

新型耐盐蠕虫状胶束体系的性能和驱油效果研究

范海明¹, 张宏涛¹, 郁登朗², 李爱山², 王 昭³, 赵 健¹, 康万利¹

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田分公司采油工艺研究院, 山东东营 257000;
3. 中国石油青海油田采油一厂, 青海海西州 816400)

摘要:利用两性表面活性剂十六烷基磺基甜菜碱(HDAPS)、阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)和助剂在高盐条件下制备两种蠕虫状胶束体系,即 HDAPS-SDS 体系和 HDAPS-SDS-0.2% 助剂混合体系,研究体系的黏弹性能、降低油水界面张力性能和驱油效果。结果表明,质量分数为 0.73% 的 HDAPS-SDS 体系所形成的蠕虫状胶束在 60 ℃ 时黏度为 42.3 mPa·s,与原油界面张力最低值为 6.0×10^{-2} mN·m⁻¹;加入 0.2% 助剂后,0.73% HDAPS-SDS 体系的黏度提高到 51 mPa·s,并可与原油达到 6.7×10^{-3} mN·m⁻¹ 的超低界面张力;两种新型蠕虫状胶束具有流度控制和降低油水界面张力的双重作用,具有较好的驱油效果。

关键词:蠕虫状胶束;耐盐;黏弹性;油水界面张力;驱油效果

中图分类号:TE 357.46

文献标志码:A

Properties and oil displacement efficiency of new type salt tolerance wormlike micelles

FAN Hai-ming¹, ZHANG Hong-tao¹, YU Deng-lang², LI Ai-shan²,
WANG Zhao³, ZHAO Jian¹, KANG Wan-li¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Research Institute of Oil Production Technology, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257000, China;

3. First Oil Production Plant in Qinghai Oilfield, PetroChina, Haixizhou 816400, China)

Abstract: Two types of wormlike micelles systems were prepared using zwitterionic (*N*-hexadecyl-*N,N*-dimethyl-3-ammonio-1-propane sulfonate, HDAPS), anionic (sodium dodecyl sulfate, SDS) surfactants, and chemical additive at high salinity simulated water, which are HDAPS-SDS system and HDAPS-SDS with 0.2% auxiliary chemical mixed system, respectively. And the viscoelasticity, properties of reducing oil/water interfacial tension, as well as the oil displacement efficiency of the wormlike micelles were investigated. It is found that the viscosity of 0.73% mass fraction HDAPS-SDS system is 42.3 mPa·s at 60 ℃, and the minimum dynamic interfacial tension between crude oil and water is 6.0×10^{-2} mN·m⁻¹. By adding 0.2% chemical additive, the viscosity of 0.73% HDAPS-SDS is increased to 51 mPa·s, and the oil/water interfacial tension is reduced to ultralow level of 6.7×10^{-3} mN·m⁻¹. Due to the dual functions of mobility control and reducing the oil/water interfacial tension, the two new wormlike micelles present good oil displacement efficiency as flooding systems.

Key words: wormlike micelle; salt tolerance; viscoelasticity; oil/water interfacial tension; oil displacement efficiency

化学驱提高原油采收率技术是我国油田进一步提高采收率的主要措施之一^[1]。三元复合驱技术综合发挥聚合物、表面活性剂和碱的协同效应,通过聚合物增加水相黏度以改善水油流度比,通过表面

活性剂和碱降低油水界面张力以减小毛细管阻力效应,从而提高驱油体系的波及系数和洗油效率,可在水驱基础上提高原油采收率 20% 以上^[2-4]。在高矿化度尤其是高质量浓度 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 存在时,常用驱

收稿日期:2013-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(21273286,51104169);中央高校基本科研业务费专项(13CX02045A);长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1294);山东省“泰山学者”建设工程项目(20070704);霍英东教育基金基础性研究课题(141047)

作者简介:范海明(1982-),男,副教授,博士,从事油田化学教学和科研工作。E-mail: haimingfan@gmail.com。

油剂聚丙烯酰胺和石油磺酸盐的增黏效果和降低油水界面张力性能显著变差^[5-9],碱的加入会与岩石和地层水中的高价金属离子反应引起管道结垢并对油层溶蚀从而破坏油藏^[10]。由此科研人员研制出新型梳形、疏水缔合型聚合物^[11-14]和两性、Gemini 型表面活性剂^[15-20]作为高矿化度油藏化学驱油剂,并在无碱条件下复配作为复合驱油体系,同时开展新型化学驱油体系的开发工作。其中,利用表面活性剂分子在一定条件下形成具有黏弹性能的蠕虫状胶束体系应用于提高采收率技术受到重视^[21-24]。研究发现,由两性/阴离子表面活性剂形成的蠕虫状胶束具有优异的耐 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 性能^[25]。笔者在高矿化度和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 高质量浓度下,利用两性表面活性剂、阴离子型表面活性剂以及助剂获得两种蠕虫状胶束体系,在 60 ℃ 下研究体系的黏弹性能和降低油水界面张力性能,并对体系的驱油性能进行评价,探索利用两性/阴离子表面活性剂形成耐盐蠕虫状胶束体系的性能和驱油效果。

1 实验

1.1 实验材料

十六烷基磺基甜菜碱(HDAPS,纯度>99%),百灵威化学试剂有限公司;十二烷基硫酸钠(SDS,分析纯)、氯化钠、氯化钙和六水氯化镁等,国药集团化学试剂有限公司。助剂由山东泰和水处理有限公司提供。实验用岩心为人造均质岩心,由环氧树脂与石英砂胶结而成,尺寸 $\Phi 2.5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$,水测渗透率分别为 83×10^{-3} 、 142×10^{-3} 、 192×10^{-3} 、 $211 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。实验用水为室内根据渤海油田地层水中矿物组成利用氯化钠、氯化钙和氯化镁配制的模拟矿化水,总矿化度为 10 550 mg/L,其中 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的质量浓度分别为 3 145.3、576.58、240 mg/L。实验用油为中海油渤海油田脱水原油。

1.2 实验方法

1.2.1 样品的制备

称取所需量的 SDS 和 HDAPS,保持 SDS 的摩尔比例为 0.25,加入含有和不含有质量分数为 0.2% 助剂的模拟矿化水,配制不同质量浓度的表面活性剂溶液。使用德国 IKA-WATERKE 搅拌机在 150 r/min 下搅拌一定时间混合均匀,放置 60 min 以上,即可获得 HDAPS-SDS 体系、HDAPS-SDS-0.2% 助剂混合体系,放置于 60 ℃ 的恒温水浴中备用。

1.2.2 流变学性质的测定

样品的流变学性质测定在温控的 Physica

MCR301 流变仪(Anton Paar, Graz))上进行,使用锥板测量系统,下部圆板直径为 49.959 mm,锥和板的倾角为 1°,间距为 0.047 mm,测试温度为 60 ℃,并采用防挥发盖防止溶剂挥发。通过剪切速率从 0.001 到 100 s^{-1} 变化测定样品的黏度。通过应力扫描实验测定样品弹性模量 G' 和黏性模量 G'' 随剪切应力的变化,确定样品的 G' 和 G'' 不受剪切应力影响线性黏弹性区域,并在线性黏弹性区域内,频率从 0.03 到 80 rad/s 变化,测定样品 G' 和 G'' 随频率的变化。

1.2.3 界面张力的测定

油水界面张力采用美国 Texas-500C 型旋转界面张力仪测定,测试温度均为 60 ℃。

1.2.4 驱油效果的评价

蠕虫状胶束体系的驱油效果采用 DHZ-50-180 型化学驱动态模拟装置评价。在恒温 60 ℃ 下水驱至出口端含水 98%,计算水驱采收率;再注入 0.6 V_p (V_p 为孔隙体积)的蠕虫状胶束段塞,后续水驱至出口端含水 98%,计算最终采收率。

2 结果分析

2.1 HDAPS-SDS 体系的流变性能

在 60 ℃ 的高矿化度和高 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的模拟矿化水中,HDAPS-SDS 体系(表面活性剂质量分数 w_s)和 HDAPS-SDS-0.2% 的助剂混合体系(助剂质量分数 w_a)的剪切黏度和剪切速率的关系见图 1。可以看出,0.37% HDAPS-SDS 体系的黏度为 3 mPa·s,几乎不随剪切速率变化,表现出牛顿流体的特征,0.55% HDAPS-SDS 体系在低剪切速率下黏度几乎不随剪切速率变化,外推可以得到体系的零剪切黏度;继续增加剪切速率,体系的黏度将随着剪切速率的增大而降低。也就是说,体系在低剪切速率下表现为牛顿流体,但在高剪切速率下表现出剪切变稀的性质。这种牛顿流体-剪切稀释的流变行为是溶液中形成蠕虫状胶束的特征表现之一^[26]。

当质量分数超过 0.55% 后,HDAPS-SDS 体系的零剪切黏度迅速增加,且剪切稀释现象更明显,说明蠕虫状胶束的长度继续增加,柔性更强,并相互缠结形成空间网络结构,溶液也更加黏稠。而且,当剪切速率超过某一临界值后,网络结构将在剪切作用下发生定向排列,且随着剪切速率的增大定向排列程度增加,使体系黏度降低^[27]。加入 0.2% 助剂的 HDAPS-SDS 体系也表现出类似的剪切黏度随剪切速率的变化,表明体系中也形成了蠕虫状胶束。

HDAPS-SDS 体系和 HDAPS-SDS-0.2% 助剂混合体系在剪切速率为 6.0 s^{-1} 时的黏度随质量分数的变化见图 2。可以看出,加入 0.2% 助剂使

HDAPS-SDS 体系中蠕虫状胶束的黏度增加,当表面活性剂质量分数为 0.73% 时,两种体系在 6.0 s^{-1} 时的黏度分别为 42.3 和 $51\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。

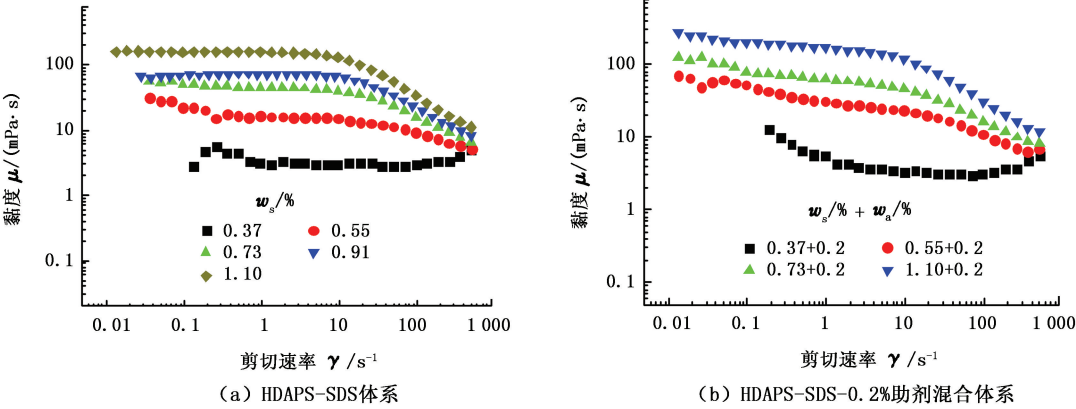


图 1 两种体系中黏度随剪切速率的变化
Fig.1 Variation of viscosity with shear rate of two systems

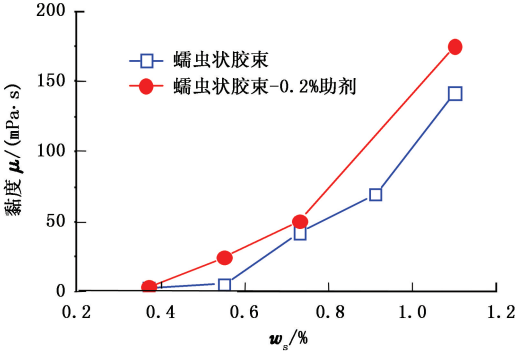


图 2 两种体系中黏度随质量分数的变化
Fig.2 Variation of viscosity with concentration

在线性黏弹性区域进行频率扫描,考察体系的弹性模量 G' 和黏性模量 G'' 随频率的变化,结果见图 3。可以看出,两种体系具有类似的动态流变特征。在所测试的区域内, G'' 均大于 G' , 体系表现为以黏

一模式 Maxwell 模型来描述,这是由于蠕虫状胶束体系是一个处于不断解离和重组的动态平衡网络结构,当胶束的断裂特征时间远小于其蠕动特征时间时,体系将呈现出具有单一特征弛豫时间的 Maxwell 流体的性质^[26]。这种规律进一步证实体系中形成了蠕虫状胶束。

从 G' 和 G'' 的数值看,加入 0.2% 助剂后体系中蠕虫状胶束的黏弹性略有增加,在 ω 为 2 rad/s 时两种体系的 G' 、 G'' 数值分别为 0.006 、 0.07 Pa 和 0.01 、 0.1 Pa ,这与黏度相近的聚丙烯酰胺溶液的模量数值接近^[28]。

由此可见,HDAPS-SDS 体系可以在高矿化度和高 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的条件下形成蠕虫状胶束,表现出与常规聚合物溶液类似的黏弹性。0.73 % HDAPS-SDS 和 0.73 % HDAPS-SDS-0.2% 助剂混合体系的黏度可以达到 42.3 和 $51\text{ mPa}\cdot\text{s}$,能够改善水油流度比,提高波及系数,适合作为高盐油藏三次采油的驱油剂。

2.2 HDAPS-SDS 体系降低油水界面张力性能

化学驱油体系提高原油采收率的另一个重要途径是减小毛细管阻力效应以提高洗油效率,这可以通过降低油水界面张力来实现。一般而言,有效驱替残留在油层孔隙中的原油需要使油水界面张力降低到超低界面张力 ($<10^{-2}\text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$)^[29]。蠕虫状胶束体系由表面活性剂分子形成,因此也具有降低油水界面张力的能力。

图 4 为 HDAPS-SDS 体系与原油的界面张力最低值 $\pi_{\min}$ 随表面活性剂质量分数的变化。从图中可

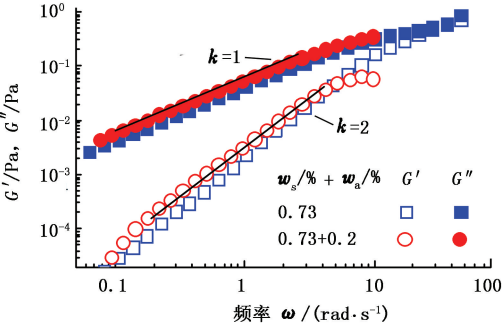


图 3 两种体系中弹性模量和黏性模量随频率的变化
Fig.3 Variation of elastic modulus and viscous modulus with oscillatory shear frequency of two systems

性为主。而且,低频率下对数坐标中 $G'-\omega$ 、 $G''-\omega$ 曲线近似为直线,斜率分别为 2 和 1,能够用经典的单

以看出,随着表面活性剂质量分数的增加,体系与原油的界面张力升高。在质量分数为 0.02% 以下时, $\pi_{\min}$ 可以达到超低界面张力;随着浓度增加, $\pi_{\min}$ 能达到 $10^{-2} \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 量级。加入 0.2% 助剂后(图 5), HDAPS-SDS 混合体系与原油的界面张力降低,仅有质量分数为 1.1% 的 $\pi_{\min}$ 为 $5.0 \times 10^{-2} \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$, 其他质量分数下体系的 $\pi_{\min}$ 均可以达到超低界面张力。因此, HDAPS-SDS 体系所形成的蠕虫状胶束体系能够有效地降低油水界面张力,如 0.73% HDAPS-SDS 体系的 $\pi_{\min}$ 为 $6.0 \times 10^{-2} \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$, 0.73% HDAPS-SDS-0.2% 助剂混合体系的 $\pi_{\min}$ 则可以达到超低界面张力 $6.7 \times 10^{-3} \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

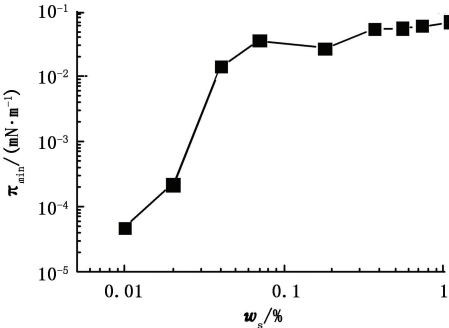


图 4 不同质量分数下 HDAPS-SDS 体系与原油的界面张力最低值 $\pi_{\min}$

Fig. 4 $\pi_{\min}$ of crude oil and HDAPS-SDS systems at different concentrations

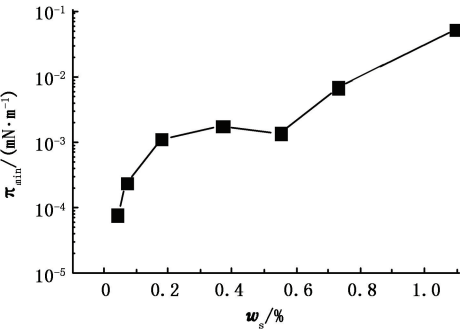


图 5 不同质量分数下 HDAPS-SDS-0.2% 助剂混合体系与原油的界面张力最低值 $\pi_{\min}$

Fig. 5 $\pi_{\min}$ of crude oil and HDAPS-SDS-0.2% additive mixed systems at different concentrations

2.3 驱油性能评价

根据实验结果,选择两个蠕虫状胶束体系,分别为与原油界面张力最低值能够达到 $6.7 \times 10^{-3} \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 超低界面张力、黏度为 $51 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的 0.73% HDAPS-SDS-0.2% 助剂混合体系,与原油界面张力最低值 $6.0 \times 10^{-2} \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 、黏度为 $42.3 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 的 0.73% HDAPS-SDS 体系进行室内驱油效果评价,

实验结果如表 1 所示。

从表 1 中看出,注入 $0.6V_p$ 的 0.73% HDAPS-SDS-0.2% 助剂混合体系对渗透率为 $83 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心可提高采收率 21.6%,而 0.73% HDAPS-SDS 体系对 $142 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的岩心可提高采收率 19.2%,低于 HDAPS-SDS 和助剂混合体系的驱油效果,这是由于助剂的加入使得 HDAPS-SDS 体系具有更低的界面张力和更高的黏度,驱油效率更高。其次,随着岩心渗透率的增加,岩心平均孔隙尺寸增加,毛细管阻力下降, $10^{-2} \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 的油水界面张力也可以启动更多的残余油滴^[30], 0.73% HDAPS-SDS 体系也可以提高采收率 20% 以上。从上述结果看出,所制备的蠕虫状胶束体系由于具有流度控制和降低油水界面张力的双重作用,可以达到由聚合物、表面活性剂和碱构成的复合体系的驱油效果。

表 1 蠕虫状胶束体系驱油效果

Table 1 Oil displacement efficiency tests for wormlike micelle systems

驱油体系	岩心渗	前期水	最终采	采收率
	透率 $k/$	驱采收	收率	提高值
	$10^{-3} \mu\text{m}^2$	率 $R_0/\%$	$R\%$	$\Delta R/\%$
0.73% HDAPS-SDS-0.2% 助剂	83	42.3	63.9	21.6
0.73% HDAPS-SDS	142	48.9	68.1	19.2
0.73% HDAPS-SDS	192	48.6	73.4	24.8
0.73% HDAPS-SDS	211	48.1	71.2	23.1

3 结 论

(1) HDAPS-SDS 体系可以在矿化度为 10550 mg/L, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 质量浓度分别为 576.58 和 240 mg/L 的条件下形成蠕虫状胶束并具有增黏效果,而且可以降低油水界面张力到 $10^{-2} \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 量级。

(2) 助剂的加入可以提高 HDAPS-SDS 体系体系中蠕虫状胶束的黏弹性,并使油水界面达到超低界面张力。

(3) 由于具有流度控制和降低油水界面张力的双重作用,所制备的蠕虫状胶束体系可以在水驱基础上达到由聚合物、表面活性剂和碱构成的复合体系的驱油效果。

参考文献:

[1] 岳湘安,王尤富,王克亮. 提高石油采收率技术基础[M]. 北京:石油工业出版社,2008:96-150.
[2] QU Zhi-jian, ZHANG Yi-gen, ZHANG Xiao-song, et al. A successful ASP flooding pilot in Gudong Oilfield[R]. SPE 39613,1998.

- [3] WANG De-min, CHENG Jie-cheng, WU Jun-zheng, et al. Summary of ASP pilots in Daqing Oilfield [R]. SPE 57288, 1999.
- [4] 程杰成, 廖广志, 杨振宇, 等. 大庆油田三元复合驱矿场试验综述[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(2): 46-49.
CHENG Jie-cheng, LIAO Guang-zhi, YANG Zhen-yu, et al. Pilot test of ASP flooding in Daqing Oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2001, 20(2): 46-49.
- [5] 康万利, 孟令伟, 牛井岗, 等. 矿化度影响 HPAM 溶液黏度机理[J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 22(5): 175-177.
KANG Wan-li, MENG Ling-wei, NIU Jing-gang, et al. Mechanism of the effect of salinity on HPAM solution viscosity [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2006, 22(5): 175-177.
- [6] 李道山, 伍星, 滕钟杰, 等. 水质对聚合物溶液流变特性的影响[J]. 石油地质与工程, 2012, 26(1): 102-104.
LI Dao-shan, WU Xing, TENG Zhong-jie, et al. Rheologic behavior of aqueous polymer solutions as influenced by water quality [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2012, 26(1): 102-104.
- [7] 王红艳. 系列化石油磺酸盐与胜利原油相互作用的研究[J]. 精细石油化工进展, 2006, 7(1): 15-17.
WANG Hong-yan. Study on interfacial tension between series of petroleum sulfonates and Shengli oil[J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2006, 7(1): 15-17.
- [8] 宋瑞国, 梁成浩, 张志军. 改性石油磺酸盐的合成与表征[J]. 精细石油化工进展, 2007, 8(6): 19-21.
SONG Rui-guo, LIANG Cheng-hao, ZHANG Zhi-jun. Synthesis and characterization of modified petroleum sulfonate [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007, 8(6): 19-21.
- [9] 陈锡荣, 黄凤兴. 驱油用耐温抗盐表面活性剂的研究进展[J]. 石油化工, 2010, 39(12): 1307-1312.
CHEN Xi-rong, HUANG Feng-xing. Research progress of temperature-resistant and salt-tolerant surfactant for enhanced oil recovery[J]. Petrochemical Technology, 2010, 39(12): 1307-1312.
- [10] 陈仕宇, 刘安芳, 孙雪娜, 等. 弱碱三元复合驱结垢分析及除防垢技术研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(s1): 97-99.
CHEN Shi-yu, LIU An-fang, SUN Xue-na, et al. Analysis of scale and research on scale control technique for weak base ASP flood[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2006, 25(s1): 97-99.
- [11] 王玉普, 罗健辉, 卜若颖, 等. 梳形 KYPAM 抗盐聚合物在油田中的应用[J]. 化工进展, 2003, 22(5): 509-511.
WANG Yu-pu, LUO Jian-hui, PU Ruo-ying, et al. KY-PAM salt-resistant comb-shape polymer application in oil-field [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2003, 22(5): 509-511.
- [12] 程杰成, 罗健辉, 李振乾, 等. 梳形抗盐聚合物的应用与研究进展[J]. 精细与专用化学品, 2004, 12(6): 10-12.
CHENG Jie-cheng, LUO Jian-hui, LI Zhen-qian, et al. Application and study progress on salt-tolerant comb-shaped polymer [J]. Fine and Specialty Chemicals, 2004, 12(6): 10-12.
- [13] 王健, 郑焰, 冯玉军, 等. 新型缔合聚合物驱油剂性能评价[J]. 油田化学, 1999, 16(2): 149-152.
WANG Jian, ZHENG Yan, FENG Yu-jun, et al. A novel associative polymer for EOR: performance properties [J]. Oilfield Chemistry, 1999, 16(2): 149-152.
- [14] 唐善法, 罗平亚. 疏水缔合水溶性聚合物的研究进展[J]. 现代化工, 2002, 22(3): 10-13.
TANG Shan-fa, LUO Ping-ya. Advances in research of hydrophobically associating water-soluble polymer [J]. Modern Chemical Industry, 2002, 22(3): 10-13.
- [15] 王业飞, 赵福麟. 非离子-阴离子型表面活性剂的耐盐性能[J]. 油田化学, 1999, 16(4): 336-340.
WANG Ye-fei, ZHAO Fu-lin. The salt tolerance of nonionic-anionic surfactants [J]. Oilfield Chemistry, 1999, 16(4): 336-340.
- [16] 唐红娇, 侯吉瑞, 赵凤兰, 等. 油田用非离子型及阴-非离子型表面活性剂的应用进展[J]. 油田化学, 2011, 28(1): 115-118.
TANG Hong-jiao, HOU Ji-rui, ZHAO Feng-lan, et al. Application progress of nonionic and anionic-nonionic surfactants used in oilfield [J]. Oilfield Chemistry, 2011, 28(1): 115-118.
- [17] 吴文祥, 殷庆国, 刘春德. 磺基甜菜碱 SB 系列复配表面活性剂界面特性研究[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(6): 67-69.
WU Wen-xiang, YIN Qing-guo, LIU Chun-de. Study on interfacial tension of the combined sulphonate betaine SB surfactant[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(6): 67-69.
- [18] 王宪中, 康万利, 孟祥灿, 等. 高盐油藏两性/阴离子表面活性剂协同获得油水超低界面张力[J]. 物理化学学报, 2012, 28(10): 2285-2290.
WANG Xian-zhong, KANG Wan-li, MENG Xiang-can, et al. Ultra-low interfacial tension in high salinity reservoir driven by synergistic interaction of zwitterionic and anionic

- surfactants [J]. Acta Phys Chim Sin, 2012, 28 (10): 2285-2290.
- [19] ZAIATOU Alain, FONSECA Claudio, BERGER Paul, et al. New surfactant for chemical flood in high-salinity reservoir [R]. SPE 80237, 2003.
- [20] CHEN Hong, HAN Li-juan, LUO Ping-ya, et al. The ultralow interfacial tensions between crude oils and gemini surfactant solutions [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 285: 872-874.
- [21] LAKATOS Istvan, TOTH Janos, BODI Tibor, et al. Application of viscoelastic surfactants as mobility-control agents in low-tension surfactant floods [R]. SPE 106005, 2007.
- [22] MORVAN Mikel, DEGRE Guillaume, LENG Jacques, et al. New viscoelastic fluid for chemical EOR [R]. SPE 121675, 2009.
- [23] 于丽, 孙焕泉, 肖建洪, 等. 油酸钠蠕虫状胶束的性质及驱油效率研究 [J]. 日用化学品工业, 2008, 38: 69-73.
- YU Li, SUN Huan-quan, XIAO Jian-hong, et al. Study of properties and flooding efficiency of wormlike micelles formed by sodium oleate [J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2008, 38: 69-73.
- [24] 于丽, 孙焕泉, 肖建洪, 等. 烷基羧酸钠的蠕虫状胶束流变性研究 [J]. 山东大学学报: 理学版, 2010, 45: 17-22.
- YU Li, SUN Huan-quan, XIAO Jian-hong, et al. Study on rheological properties of wormlike micelles formed by sodium carboxylate [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2010, 45: 17-22.
- [25] 范海明, 吴晓燕, 黄经纬, 等. 两性/阴离子表面活性剂形成具有优异耐盐性能的蠕虫状胶束 [J]. 化学学报, 2011, 69: 1997-2002.
- FAN Hai-ming, WU Xiao-yan, HUANG Jing-wei, et al. Wormlike micelle with high salt resistance property in mixed zwitterionic and anionic surfactant system [J]. Acta Chimica Sinica, 2011, 69: 1997-2002.
- [26] FAN Hai-ming, YAN Yun, LI Zi-chen, et al. General rules for the scaling behavior of linear wormlike micelles formed in cationic surfactant systems [J]. J Colloid Interface Sci, 2010, 348: 491-497.
- [27] FORSTER S, WENZ E, LINDNER P. Shear thinning and orientational ordering of wormlike micelles [J]. Phys Rev Lett, 2005, 94: 017803.
- [28] 王立军. 聚合物溶液黏弹性对提高驱油效率的作用 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2003.
- WANG Li-jun. The action that viscoelasticity of polymer solution on enhancing oil displacement efficiency [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2003.
- [29] GREEN D W, PAUL W G. Enhanced oil recovery [M]. Richardson: Society of Petroleum Engineers Richardson, 1998.
- [30] 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 Hua-bin, CHEN Zhong-hua. Characteristics of interfacial tension and oil displacement efficiency with alkaline-surfactant-polymer flooding technology [J]. Acta Petroei Sinica, 2006, 27(5): 96-98.

(编辑 刘为清)