表面活性剂+碱三元驱, 乳化配方, 驱至最终残余油饱和度 S_{or6} , 认为残余油的降低 ($\Delta S_{or5} = S_{or1} - S_{or6}$) 是由于聚合物的黏弹性驱油机制、表面活性剂降低界面张力、乳化机制和碱引起的界面张力的进一步降低三种机制共同作用所致, ($S_{or5} - S_{or6}$) 部分是因为碱的作用影响(降低)界面张力(毛管力)进而影响残余油。

(7) 聚合物+表面活性剂+强碱三元驱, 强乳化配方, 驱至最终残余油饱和度 S_{or7} , 认为残余油的降低 ($\Delta S_{or6} = S_{or1} - S_{or7}$) 是由于聚合物的黏弹性驱油机制、表面活性剂降低界面张力、表面活性剂引起的乳化和强碱引起的乳化作用共同作用所致, ($S_{or6} - S_{or7}$) 部分由强碱乳化剂的作用而导致。

与水驱相比, 无乳化复合驱下, 油相饱和度的降低 ($S_{ora} - S_{orh}$) 是由于界面张力降低和聚合物的弹性机制而引起的(图 3), 由此被驱动的原油随油相流动。若不考虑聚合物的弹性机制, 则可以界面张力为参变量选取油水相相对渗透率曲线。乳化复合驱过程中油相饱和度的额外降低 ($S_{orb} - S_{orc}$) 是由于乳化启动部分残余油, 剥蚀下来的油膜或油滴随水相

流动而造成的。

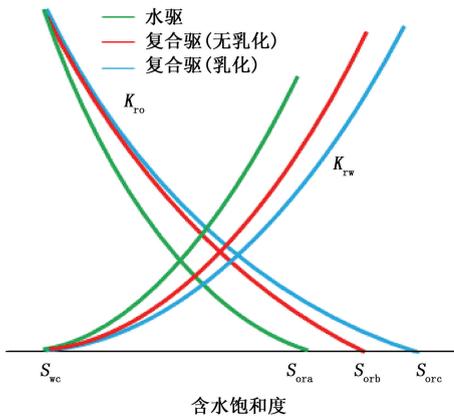


图 3 相对渗透率曲线对比

Fig. 3 Comparison of three relative permeability curves

乳化复合驱中含油饱和度的额外降低定义为 $S_{em} = S_{orb} - S_{orc}$; 乳化后复合驱过程中的油水相相对渗透率曲线可通过 S_{em} 值选取: $P = f(S_{em})$ 。

在无乳化复合体系与乳化复合体系降低界面张力能力相同的情况下, S_{em} 的触发源于复合体系中使用的化学剂组合不同, 乳化后的油水互溶与化学剂类型及质量浓度、流速 v 、孔隙结构 φ 有关:

$$S_{em} = f(C_s, C_a, C_p, v, \varphi)$$

4.2.2 相黏度模型

乳化修正水相黏度, 不修正油相黏度, 进行油水互溶:

$$\mu_{wem} = f(\mu_w, \mu_o, E_{Row}), \mu_w = f(C_p), \mu_o = \mu_o,$$

式中, μ_{wem} 指乳化后的水相黏度; μ_w 指乳化前的水相黏度; μ_o 指油相黏度; C_p 为复合体系中聚合物质量浓度; E_{Row} 为油水互溶比, 是指乳状液形成时, 完全溶于水相的原油体积与水相体积之比: $E_{Row} = \frac{V_{o\text{乳化}}}{V_w}$ 。

在复合驱过程中, 乳化驱动的油相完全溶于水相: $V_{o\text{乳化}} = f(E_{Row}); E_{Row} = f(S_{em})$ 。

不同剪切速率下驱替相的黏度, 采用 Meter 方程计算: $\mu = \mu^\infty + \frac{\mu^0 - \mu^\infty}{1 + (\gamma/\gamma_{1/2})^{n_M - 1}}$ 。其中, μ^0 为零剪切

黏度; μ^∞ 为临界高剪切速率下的黏度; n_M 为经验系数; $\gamma_{1/2}$ 为 μ^0 和 μ^∞ 取平均值时的剪切速率。

5 参数取值方法

乳状液渗流过程中物化现象的影响因素较多, 难以给出各影响因素准确恰当的关系式, 兼顾在数值模拟中实现的简便及实用性, 采取数据表方式对乳化参数进行数学表征, 未知量 S_{em} 的求取主要通过实验资料整理给出的数据表插值获得。

复合体系降低界面张力能力相同的情况下, 乳化的触发源于化学剂组合不同, 通过使用不同配方的复配表面活性剂来控制。针对一组实验, 复合体系中表面活性剂、碱和聚合物的质量浓度分别用 C_s 、 C_a 和 C_p 表示。

不考虑碱及聚表剂的乳化作用, 配置两组溶液, 在其他条件相同时, 一组配方产生强乳化且性质稳定、一组配方不乳化或不易乳化, 并把岩心采出端是否形成清晰的乳状液来做为乳化现象是否发生的判断标准。两组配方体系表面活性剂的组成不同, 但是在同一聚合物质量浓度和表面活性剂质量浓度下, 降低界面张力的能力相同, 以排除界面张力对残余油饱和度的影响, 两个配方的组成确定后就不再改变。

在一组性质相近的岩心中进行大孔隙体积 (V_p) 驱油实验, 一定流速下, 通过改变 C_s 、 C_p 稳定法得出无乳化复合体系在不同界面张力下的界面张力-相对渗透率的相关关系曲线; 在相同界面张力的乳化复合体系配方下, 稳定驱油实验获得乳化后的复合驱体系的油水相相对渗透率曲线。相同界面张力下两条相对渗透率曲线的残余油端点值的差值即为 S_{em} 。

取岩心出口端的乳状液 (从产生第一滴乳状液开始到乳状液不再产生时截止), 用布氏黏度计测量其零剪切黏度, 给出 C_s 、 C_p 、 S_{em} 、 μ_{wem}^0 , 表 2 所示的是一组 C_p 不同于 C_s 下的数据表形式。

表 2 实验数据表形式

Table 2 Table form of experimental data

项	界面张力 mN/m	无乳化复合体系配方		乳化复合体系配方		S_{em}	出口端乳状液黏度增量
		复配表面活性剂 A	相对渗透率曲线 残余油饱和度 S_{or}	复配表面活性剂 B	相对渗透率曲线 残余油饱和度 S_{ore}		
1	σ_1	C_{s1}	S_{or1}	C_{s1}	S_{ore1}	S_{em1}	$\Delta\mu_{wem1}^0$
2	σ_2	C_{s2}	S_{or2}	C_{s2}	S_{ore2}	S_{em2}	$\Delta\mu_{wem2}^0$
3	σ_3	C_{s3}	S_{or3}	C_{s3}	S_{ore3}	S_{em3}	$\Delta\mu_{wem3}^0$
4	σ_4	C_{s4}	S_{or4}	C_{s4}	S_{ore4}	S_{em4}	$\Delta\mu_{wem4}^0$

6 乳化作用的影响

以中国某油田的实际参数为基准建立了一个机制模型,一注一采,平面均质、正韵律地层,变异系数0.717,纵向上分为三个小层,每层厚度5 m,各层孔隙度分别为0.2、0.22和0.25,渗透率分别为 200×10^{-3} 、 900×10^{-3} 和 $2000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

首先水驱至综合含水率93%,注入化学剂 $0.6V_p$,后续水驱至综合含水98%。对比驱油效果,乳化作用可以起到很好的降水增油作用,并提高采收率4~5个百分点(图4)。改变复合驱中乳化剂浓度,调整体系的乳化性能。发现随着乳化性能增强,含水下降漏斗越宽,含水下降速度变快,之后回升的速度又变慢,降水增油效果逐渐增强,然而增加的幅度越来越小(图5)。

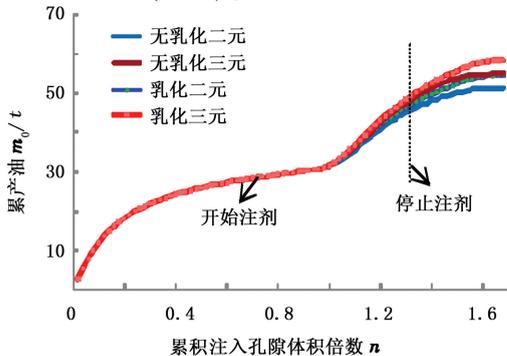


图4 乳化与无乳化复合驱对比

Fig. 4 Comparison of emulsification and non-emulsification

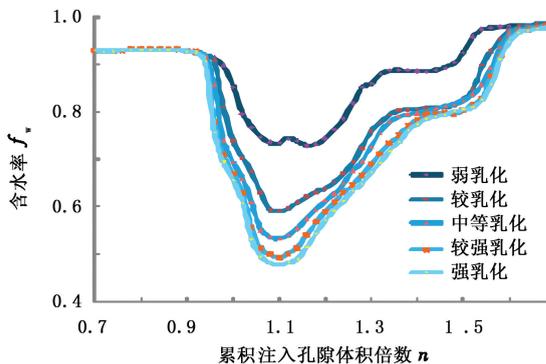


图5 不同乳化性能复合驱预测结果

Fig. 5 Prediction results of different compound flooding

7 结束语

通过深化乳化驱油机制认识,建立了考虑乳化机制的复合驱数学模型,增加了对乳化物化参数的数学描述。相对于目前一些基于管流及流体动力学建立的乳化模型,笔者的模型更加符合乳状液在多孔介质中的实际渗流规律。将数学模型与物理模型相结合,提出了模型相关参数的室内实验获取方法。

此模型易于在数值模拟中实现。根据机制模型分析的结果,复合驱中乳化可有效起到降水增油的作用,并且随着乳化性能增强,其降水增油能力也逐渐提升,但是增加的幅度逐渐减小。

参考文献:

- [1] 李世军,杨振宇,宋考平,等.三元复合驱中乳化作用对提高采收率的影响[J].石油学报,2003,24(5):71-73.
LI Shi-jun, YANG Zhen-yu, SONG Kao-ping, et al. Effect of crude oil emulsion on enhanced oil recovery in alkaline surfactant polymer flooding [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003,24(5):71-73.
- [2] 赵凤兰,岳湘安,侯吉瑞,等. ASP体系与大庆原油的乳化作用及影响因素[J].油气地质与采收率,2008,15(3):66-69.
ZHAO Feng-lan, YUE Xiang-an, HOU Ji-rui, et al. Evaluation and influencing factors of emulsification between ASP system and Daqing crude oil [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008,15(3):66-69.
- [3] 刘皖露,马德胜,王强,等.化学驱数值模拟技术[J].大庆石油学院学报,2012,36(3):72-78.
LIU Wan-lu, MA De-sheng, WANG Qiang, et al. Numerical simulation chemical flooding [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2012,36(3):72-78.
- [4] LEI Zheng-dong, YUAN Shi-yi, SONG Jie, Rheological behavior of alkali-surfactant-polymer/oil emulsion in porous media [J]. Springer J Cent South Univ Technol, 2008,15(s1):462-466.
- [5] 李星民,杨胜来,郎兆新.考虑乳化作用的三元复合驱数学模型[J].中国科学技术大学学报,2004,34:27-30.
LI Xing-min, YANG Sheng-lai, LANG Zhao-xin. An ASP combined flooding mathematical model considering emulsification mechanism [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2004,34:27-30.
- [6] ALVARADO D A, MARSDEN S S. Flow of oil-in-water emulsions through tubes and porous media [J]. SPEJ, 1979:369-377.
- [7] MCAULIFFE C D. Oil-in-water emulsions and their flow properties in porous media [J]. Journal of Petroleum Technology, 1973,24(6):727-733.
- [8] SOO H, RADKE C J. A filtration model for the flow of dilute, stable emulsions in porous media [J]. Chem Eng Sci, 1986,41(2):263-280.
- [9] KASSEM J H, FAROUQ A S. Modeling of emulsion flow in porous media [J]. The Journal of Canadian Petroleum Technology, 1995,34(5):30-38.

- [10] 夏惠芬,张云祥,赵庆辉,等. 三元复合体系在多孔介质中的渗流特性[J]. 油气采收率技术,1999,6(3):17-23.
XIA Hui-fen, ZHANG Yun-xiang, ZHAO Qing-hui, et al. A study on emulsion flow in porous media in alkaline surfactant polymer flooding[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 1999,6(3):17-23.
- [11] 王凤琴,曲志浩,孔令荣. 利用微观模型研究乳状液驱油机制[J]. 石油勘探与开发,2006,33(2):221-223.
WANG Feng-qin, QU Zhi-hao, KONG Ling-rong. Experimental study on the mechanism of emulsion flooding with micro models[J]. Petroleum Exploration and Development,2006,33(2):221-223.
- [12] 刘建军,宋义敏,潘一山. ASP三元复合体系驱油微观机制研究[J]. 辽宁工程技术大学学报,2003,22(3):47-49.
LIU Jian-jun, SONG Yi-min, PAN Yi-shan. Study on microscopic mechanism of oil displacement by alkaline-surfactant-polymer flooding [J]. Journal of Liaoning Technical University,2003,22(3):47-49.
- [13] 洪冀春,王凤兰,刘奕,等. 三元复合驱乳化及其对油井产能的影响[J]. 大庆石油地质与开发,2001,20(2):23-25.
HONG Ji-chun, WANG Feng-lan, LIU Yi, et al. Crude oil emulsion and the effect on well productivity in alkaline surfactant polymer flooding[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001,20(2):23-25.
- [14] ELGIBALY A A M, NASHAWI I S, TANTAWY M A. Rheological characterization of Kuwaiti oil-lakes oils and their emulsion[R]. SPE 7259, 1997.
- [15] 沈钟,赵振国. 胶体与表面化学[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [16] PAL R, RHODES E. Viscosity/concentration relationships for emulsions [J]. Journal of Rheology,1989,33(7):1021-1045.

(编辑 刘为清)

(上接第99页)

- [11] AGARWAL R G, GARDNER D C, KLEINSTEIBER S W, et al. Analyzing well production data using combined-type-curve and decline-curve analysis concepts [J]. SPE Reservoir Res Eval & Eng, 1999,2(5):478-486.
- [12] LEE W J, GATENSILL J M. Analysis of eastern devonian gas shales production data [R]. SPE 14506, 1985.
- [13] HAZLETT W G, LEE W J, NARAHARA G M. Production data analysis type curves for the devonian shales [R]. SPE 15934, 1986.
- [14] BELLO R O, WATTENBARGER R A. Multi-stage hydraulically fractured shale gas rate transient analysis [R]. SPE 126754, 2010.
- [15] BELLO R O. Rate transient analysis in shale gas reservoirs with transient linear behaviour [D]. Texas: Texas A & M U, College Station, 2009.
- [16] BELLO R O, WATTENBARGER R A. Rate transient analysis in naturally fractured shale gas reservoirs [R]. SPE 114591, 2008.
- [17] BELLO R O, WATTENBARGER R A. Modeling and analysis of shale gas production with a skin effect [R]. CIPC 2009-082, 2009.
- [18] EL-BANBI A H. Analysis of tight gas wells [D]. Texas: Texas A & M U, College Station, 1998.
- [19] BROHI I, POOLADI-DARVISH M, AGUILERA R. Modeling fractured horizontal wells as dual porosity composite reservoirs-application to tight gas, shale gas and tight oil cases [R]. SPE 144057, 2011.
- [20] BROWN M, OZKAN E, RAGHAVAN R, et al. Practical solutions for pressure transient responses of fractured horizontal wells in unconventional reservoirs [R]. SPE 125043, 2009.
- [21] OZKAN E, BROWN M, RAGHAVAN R, et al. Comparison of fractured horizontal-well performance in conventional and unconventional reservoirs [R]. SPE 121290, 2009.
- [22] CLARKSON C R, PEDERSEN P K. Tight oil production analysis: adaptation of existing rate-transient analysis techniques [R]. CSUG/SPE 137352, 2010.
- [23] BUMB A C, MCKEE C R. Gas well testing in the presence of desorption for coalbed methane and devonian shale [J]. SPE Formation Evaluation, 1988,3(1):179-185.

(编辑 李志芬)