

## 三元复合体系启动水驱后剩余油微观机理

吴晨宇<sup>1,2,3</sup>, 侯吉瑞<sup>1,2,3\*</sup>, 赵凤兰<sup>1,2,3</sup>, 张凤敏<sup>1,2,3</sup>, 郝宏达<sup>1,2,3</sup>, 刘刚<sup>1,2,3</sup>

(1.中国石油大学(北京)提高采收率研究院,北京 102249; 2.中国石油三次采油重点实验室  
低渗油田提高采收率应用基础理论研究室,北京 102249; 3.石油工程教育部重点实验室,北京 102249)

**摘要:** 为了提高水驱后原油采收率,三元复合驱技术被广泛应用到大庆油区萨尔图油田二类油层中。为明确三元复合体系启动水驱后剩余油机理,根据研究区二类油层天然岩心铸体薄片的真实孔喉制作微观仿真模型,并进行微观模型驱油实验。结果表明:水驱后剩余油主要以簇团状、膜状和孤岛状分布为主,少部分以喉道状和盲端/角隅状分布;三元复合体系的超低界面张力和高粘弹特性,能够乳化油滴,将油珠拉成油丝,并能剥离油膜,驱替出盲端油,进而大幅度降低水驱后簇团状、膜状剩余油,增加孤岛状油滴的数量,从而提高驱油效率。驱油效果定量分析结果表明:水驱驱油效率为50%,复合驱驱油效率最高可达38.68%;2种微观模型的最终驱油效率最高可达88.68%,4种三元复合体系的最终驱油效率均在77%以上。

**关键词:** 微观模型 二类油层 三元复合驱 剩余油形态 启动机理

中图分类号: TE357.43

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2015)05-0084-05

## Study on the microscopic mechanism of driving remaining oil by ASP compound system after water flooding

Wu Chenyu<sup>1,2,3</sup>, Hou Jirui<sup>1,2,3\*</sup>, Zhao Fenglan<sup>1,2,3</sup>, Zhang Fengmin<sup>1,2,3</sup>, Hao Hongda<sup>1,2,3</sup>, Liu Gang<sup>1,2,3</sup>

(1. Research Institute of Enhanced Oil Recovery, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China; 2. Basic Theory Laboratory of Enhanced Oil Recovery in Low Permeability Oilfield, Key Laboratory of Tertiary oil Recovery, PetroChina, Beijing City, 102249, China; 3. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, Beijing City, 102249, China)

**Abstract:** ASP flooding technology is being used in the second class reservoirs of Saertu oilfield in Daqing to improve the oil recovery after water flooding. In order to know the mechanism of ASP system driving remaining oil after water flooding, microscopic simulated model was built according to the real pore throat of casting body slice of the natural core and experiment of ASP flooding using this model was performed. The results show that, the main types of remaining oil after water flooding are the cluster type, the film type and the island type. There are also a little blind end type and the throat type. The ultra-low interfacial tension (IFT) and high viscoelasticity enable the ASP system to emulsify oil, drag the oil droplets into oil thread, peel oil film and sweep out the blind end oil, and therefore most of the cluster and the film type oil reduced while the island type oil increased, which improves the oil displacement efficiency. The quantitative analyses of oil displacement effect show that the water displacement efficiency is 50%, while the ASP displacement efficiency is 38.68%. The highest ultimate oil displacement efficiency of the microscopic models is 88.68%. The ultimate oil displacement efficiencies of the four ASP compound systems are all above 77%.

**Key words:** microscopic model; second class reservoirs; ASP compound flooding; remaining oil form; mechanism of driving remaining oil

收稿日期: 2015-07-13。

作者简介: 吴晨宇(1989—),女,黑龙江五常人,助理工程师,硕士,从事油气田开发方面的研究。联系电话:13796999596, E-mail:89wchy@163.com。

\*通讯作者: 侯吉瑞(1965—),男,吉林九台人,教授,博导。联系电话:(010)89731663, E-mail:houlirui@126.com。

基金项目: 国家示范工程“大庆长垣特高含水油田提高采收率示范工程”(2011ZX05052),国家自然科学基金项目“ASP复合驱油藏油水界面张力变化规律及剩余油启动机制研究”(51174216)。

三元复合驱技术目前被广泛应用于大庆油田萨尔图油田二类油层的矿场试验,并取得了显著效果<sup>[1-3]</sup>。它是由碱、表面活性剂和聚合物3种化合物混合作为驱油剂的一种采油技术,具有表面活性剂驱和聚合物驱的共同优点,既能提高驱油效率,又可扩大波及体积<sup>[4-6]</sup>。质量浓度不同的三元复合体系对于最终的驱替效果会有不同影响,而普通的宏观驱替实验一般只能通过比较原油的最终驱油效率等来对比不同驱替剂的作用效果,但无法说明驱替剂在地层条件下的运移及其与原油的作用过程。为此,笔者利用微观可视化模拟技术<sup>[7-11]</sup>,进行三元复合体系启动各类剩余油的微观驱油实验,以分析超低界面张力、体系粘度对最终驱油效率的影响,通过观察驱替过程了解驱替剂对不同类型剩余油的启动机理<sup>[12-16]</sup>,以期为三元复合驱技术的发展提供理论依据。

## 1 实验器材与方法

### 1.1 实验器材

**微观模型** 实验所用微观模型是根据萨尔图油田二类油层<sup>[17-18]</sup>的孔喉及连通性,利用光学玻璃,根据天然岩心铸体薄片制作的二维透明仿真模型,在结构上具有储层岩石孔隙的真实标配、相似的几何形状和形态分布。模型规格为30 mm×20 mm,模型渗透率为0.3~0.4  $\mu\text{m}^2$ 。

通过研究现场提供的岩心切片照片,根据孔隙、喉道直径数据,制作模型分为2种类型:模型I,孔隙大,喉道窄,孔喉比较大;模型II,孔隙、喉道半径相近,孔喉比相对较小。

**实验材料** 聚合物为有效物含量为88%的部分水解聚丙烯酰胺(HPAM);表面活性剂为有效物含量为50%的重烷基苯磺酸盐(HABS);碱为NaOH,分析纯。实验中所用的三元复合体系成分见表1。实验用油为萨尔图油田原油,45℃时的表观粘度为10 mPa·s。实验用水为萨尔图油田地层水,总矿化度为6 778 mg/L,其中NaHCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,

MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, CaCl<sub>2</sub>, KCl和NaCl的质量浓度分别为2 828, 114, 554, 64, 20和3 488 mg/L。

### 1.2 实验方法

**粘度测试方法** 在剪切速率为7.34 s<sup>-1</sup>的条件下,采用MCR301型界面流变仪测试粘度。

**界面张力测试方法** 采用旋滴法,在转速为5 000 r/min的条件下,采用SVT20N型视频旋转滴张力仪测试界面张力。

**微观驱替实验方法** 微观驱油实验流程参见文献[5]。实验步骤包括:①将微观模型抽真空,饱和地层水,用原油驱替地层水,建立束缚水饱和度;②以5  $\mu\text{L}/\text{min}$ 的恒定流速,用地层水驱替孔隙介质中的原油20 min,观察水驱后剩余油分布;③以相同流速改注三元复合体系驱替30 min,观察三元复合驱后的剩余油分布,并用显微照相和录像设备记录剩余油的分布及体系驱替剩余油过程;④分析图像,计算该驱替条件下的驱油效率;⑤清洗微观模型,实验结束。采用ZEISS光学显微镜记录实验过程及图像处理设备对实验结果进行处理。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 水驱后剩余油的类型及形态

由模型I及模型II水驱后剩余油的分布(图1)可见:水驱后剩余油以簇团状(图1中A)为主,其存在于大孔隙及孔喉交汇处;还有一部分以膜状(图1中B)形式存在;许多在水驱过程中形成的油珠以孤岛状剩余油(图1中C)的形式存在于孔隙及喉道中;此外还有较少部分呈现盲端/角隅状(图1中D)及喉道状(图1中E)。由图1亦可看出,5类剩余油在2种微观模型中均存在,只是各自所占比例不同。

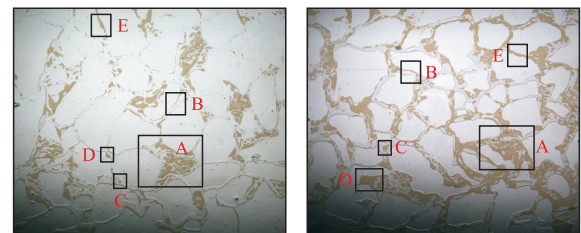


图1 模型I及模型II水驱后剩余油分布形态  
Fig.1 Remaining oil state after water flooding in model I and model II

### 2.2 三元复合体系对各类剩余油的启动

#### 2.2.1 对各类剩余油的启动过程

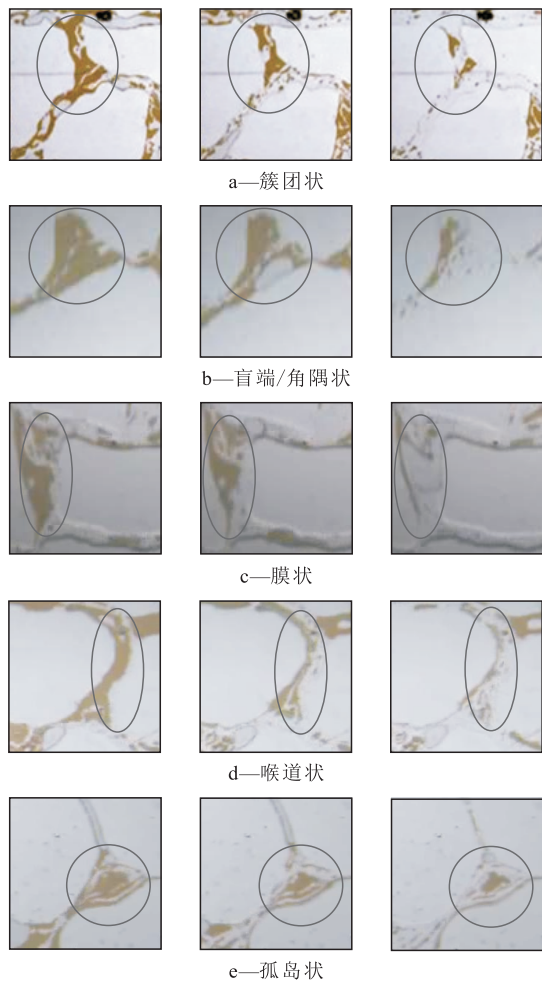
三元复合体系注入模型后,剩余油的变化及运移过程如图2所示。

**簇团状剩余油** 三元复合体系可不断沿其表

表1 微观模型驱油三元复合体系组成

Table 1 ASP compound system for oil displacement of microscopic model

复合体系	HABS质量分数, %	NaOH质量分数, %	HPAM质量分数, %	界面张力/(mN·m <sup>-1</sup> )	粘度/(mPa·s)
体系I	0.300	1.200	0.200	0.001	25.600
体系II	0.226	0.954	0.157	0.001	19.200
体系III	0.110	0.584	0.106	0.003	11.392
体系IV	0.060	0.197	0.049	12.800	4.352



图片由左到右依次为原始状态、中间状态和最终状态

图2 三元复合体系对5类剩余油的启动过程

Fig.2 Driving process of five kinds of remaining oil by the ASP compound system

面将簇团状剩余油剥离下来,体系的超低界面张力也可将簇团状边缘的油乳化油滴,并被后续驱替液带走,剩余的大块油未被剥离干净而孤立残余在孔道中(图2a)。

盲端/角隅状剩余油 具有粘弹性的三元复合体系沿着一侧岩石壁面剥离盲端油,同时复合体系中所含的表面活性剂可以降低界面张力,乳化边界油,最后大团聚合物变形驱替出原油(图2b)。

膜状剩余油 三元复合体系在流动过程中逐步将上层的油膜乳化油滴并将其剥离下来,随着复合体系的进入,这一过程持续进行(图2c)。

喉道状剩余油 该类剩余油存在于两块岩石中间,三元复合体系沿着一侧岩石壁面流动,将该侧壁面上的油乳化并剥离下来,随着复合体系的进入,喉道状剩余油逐渐变成膜状剩余油,最终附着在岩石颗粒表面的油膜全部以油滴的形式被带走(图2d)。

孤岛状剩余油 该类剩余油一般是由于大块

的簇团状油未被剥离干净而孤立残余在孔道中的,三元复合体系的超低界面张力能够将其乳化小油滴,由后续进入的复合体系将其携带走(图2e)。

### 2.2.2 对各类剩余油的作用效果

4种三元复合体系中的碱、表面活性剂和聚合物含量各不相同:体系I中三者含量均最高,其界面张力达到 $10^{-3}$  mN/m数量级,体系粘度最大,驱替剂性能最好;而体系IV中三者含量均最低,油水界面张力较大,体系粘度最小,驱替剂性能最差。三元复合体系中各组分含量不同,导致4种三元复合体系对水驱后剩余油的作用效果也不同;而同一复合体系,对于2种微观模型的驱替结果差异也较大。

簇团状剩余油 由图3可以看出,2种微观模型水驱后均有大量的簇团状剩余油存在。经过4种三元复合体系分别驱替后,体系I对簇团状剩余油的作用效果最好,其将微观模型中的簇团状剩余油全部驱替掉;虽然体系IV的驱油效果不如其他3种,但也可驱替约60.33%的簇团状剩余油,说明各组分含量越高,三元复合体系越容易将原油乳化、拉长并携带,驱油效果也越好。

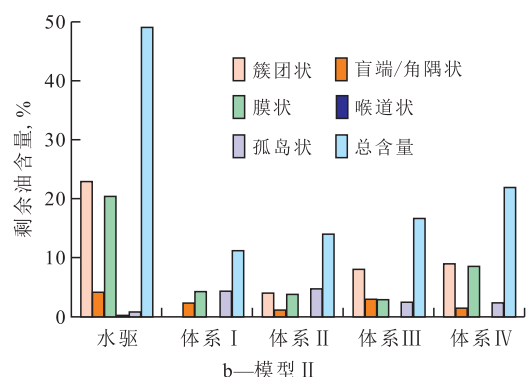
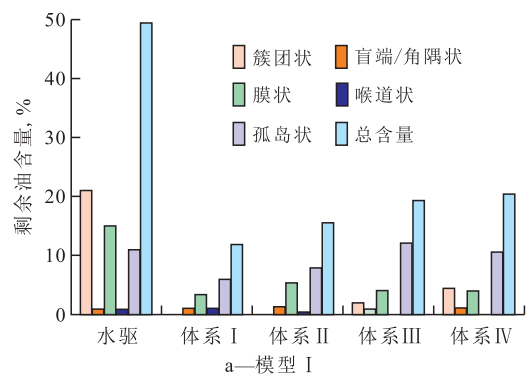


图3 三元复合体系对各类剩余油的作用效果

Fig.3 Effect of ASP compound system on all kinds of remaining oil

盲端/角隅状剩余油 水驱后,模型I中的盲端/角隅状剩余油含量较少,经4种三元复合体系分别驱替后,该类剩余油含量几乎不变,说明4种体系不能有效驱替模型I中的该类剩余油。模型II中

的盲端/角隅状剩余油含量高于模型 I 的,但经三元复合驱后,模型中的盲端/角隅状剩余油含量明显下降,说明4种体系的低界面张力及粘弹性能能够有效驱替出模型 II 中的盲端/角隅状剩余油。

**膜状剩余油** 水驱后,2种微观模型中的膜状剩余油含量均较多,但经三元复合驱后,此类剩余油含量均大幅下降,对该类型剩余油的驱油效率最低也可达57.78%,说明4种三元复合体系在流动过程中都能有效地将上层的油膜乳化成油滴,并将其剥离下来。

**喉道状剩余油** 水驱后,2种模型中的喉道状剩余油含量均较少,体系 I 及体系 II 性能较好,可将其他类型剩余油转化为喉道状剩余油。4种三元复合体系的进入能够有效地携带此类剩余油,并将其转化为膜状剩余油,使其含量下降,三元复合体系对模型 I 的喉道状剩余油驱替效果不如模型 II 是因为模型 I 喉道较窄所致。

**孤岛状剩余油** 4种体系对2种微观模型水驱后孤岛状剩余油的作用差异较大。对于模型 I,水驱后孤岛状剩余油含量较多,达10.79%,经过三元复合体系驱替后,该类剩余油含量总体来说呈下降趋势,这是由于水驱后剩余的孤岛状油滴被后续的复合体系快速驱替,而其他类型剩余油转化成的孤岛状油滴数量较少,故三元复合驱后的孤岛状剩余油含量少于其水驱后的含量。对于模型 II,水驱后模型中的孤岛状剩余油含量较少,但经过4种复合体系驱替后,该类剩余油含量大幅增加,说明在4种体系作用下,其他类型的剩余油在被驱替过程中被大量转化为孤岛状剩余油,并且驱替剂性能越好,其他类型的剩余油越易被转化为孤岛状剩余油。

### 2.3 三元复合体系驱油效果对比

由于微观实验所需的饱和油量及驱替液量较少,且驱替过程较快,微观模型孔隙中所饱和的油极易被驱替液大量驱替,为了获得较为理想的微观水驱采收率,实验过程中应严格控制驱替速度。由模型 I 和模型 II 水驱后三元复合驱的最终驱油效率(图4)可以看出:模型 I 及模型 II 的水驱驱油效率均为50%;在水驱基础上,经体系 I 至体系 IV 分别驱替后,2种微观模型的驱油效率增幅均逐渐下降,且变化规律相同,这是因为,4种体系中碱、表面活性剂及聚合物的含量均逐渐减小,体系 I 至体系 IV 的驱替性能逐渐变差,故对水驱后剩余油的作用也逐渐减弱。由图4亦可看出,虽然体系 IV 的性能最差,但其在水驱基础上的驱油效率仍可达到27.25%,说明体系 IV 也能较好地驱替水驱后剩余

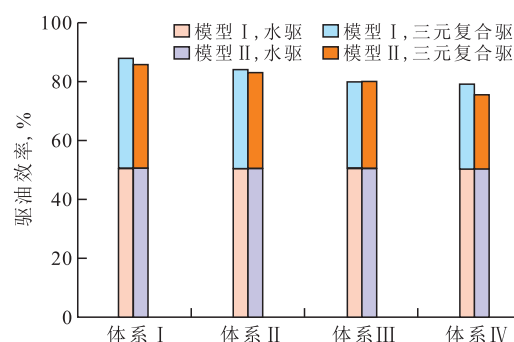


图4 不同三元复合体系下模型 I 和模型 II 驱油效率变化

Fig.4 Displacement efficiencies of model I and model II under different ASP compound systems

油;对于模型 I,体系 I 的驱油效率最高可达38.68%,最终驱油效率为88.68%。以上分析说明,体系 I 至体系 IV,虽然油水界面张力逐步增大、体系粘度逐步降低,但4种体系均可较好地乳化、剥离原油,从而进一步提高采收率。

## 3 结论

2种微观模型水驱后的剩余油主要以簇团状、膜状和孤岛状分布为主,少部分以喉道状和盲端/角隅状分布。对于2种微观模型,4种三元复合体系在水驱基础上仍可驱替至少将近60.33%的簇团状剩余油,及57.78%的膜状剩余油,三元复合体系对这两类剩余油作用效果明显。2种微观模型的最终驱油效率最高可达88.68%,4种三元复合体系的最终驱油效率均在77%以上;体系 I 的驱油效率最高,可达38.68%,体系 IV 最低,仍可达27.25%,说明4种三元复合体系对水驱后剩余油均有较好的驱油效果。

### 参考文献:

- [1] 牛丽伟,姜贵璞,卢祥国,等.三元复合体系性能及其对驱油效率影响研究[J].油田化学,2014,31(2):290-294.  
Niu Liwei, Jiang Guipu, Lu Xiangguo, et al. The performance of ASP compound system and its effect on flooding efficiency[J]. Oil-field Chemistry, 2014, 31(2): 290-294.
- [2] 李华斌.三元复合驱新进展及矿场试验[M].北京:科学出版社,2007:10-20.  
Li Huabin. New progress in ASP flooding and field test [M]. Beijing: Science Press, 2007: 10-20.
- [3] 闫文华,姚振杰,石晓博,等.三类油层弱碱三元复合体系动态驱油实验研究[J].特种油气藏,2013,20(2):102-104,114.  
Yan Wenhua, Yao Zhenjie, Shi Xiaobo, et al. Experimental study on the displacement of oil by ASP weak alkali system in class III reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(2): 102-104, 114.
- [4] 康万利,李媛,单秀华,等.三元复合驱碱/表面活性剂/聚合物模

- 拟原油乳状液稳定动力学特性[J].应用化学,2012,29(4):428-429.
- Kang Wanli, Li Yuan, Shan Xiuhua, et al. Stability dynamic characteristics of alkali/surfactant/polymer flooding crude oil emulsion [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2012, 29(4): 428-429.
- [5] 袁颖婕, 侯吉瑞, 姜康, 等. 复合体系启动水驱残余油微观实验研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2012, 25(5): 42-43.
- Yuan Yingjie, Hou Jirui, Jiang Kang, et al. Micro-model experimental study of compound system driving residual oil after water flooding [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2012, 25(5): 42-43.
- [6] 刘朝霞, 王强, 孙盈盈, 等. 聚合物驱矿场应用新技术界限研究与应用[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(2): 22-24, 31.
- Liu Zhaoxia, Wang Qiang, Sun Yingying, et al. Study and application of new technological limit for polymer flooding in field application [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(2): 22-24, 31.
- [7] 陈晓军, 涂富华, 林保树, 等. 应用微观模拟技术研究复合驱驱油特征[J]. 西北地质, 2000, 33(2): 14-21.
- Chen Xiaojun, Tu Fuhua, Lin Baoshu, et al. Research on characteristics of ASP with micro-simulation technology [J]. Northwestern Geology, 2000, 33(2): 14-21.
- [8] 刘桂玲, 孙军昌, 熊生春, 等. 高邮凹陷南断阶特低渗透油藏储层微观孔隙结构特征及分类评价[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(4): 37-41.
- Liu Guilin, Sun Junchang, Xiong Shengchun, et al. Study of the petrophysical properties and reservoir evaluation of south-fault ultra-low-permeability reservoir of Gaoyou depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(4): 37-41.
- [9] 刘卫东, 李立众, 董正新, 等. 大庆油田 ASP 复合驱油体系微观渗流机理[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23(增刊): 119-121.
- Liu Weidong, Li Lizhong, Tong Zhengxin, et al. The study of flooding mechanism of alkali/polymer/surfactant in Daqing oilfield [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23(Supplement): 119-121.
- [10] 张顺康. 水驱后剩余油分布微观实验与模拟[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2007: 27-28.
- Zhang Shunkang. The microscopic experiments and modeling for residual oil distribution after water flooding [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2007: 27-28.
- [11] 陈霆, 孙志刚. 不同化学驱油体系微观驱油机理评价方法[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(2): 87-89.
- Chen Ting, Sun Zhigang. Microscopic flooding mechanism of different chemical displacement systems [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 87-89.
- [12] 董文龙, 徐涛, 李洪生, 等. 聚合物-表面活性剂二元复合体系微观及宏观驱油特征——以河南双河油田某区块为例[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(3): 53-56.
- Dong Wenlong, Xu Tao, Li Hongsheng, et al. Polymer-surfactant compound system characteristics of microscopic and macroscopic displacement—case of Shuanghe oilfield, Henan province [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(3): 53-56.
- [13] 张明安. 二元复合体系微观驱油机理可视化实验[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(3): 79-82.
- Zhang Mingan. Experiments on visualization of the microscopic mechanism of surfactant/polymer binary compound system [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(3): 79-82.
- [14] 夏惠芬, 王德民, 刘中春. 粘弹性聚合物溶液提高微观驱油效率的机理研究[J]. 石油学报, 2001, 22(4): 60-65.
- Xia Huifen, Wang Demin, Liu Zhongchun. Study on the mechanism of polymer solution with viscoelastic behavior increasing microscopic oil displacement efficiency [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(4): 60-65.
- [15] 王春生. 黏弹性流体驱替残余油的微观机理研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011: 2-4.
- Wang Chunsheng. Microscopic mechanism of the residual oil displaced by viscoelastic fluid [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011: 2-4.
- [16] 夏惠芬, 王海峰, 王刚, 等. 聚合物/甜菜碱表面活性剂提高水驱后残余油采收率研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(6): 74-78.
- Xia Huifen, Wang Haifeng, Wang Gang, et al. Enhanced residual oil recovery by using polymer/betaine surfactant system after water flooding [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2007, 31(6): 74-78.
- [17] 阎百泉, 张树林, 施尚明, 等. 大庆油田萨北二类油层非均质特征[J]. 大庆石油学院学报, 2005, 29(1): 15-16.
- Yan Baiquan, Zhang Shulin, Shi Shangming, et al. The heterogeneities speciality of better thick oil reservoir in north Saertu of Daqing oil field [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2005, 29(1): 15-16.
- [18] 王影. 大庆长垣二类油层孔隙结构特征研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2012: 1-3.
- Wang Ying. The research of pore structure characteristics of the secondary reservoirs in Daqing placantieline [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012: 1-3.

编辑 常迎梅