

文章编号:1009-9603(2019)04-0088-05

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2019.04.013

二元复合体系界面活性与乳化性能 协同提高采收率实验研究

于群

(中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院,山东 东营 257015)

摘要:二元复合驱能够大幅度提高水驱后油藏采收率,为深化二元复合体系提高采收率机理认识,开展二元复合体系界面活性与乳化性能协同提高采收率研究。通过物理模拟实验、微观可视化驱替实验和核磁共振实验,研究具有不同界面活性和乳化性能二元复合体系的驱油效果,明确渗流过程中其界面活性变化规律,阐明油水界面张力与乳化性能协同提高采收率机理。结果表明,由于油藏的非均质性及驱油体系性能变化,二元复合体系与原油界面张力并非越低越好。过高界面张力不利于洗油效率的提高,而过低界面张力不利于乳化作用的发挥。当油水界面张力与乳化性能配伍关系良好时,二元复合体系既可以利用较低界面张力启动油藏深部残余油,又可以通过残余油滴封堵大孔道,改变油藏深部流场分布,降低非优势层剩余油饱和度,实现大幅度提高采收率的目标。

关键词:二元复合驱;界面张力;乳化性能;协同作用;采收率

中图分类号:TE357.4

文献标识码:A

Laboratory study on synergistic effect of interfacial activity and emulsifying properties on enhanced oil recovery with binary compound system

YU Qun

(Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC,
Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

Abstract: The binary compound flooding can dramatically improve oil recovery after water flooding. In order to have a better understanding of the enhanced oil recovery (EOR) mechanism of binary compound system, the synergistic effect of interfacial activity and emulsifying properties on EOR was studied. The physical simulation experiments, microscopic visualized displacement experiments, and nuclear magnetic resonance (NMR) experiments were applied, with the purpose to study the oil displacement effect of the systems with different interfacial activity and emulsifying properties, to clarify the change law of interfacial activity of the system during the percolation, and to illustrate the synergistic effect of interfacial tension and emulsification on enhancing oil recovery. Results show that because of the reservoir heterogeneity and the performance change of compound system, a lower interfacial tension between the system and oil may not get a better oil recovery. A high interfacial tension is negative to improve the displacement efficiency. However, a low interfacial tension results in an ignorable emulsification effect. When the oil-water interfacial tension and emulsifying properties match well, the residual oil in deep reservoir may be produced at low interfacial tension of the binary compound system. At the same time, oil droplets could plug large throats to change deep flow field distribution and to reduce remaining oil saturation of non-preferred stratum. All of these would reach the aim to dramatically enhance oil recovery.

Key words: binary compound flooding; interfacial tension; emulsifying properties; synergistic effect; oil recovery

收稿日期:2019-03-08。

作者简介:于群(1982—),男,山东烟台人,高级工程师,博士,从事化学驱提高采收率研究。联系电话:18354656976, E-mail: yq_upc@126.com。

基金项目:国家科技重大专项“高温高盐油田化学驱提高采收率技术”(2016ZX05011-003)。

二元复合驱能够大幅度提高水驱后油藏的原油采收率^[1-2]。FOSTER等通过物理模拟实验,建立了残余油饱和度与毛管数之间的关系,形成了经典毛管数理论^[3]。该理论认为,毛管数达到 10^{-2} 以后,残余油饱和度能够降至可以忽略的程度。而大幅度降低油水界面张力是降低毛管数的重要途径。化学驱替过程中,如果将油水界面张力降至 10^{-3} mN/m数量级(即超低油水界面张力),相应的毛管数将会降至 10^{-2} ,可以较大幅度地提高原油采收率^[4],故可依据超低油水界面张力指标,设计优选驱油用表面活性剂。一般认为,在化学驱油体系粘弹性一定的条件下,油水界面张力越低,复合体系性能越好。

近年研究发现,基于均质油藏模型的毛管数理论不一定完全适用于非均质油藏^[5-6]。由于传统的毛管数理论忽视了储层非均质性与驱油体系乳化性能对驱油效果的影响,其“油水界面张力越低驱油效果越好”的观点受到越来越多的质疑。首先,储层非均质性影响油水界面张力提高原油采收率幅度。在储层非均质条件下,物理模拟实验结果与毛管数理论产生背离^[7-8]。其次,随着研究不断深入,人们发现除了超低油水界面张力外,驱油体系的乳化性能也能够影响驱油效率,甚至在某些实验条件下可以得出驱油体系乳化性能比超低界面张力更重要的结论^[9-12]。驱替过程中,复合体系界面活性与乳化性能并非孤立发挥作用,很可能存在内在联系。目前,关于界面张力或者乳化性能等单一因素对采收率影响方面研究较多^[13],但对于二者在驱替过程中的配伍关系研究较少。为此,笔者通过物理模拟实验及核磁共振实验,开展二元复合体系油水界面活性与乳化性能协同提高油藏采收率规律研究,明确驱替过程中油水界面张力与乳化性能配伍关系,深化复合体系驱油机理认识,以期设计研发高效复合体系、大幅度提高油藏的原油采收率提供理论和技术支持。

1 实验器材与方法

1.1 实验器材

实验仪器主要包括:Anton Paar流变仪、Texas-500界面张力仪、ISCO高压高精度柱塞泵、激光粒度仪、Olympus体式显微镜、Turbiscan Tower多重光散射仪和核磁共振渗流分析仪。

实验用油为胜利油区陈家庄油田脱水原油,在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、剪切速率为 7.34 s^{-1} 条件下,原油黏度为 710

mPa·s。实验用水为陈家庄油田注入水,其矿化度为 $10\ 200\text{ mg/L}$,钙镁离子质量浓度为 260 mg/L 。实验用聚合物为部分水解聚丙烯酰胺,表面活性剂包括阴离子型表面活性剂、非离子型表面活性剂和阴非两性型表面活性剂。实验采用两岩心并联模型,岩心直径为 2.5 cm ,长度为 30 cm ,水测渗透率分别为 $1\ 400$ 和 400 mD 。实验试剂为氯化锰,分析纯。

1.2 实验方法

油水界面张力与体系黏度测试方法 利用界面张力仪,测定 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下不同复合体系与原油的界面张力。利用流变仪测定 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下不同复合体系黏度。

复合体系乳化性能测试方法 将质量浓度为 $1\ 500\text{ mg/L}$ 的聚合物与质量分数为 0.3% 的表面活性剂溶液复配成复合体系。将实验用油与复合体系按照一定比例置于样品池,在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下静置 0.5 h 后混合样品。利用多重光散射仪扫描分析,形成透射光谱和背散射光谱。根据不同时间背散射光与透射光强度变化,确定稳定性动力学指数。该指数综合了背散射光谱和透射光谱信息,可反映样品不稳定程度。一般其值越大,样品越不稳定,乳化性能越差。

物理模拟实验方法 分别将高低渗透率岩心抽真空饱和实验用水,驱替饱和实验用油,在油藏温度下老化 12 h 。以 0.3 mL/min 速度注入模拟水,水驱至含水率为 98% 。以 0.3 mL/min 速度注入 0.3 PV 复合体系,后续水驱至含水率为 98% ,计算原油采收率。

微观可视化驱替实验方法 将微观可视模型抽真空饱和实验用水,驱替饱和实验用油。以 0.01 mL/min 速度注入模拟水,水驱 3 PV 后,以 0.01 mL/min 速度注入 0.3 PV 复合体系,后续水驱 3 PV 。记录驱替过程,分析实验结果。

核磁共振实验方法 将岩心抽真空饱和实验用水后,驱替饱和实验用油,分别测试 T_2 谱。以 0.3 mL/min 的注入速度水驱至含水率为 98% ,测试 T_2 谱。以 0.3 mL/min 的注入速度注入 0.3 PV 复合体系,后续水驱至含水率为 98% ,测试 T_2 谱。

2 实验结果与分析

2.1 性能评价结果

在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,利用聚合物与表面活性剂通过界面张力与多重光散射实验,分别开展驱油体系界面张力及乳化性能研究,设计黏度相近、界面张力和乳化性能不同的复合体系。其中,超低张力复合

体系具有低至 10^{-3} mN/m 数量级油水界面张力,但乳化性能较差。I—IV型乳化复合体系乳化性能较好,而界面张力差别较大,为 10^{-4} ~ 10^{-1} mN/m(表1)。

表1 不同驱油体系性能

Table1 Performance of different flooding systems

驱油体系	黏度 (mPa·s)	界面张力 (mN/m)	稳定性动力学指数
聚合物	23.4	6.300	
超低张力复合体系	22.8	0.002	5.5
I 型	23.1	0.611	0.8
II 型	23.0	0.041	0.5
III 型	22.5	0.005	0.8
IV 型	22.9	0.000 3	0.3

2.2 复合体系采收率增值

利用不同性能驱油体系,开展物理模拟实验,对比分析不同驱油体系提高采收率幅度。

对比超低张力复合体系与 III 型乳化复合体系实验结果(表2)可见,虽然两者的油水界面张力均达到了超低值,但前者的驱油效果不如后者。分析认为,超低张力复合体系和 III 型乳化复合体系具有相似的黏度和界面张力,唯一不同因素就是乳化性能,说明乳化性能对原油采收率存在重要影响。

表2 不同驱油体系的采收率增值

Table2 Increase of EOR in different flooding systems

驱油体系	水驱采收率(%)	化学驱采收率(%)	采收率增值(%)
聚合物	43.4	56.8	13.4
超低张力复合体系	39.1	55.6	16.5
I 型	45.5	59.7	14.2
II 型	39.8	58.5	18.7
III 型	47.8	71.4	23.6
IV 型	38.7	55.9	17.2

4种乳化复合体系的乳化性能相近,但驱油效果相差较大(图1)。I—III型乳化复合体系提高采收率幅度随油水界面张力的降低而增加。该实验

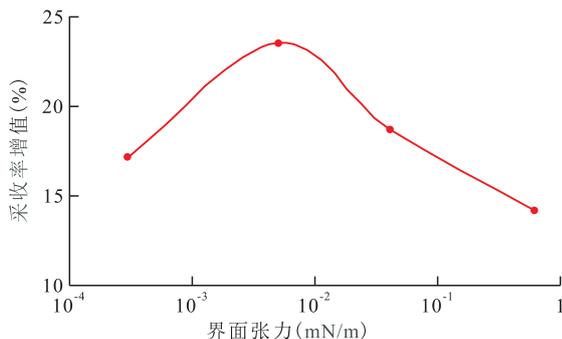


图1 不同界面张力复合体系提高采收率实验结果
Fig.1 Experiment results of EOR in different compound systems with different interfacial tensions

结论与传统毛管数理论相符。但当油水界面张力达到 10^{-3} mN/m 数量级时,采收率增值达到最大,高于 10^{-4} mN/m 数量级的IV型乳化复合体系,表明在乳化性能相近的条件下,并非界面张力越低采收率增值越高。驱油体系的界面张力与乳化性能存在配伍关系。当乳化性能一定时,界面张力过高或者过低都不利于原油采收率的提高。

2.3 提高采收率机理

为深化复合体系提高采收率机理认识,揭示界面活性与乳化性能启动残余油作用机制,开展渗流过程中复合体系界面张力变化规律和微观驱替特征研究。

2.3.1 界面张力变化规律

通过物理模拟实验及界面张力评价实验,开展运移过程中复合体系与原油界面张力变化规律研究。实验结果(图2)表明,在渗流过程中,随着运移距离增加,油水界面张力逐渐增加。III型乳化复合体系在前1/3运移距离中能够保持超低界面张力,但至2/3处时油水界面张力上升至 10^{-2} mN/m 数量级。IV型乳化复合体系全程能够维持超低界面张力。可见驱替过程中,受稀释和吸附损耗等因素影响,复合体系性能并非一直保持稳定。初始设计具有超低界面张力的III型乳化复合体系运移至岩心中后部区域时,将以 10^{-2} mN/m 数量级界面张力驱替残余油。初始界面张力低于 10^{-3} mN/m 的IV型乳化复合体系全程保持超低界面张力。

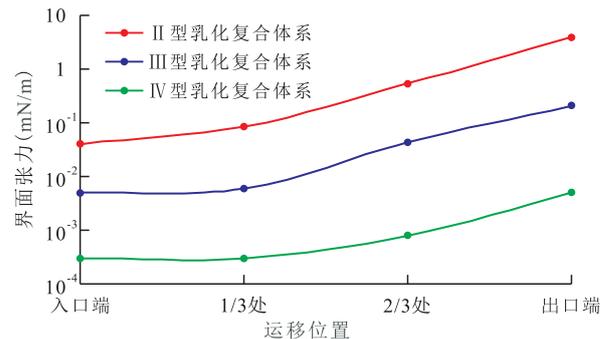


图2 渗流过程中油水界面张力变化规律

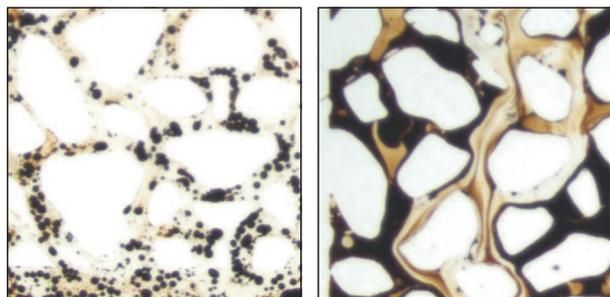
Fig.2 Variation of interfacial tension between oil and water during percolation

2.3.2 微观驱替特征

针对 I—IV 型乳化复合体系,开展微观可视化驱替实验,对比分析不同乳化复合体系微观驱替特征。

在多孔介质渗流过程中,乳化复合体系降低界面张力有助于残余油变形启动。不同界面张力下残余油启动状态不同。当油水界面张力较高时,残余油的聚集、形成突起以及脱离多孔介质表面过程

相对困难,并且被启动的残余油粒径较大。随着油水界面张力的降低,被启动残余油粒径逐渐变小。由于乳化复合体系乳化性能较强,残余油以稳定油滴形式运移。当油水界面张力达到超低值后,残余油不再形成明显分散小油滴,而是以油丝状启动,并沿着水流通道延伸(图3)。



a—II型乳化复合体系 b—IV型乳化复合体系
图3 不同乳化复合体系启动残余油特征

Fig.3 Characteristics of residual oil started by different emulsified compound systems

为定量研究界面张力对残余油启动的影响,利用激光粒度仪,分析 I—IV 型乳化复合体系与原油形成的液滴平均粒径。从图4可以看出:当油水界面张力由 10^{-4} mN/m 增至 10^{-3} mN/m 时,复合体系启动油滴的粒径基本稳定;当油水界面张力由 10^{-3} mN/m 增至 10^{-2} mN/m 时,启动油滴的粒径开始增大;当油水界面张力由 10^{-2} mN/m 增至 10^{-1} mN/m 时,

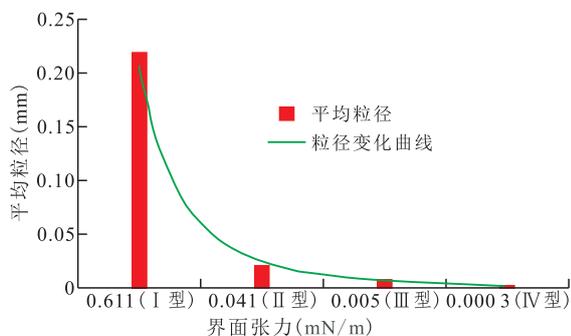


图4 不同乳化复合体系启动残余油粒径对比

Fig.4 Size of residual oil started by different emulsified compound systems

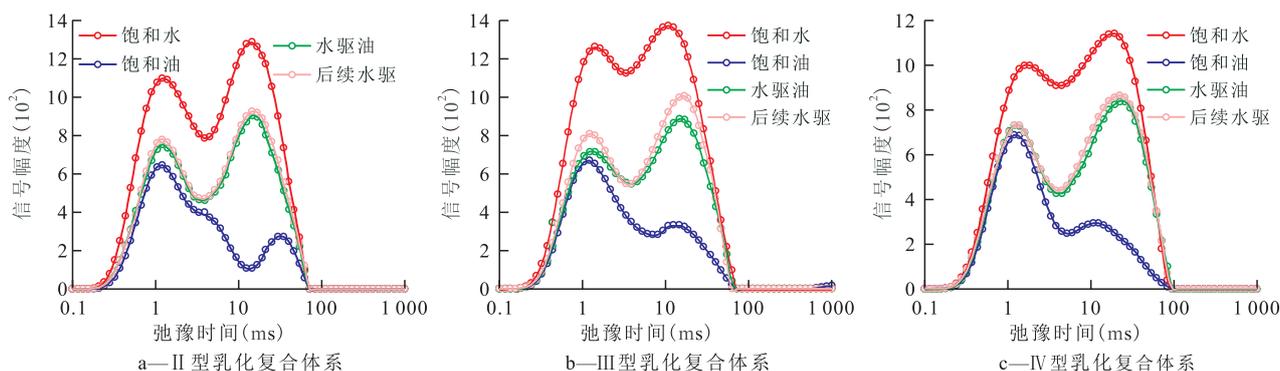


图5 II—IV型乳化复合体系核磁共振实验结果

Fig.5 Experimental results of NMR in type II-IV emulsified compound system

启动油滴粒径急剧变大。

根据 Kozeny 方程,高渗透率模拟岩心平均孔喉直径为 $12.2 \mu\text{m}$ 。4种乳化复合体系中, 10^{-1} mN/m 数量级复合体系启动油滴粒径过大,而超低界面张力体系启动油滴尺寸过小。 10^{-2} mN/m 数量级复合体系启动油滴粒径略大于孔喉直径。因此,当 III 型乳化复合体系运移至油藏深部后,油水界面张力升至 10^{-2} mN/m 数量级,其启动的油滴很可能会通过卡堵或架桥方式封堵大孔道,降低深部油藏优势通道的水相渗流能力,有助于提高非优势通道的波及体积。

2.3.3 残余油启动规律

为分析不同体系启动残余油规律,利用具有不同界面性能的乳化复合体系开展核磁共振实验。

核磁共振实验结果(图5)表明,水驱后 II 型乳化复合体系能够启动大孔喉和小孔喉中的少量残余油;IV 型乳化复合体系只能有效启动大孔喉残余油;III 型乳化复合体系能够显著降低大孔喉和小孔喉残余油饱和度。

驱替过程中不同乳化复合体系存在着不同的驱替机制。

具有较高界面张力的 I 型乳化复合体系由于启动残余油难度较大,其提高洗油效率能力有限。

具有较低界面张力的 II 型乳化复合体系能够降低近注入区域的残余油饱和度。但随着体系运移至岩心中后区域,油水界面张力升至 10^{-1} mN/m 甚至更高,II 型乳化复合体系在该区域启动的残余油粒径过大,很难对优势孔道产生封堵作用,因此 II 型乳化复合体系降低大孔喉和小孔喉残余油饱和度幅度有限。

具有 10^{-4} mN/m 的 IV 型乳化复合体系能够在驱替全程保持超低界面张力,因此 IV 型乳化复合体系能够有效降低波及区域的洗油效率。但由于体系启动残余油粒径远小于孔径中值,被启动残余油非常容易沿着优势通道运移,对降低优势通道渗流阻

力、扩大波及体积贡献很小。因此Ⅳ型乳化复合体系主要启动大孔喉中的残余油。

具有 10^{-3} mN/m界面张力的Ⅲ型乳化复合体系能够有效启动近注入区域残余油,提高洗油效率。当其运移至岩心中后区域时,体系与原油界面张力上升至 10^{-2} mN/m,此时除了具有较低界面张力和一定洗油效率外,由于界面张力变化还会产生更多驱油机制。一方面由于界面张力增加,启动残余油粒径变大接近孔径中值,有利于封堵大孔喉;另一方面界面张力的上升,增大了油滴界面变形需要克服的毛管压差,增加了油滴变形通过孔喉难度。这两方面共同作用有利于油滴在岩心中后部封堵已有大孔道,使较多注入体系进入小孔喉,因此Ⅲ型复合体系能够有效启动大孔喉和小孔喉中的残余油。

此外,虽然超低张力复合体系具有超低界面张力,但因其乳化性能较差,被启动的残余油在运移过程中容易聚并、黏附回岩石表面,影响洗油效率。

综上所述,虽然油水界面张力对原油采收率有着重要影响,但并非油水界面张力越低,采收率越高。乳化复合体系界面活性与乳化性能存在协同效应,应根据油藏条件及驱替过程体系性能变化规律设计驱油配方。

3 结论

除了黏度和油水界面张力外,乳化复合体系乳化性能对原油采收率有着重要影响。

油水界面张力并非越低越好。乳化复合体系界面活性与乳化性能产生协同效应时,才能取得更高采收率增值。应根据油藏条件及驱替过程中体系性能变化规律设计界面活性与乳化性能相配伍的驱油体系。

乳化复合体系启动残余油粒径与孔喉存在配伍关系。当二者配伍关系良好时,乳化复合体系能够进一步启动非优势通道残余油。

参考文献

- [1] YANG C Z. Adjustment of surfactant/polymer interaction in surfactant/polymer flooding with polyelectrolytes[C]. SPE 14931, 1986.
- [2] 陈涛平,宋文玲,高明,等.超低界面张力体系驱油方式与微观驱油效果[J].科学技术与工程,2010,10(17):4 259-4 262.
CHEN Taoping, SONG Wenling, GAO Ming, et al. The research on displacement ways and microscopic displacement effects of ultralow interfacial tension system[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(17): 4 259-4 262.
- [3] FOSTER W R. A low tension waterflooding process[J]. Journal of Petroleum Technology, 1973, 25(2): 205-210.
- [4] WAGNER O R, LEACH R O. Effect of interfacial tension on displacement efficiency[J]. SPEJ, 1966, 6(4): 335-344.
- [5] 贾忠伟,袁敏,张鑫璐,等.水驱微观渗流特征及残余油启动机理[J].大庆石油地质与开发,2018,37(1):65-70.
JIA Zhongwei, YUAN Min, ZHANG Xinlu, et al. Waterflooding microscopic flow characteristics and the remained oil starting mechanisms [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(1): 65-70.
- [6] 刘晨,王业飞,于海洋,等.低渗透油藏表面活性剂驱油体系的室内研究[J].石油与天然气化工,2011,40(5):486-489,498.
LIU Chen, WANG Yefei, YU Haiyang, et al. The laboratory study on surfactant flooding system in low permeable reservoir [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2011, 40(5): 486-489, 498.
- [7] 李华斌,陈中华.界面张力特征对三元复合驱油效率影响的实验研究[J].石油学报,2006,27(5):96-98.
LI Huabin, CHEN Zhonghua. Characteristics of interfacial tension and oil displacement efficiency with alkaline-surfactant-polymer flooding technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(5): 96-98.
- [8] 陈中华,李华斌,曹宝格.复合驱中界面张力数量级与提高采收率的关系研究[J].海洋石油,2005,25(3):53-57.
CHEN Zhonghua, LI Huabin, CAO Baoge. Study on the relation between level of IFT and enhanced oil recovery [J]. Offshore Oil, 2005, 25(3): 53-57.
- [9] 舒政,丁思家,韩利娟,等.表面活性剂驱油效率的影响因素研究[J].应用化工,2012,41(6):1 032-1 036.
SHU Zheng, DING Sijia, HAN Lijuan, et al. Factors influencing of the surfactant oil displacement efficiency [J]. Applied Chemical Industry, 2012, 41(6): 1 032-1 036.
- [10] 刘艳华,孔柏岭,吕帅,等.稠油油藏聚驱后二元复合驱提高采收率研究[J].油田化学,2011,28(3):288-291,295.
LIU Yanhua, KONG Bailing, LÜ Shuai, et al. A study on enhanced oil recovery of surfactant/polymer combinational flooding after polymer flooding in heavy oil reservoir [J]. Oilfield Chemistry, 2011, 28(3): 288-291, 295.
- [11] 贾忠伟,杨清彦,袁敏,等.大庆油田三元复合驱驱油效果影响因素实验研究[J].石油学报,2006,27(增刊):101-105.
JIA Zhongwei, YANG Qingyan, YUAN Min, et al. Experimental study on influential factors of ASP displacement efficiency in Daqing Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(Supplement): 101-105.
- [12] 孙盈盈,岳湘安,张立娟,等.乳化作用对水驱后残余油膜效果的实验与评价[J].新疆石油地质,2014,35(1):73-76.
SUN Yingying, YUE Xiang'an, ZHANG Lijuan, et al. Effect of emulsion on displacement of residual oil film following waterflooding: Experiment and evaluation [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(1): 73-76.
- [13] 赵方剑.特高温低渗透油藏乳液表面活性剂驱现场试验[J].特种油气藏,2017,24(6):125-128.
ZHAO Fangjian. Field tests for emulsion surfactant flooding in reservoirs with ultra-high temperatures and low permeability [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(6): 125-128.