

# 不同烷基链长的聚氧乙烯醚萘类发泡剂合成及性能研究

王洪涛<sup>1\*</sup>, 冯丽娟<sup>1</sup>, 何萌<sup>1</sup>, 张玉珍<sup>1</sup>, 郭丹<sup>1</sup>, 曾庆桥<sup>1</sup>, 杨陆涛<sup>2</sup>, 张鲁霞<sup>2</sup>

1 中国石油华北油田公司勘探开发研究院, 任丘 062552

2 南京师范大学化学与材料科学学院, 南京 210046

\* 通信作者, yjy\_wanght@petrochina.com.cn

收稿日期: 2020-03-27

中国石油天然气股份有限公司重大科技专项项目(2017E-1507)资助

**摘要** 油田开发后期, 为应对含水率大幅上升、油田地质低渗透性、非均质性等问题, 油田泡沫驱技术被开发并逐渐进入现场应用。其中高效泡沫剂是提高采收率和影响泡沫驱油技术成功的关键因素之一。为获得耐油、耐温且无色谱分离问题的高效泡沫剂, 本文以萘、浓硫酸、环氧乙烷为主要原料合成了不同烷基链长的聚氧乙烯醚萘磺酸钠, 探究了疏水碳链长度对烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠性能的影响, 并研究了产物的表面张力、乳化性能、矿化度水中的泡沫性能和室内岩心驱油性能。表面张力研究结果表明: 当疏水碳链长度为 10 时, 表面张力较大, 而当链长大于 10 时, 表面张力差异较小, 其中十四碳体系具有最低的表面张力和最小的 CMC 浓度。乳化性能结果表明: 当碳链长度大于 10 后, 化合物具有良好的乳化性能且十四碳体系乳化稳定性最好。泡沫性能测试结果表明: 十四碳体系具有最佳发泡倍率和析液半衰期, 其高温泡沫性能最好。本文在上述研究的基础上, 以十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠为目标泡沫体系, 进一步研究了该体系的抗吸附性能、耐油性能、腐蚀性以及对目标油藏原油的界面张力及岩心驱替性能, 结果表明: 十四碳体系具有良好的抗吸附和耐油性能。吸附前后, 发泡体系的泡沫性能未出现明显下降; 随着含油量的增加, 泡沫性能降低幅度较小。同时, 十四碳体系的腐蚀性能达标, 并可以有效降低目标原油的油—水界面张力。最终的室内岩心驱替实验结果显示该泡沫剂提高采收率达 21.01%, 完全满足高温油藏泡沫驱油剂的性能要求。

**关键词** 聚氧乙烯醚萘磺酸钠; 表面张力; 乳化性; 泡沫性能; 抗吸附性能; 耐油性能; 腐蚀性; 界面张力; 驱替能力

## Preparation and properties of sodium polyoxyethylene ether naphthalene sulfonate with different chain-length alkyl groups

WANG Hongtao<sup>1</sup>, Feng Lijuan<sup>1</sup>, HE Meng<sup>1</sup>, ZHANG Yuzhen<sup>1</sup>, Guo Dan<sup>1</sup>, ZENG Qingqiao<sup>1</sup>, YANG Lutao<sup>2</sup>, ZHANG Luxia<sup>2</sup>

1 Exploration and Development Research Institute, Huabei Oilfield Company, Petro China, Renqiu 062552, China

2 School of Chemistry and Materials Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

引用格式: 王洪涛, 冯丽娟, 何萌, 张玉珍, 郭丹, 曾庆桥, 杨陆涛, 张鲁霞. 不同烷基链长的聚氧乙烯醚萘类发泡剂合成及性能研究. 石油科学通报, 2020, 04: 587-596

WANG Hongtao, Feng Lijuan, HE Meng, ZHANG Yuzhen, Guo Dan, ZENG Qingqiao, YANG Lutao, ZHANG Luxia. Preparation and properties of sodium polyoxyethylene ether naphthalene sulfonate with different chain-length alkyl groups. Petroleum Science Bulletin, 2020, 04: 587-596. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.04.52

**Abstract** In the late stage of oilfield development, in order to cope with problems such as a sharp increase in water cut, low oilfield geological permeability, and heterogeneity, oilfield foam flooding technology was developed and gradually entered field applications. A high-efficiency foaming agent is one of the key factors that increases oil recovery and affects the success of foam flooding technology. This work aimed to prepare high-efficiency, oil-resistant and temperature-resistant foaming agents that can prevent chromatographic separation. We prepared a series of Polyoxyethylene Ether Naphthalene Sulfonates(PENS) by using naphthalene, concentrated sulfuric acid, and ethylene oxide with different chain-length alkyl groups. In addition, we investigated the effect of the chain length of the alkyl groups on the product properties. The surface tension of the product, emulsification performance, foam performance in saline water and laboratory core oil displacement performance are also studied. When the chain length of the linear alkyl group was ten carbons, the surface tension was relatively high; when the chain length was greater than ten carbons, the surface tension between the products was not obviously different. The product with a fourteen-carbon linear alkyl group had the lowest surface tension and the minimum critical micelle concentration. Similarly, emulsifying performance results show that when the chain length was greater than ten carbons, the products had good emulsifying properties. The product with fourteen-carbon linear alkyl group showed the best emulsion stability. The foam performance test results indicated that the fourteen-carbon system has the best foaming ratio and liquid drainage half-life, so its high-temperature foam performance is the best. Based on the above findings, we investigated the properties of polyoxyethylene ether naphthalene sulfonates with fourteen-carbon linear alkyl group (PENS-14C), including adsorption resistance, oil resistance, corrosivity, interfacial tension with the crude oil of the targeted reservoir, and the laboratory displacement ability in the cores. All the experimental results demonstrated that PENS-14C had good adsorption resistance and oil resistance. Before and after adsorption, the foam performance of the foaming system did not decrease significantly; and with an increase in oil content, the decrease of foam performance was smaller. Meanwhile, its corrosivity also reached the standard. In addition, PENS-14C effectively reduced the oil-water interfacial tension of the target crude oil. The final laboratory core flooding experiment results showed that the foaming agent can increase the recovery rate by 21.0%, which fully meets the performance requirements of high-temperature reservoir foam oil displacement agents.

**Keywords** sodium polyoxyethylene ether naphthalene sulfonate; surface tension; emulsifying; foaming property; adsorption resistance; oil resistance; corrosivity; interfacial tension; displacement ability

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.04.052

## 0 引言

气驱是针对我国现有的大量低渗透、高含水稠油油藏提高采收率的重要手段,但上述油藏因地层结构复杂,以及开采中的压裂操作等原因形成地层裂缝,导致出现气窜,驱油效率下降等亟待解决的问题<sup>[1-2]</sup>。当前,我国多数油田已进入开发中后期,储层中大孔隙油被驱尽,单纯的气驱或化学驱已无法满足上述油藏的实际需求,因此,急需采用新的驱油方式提高采收率<sup>[3]</sup>。泡沫驱是利用泡沫作为驱油剂的一种驱油方法,Holbrook和Fried最早发现泡沫对提高石油采收率的有效性<sup>[4-5]</sup>。自问世以来,泡沫驱油剂凭借其选择性封堵(堵水不堵油、堵高不堵低)的特性被广泛应用于油田调剖堵水和驱油等领域中<sup>[6]</sup>,但以华北油田西柳10(油藏温度120℃)为代表的部分油藏深入地下数千米,油藏温度高达100℃以上,其高温环境大大增加了泡沫剂发泡和稳泡难度,使得普通泡沫驱体难以在高温油藏环境下发挥作用,严重影响了泡沫驱在高温油藏中的实际应用。

针对上述问题,国内外科研人员针对温度对泡沫性能的影响及高温泡沫剂进行了长期的研究<sup>[7]</sup>,并合

成了如 $\alpha$ -烯烴磺酸盐、烷基苯磺酸盐等一系列高温发泡剂<sup>[8]</sup>。然而,上述石油磺酸盐类发泡剂虽具有良好的高温发泡效果,但泡沫半衰期短,稳泡效果不佳。而与石油磺酸盐类发泡剂相配伍的常规非离子型稳泡剂却大多存在高温稳定性差的缺陷,导致所形成的高温泡沫难以稳定,制约了这些泡沫驱油剂在高温油藏中的实际应用。对此,人们也采用聚合物或纳米颗粒提高泡沫剂的稳泡性能,但上述材料的选择及对油田渗透率的影响还需慎重对待<sup>[9]</sup>。同时,上述以发泡剂和稳泡剂等复配形成的复合驱油剂在地层中长距离运移时产生的色谱分离,使其协同作用难以发挥,也严重影响了泡沫驱油剂使用效率。此外,多数泡沫驱油剂还同时存在抗油性能不足、遇油消泡的问题。因此,为满足高温、低渗油藏驱油需要,设计一种耐温、耐油,注入地层后,无色谱分离现象,并具有优异的发泡、稳泡效果的泡沫剂,对油田领域泡沫驱油剂的发展具有十分重要的意义。

通过合理的分子设计,将泡沫驱与表面活性剂分子特征相结合,制备出同时具有良好的高温发泡、稳泡性能及优异的乳化性能的泡沫剂分子,就可同时实现耐温、耐油效果<sup>[10-11]</sup>,并且可以有效避免不同分子

复配引起的色谱分离现象的发生,从而显著地提高高温油藏的原油采收率。

本文以萘、浓硫酸、环氧乙烷、1-烯烃、氢氧化钠为原料,制备出一系列不同烷基链长的聚氧乙烯醚萘磺酸钠,并对其分子结构、表面张力、乳化性能及在不同温度条件下的泡沫性能进行了测试。最终确定烷基链长为14的十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠为首选发泡剂。本文在上述研究的基础上,进一步对十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠泡沫体系的抗石英砂吸附性能、耐油性能、腐蚀性以及对目标油藏西柳10原油的界面张力和岩心驱替性能进行了评价。

## 1 实验部分

### 1.1 材料与仪器

1-烯烃(碳链长度分别为10、12、14、16、18), AR, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 浓硫酸、氢氧化钠, AR, 国药集团化学试剂有限公司; 精萘 $\geq 99.5\%$ , 上海宝钢化工有限公司; 环氧乙烷, AR, 青岛宇燕特种气体有限公司。

DU-3GW型恒温磁力搅拌水浴锅, 上海一恒科学仪器有限公司; PHS-2F型PH计, 上海仪电科学仪器股份有限公司; OS20-Pro型顶置式电子搅拌器, 深圳市康初源有限公司; BZY-1型全自动表面张力仪, 上海平轩科学仪器有限公司; Nexus670红外光谱仪, 美国Nicolet公司。

### 1.2 不同烷基链长的聚氧乙烯醚萘磺酸钠的合成

在反应器中加入一定量的萘及浓硫酸, 升温至150~170 $^{\circ}\text{C}$ , 边搅拌边通入环氧乙烷, 反应2~4 h, 得到聚氧乙烯醚萘磺酸; 然后反应降温至95~120 $^{\circ}\text{C}$ , 加入1-烯烃(碳链长度分别为10、12、14、16、18), 继续反应2~3 h, 得到聚氧乙烯醚萘磺酸; 加入NaOH调节pH值至弱碱性, 得到聚氧乙烯醚萘磺酸钠。

实验所得到的聚氧乙烯醚萘磺酸钠合成路线如图1所示。

### 1.3 目标油藏矿化水体系配置

为了考察新型发泡剂聚氧乙烯醚萘磺酸钠在目标油藏条件下的驱替性能, 本实验根据目标油藏(西柳10)的特点, 模拟配置了10 000 ppm的矿化水进行实验。具体配方如下:  $\text{CaCl}_2$  0.044 g/L $^{-1}$ ,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.058 g/L $^{-1}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0.03 g/L $^{-1}$ ,  $\text{NaHCO}_3$  2.58 g/L $^{-1}$ ,  $\text{NaCl}$  0.85 g/L $^{-1}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  0.187 g/L $^{-1}$ 。

### 1.4 反应产物的红外光谱表征

合成产物与KBr研磨压片, 红外光谱仪进行结构表征。

### 1.5 表面张力测试

室温(25 $^{\circ}\text{C}$ )下, 去离子水配制质量浓度为0.08~0.5 g/L的聚氧乙烯醚萘磺酸钠溶液, 测定不同浓度下的表面张力, 测3次, 取平均值。

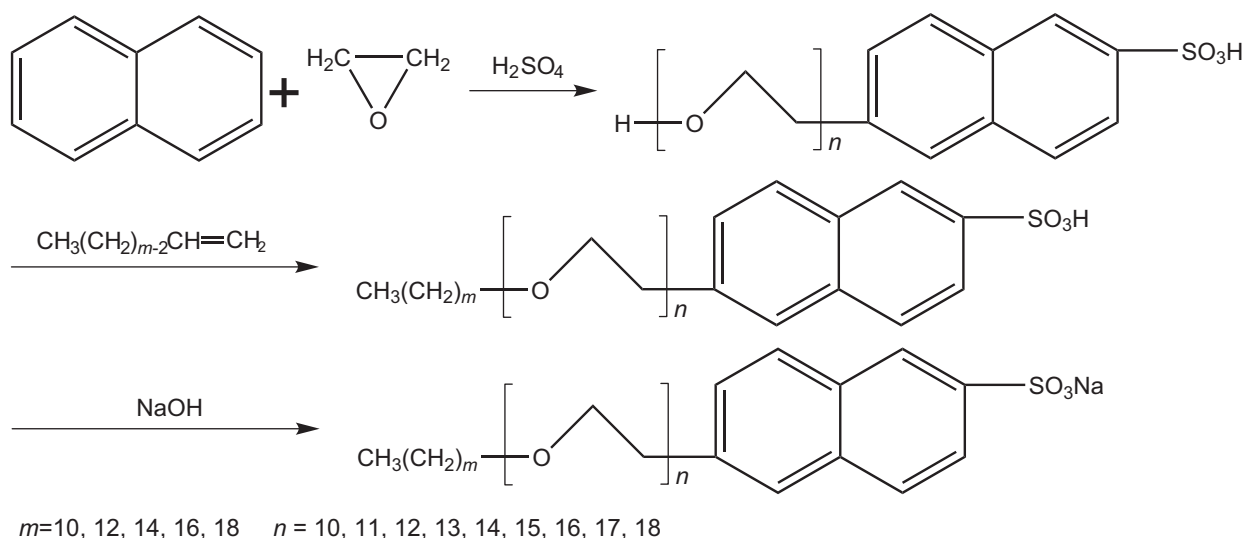


图1 聚氧乙烯醚萘磺酸钠合成路线图

Fig. 1 Synthetic route of polyoxyethylene ether sodium naphthalene sulfonate

## 1.6 乳化性能测试

以分水时间法进行乳化性能测试<sup>[12]</sup>。在不同温度下(50, 60, 70, 80, 90 °C), 取 50 mL 的带塞比色管<sup>[13]</sup>与不同碳链长的聚氧乙烯醚萘磺酸钠溶液(0.3wt%)与白油按 25 mL:25 mL 的体积比装入比色管, 振动 30 s, 记录分离出 5 mL 水的时间, 测 3 次, 取平均值。

## 1.7 泡沫性能表征

以 Waring Blender 搅拌法评价发泡性能和稳泡性能<sup>[14]</sup>。设定温度下水浴保温, 加入 200 mL 0.3wt% 的不同碳链长的表面活性剂溶液, 搅拌 1 min(7000 rpm), 记录发泡倍率和析液半衰期。

## 1.8 抗吸附性能表征

在 500 mL 胶塞小口瓶中放入 33.33 g 石英砂, 加入 100 g 不同浓度的十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠作为发泡剂(浓度为 0.1wt%、0.2wt%、0.3wt%、0.4wt%、0.5wt%), 70 °C 下按照 Q/SH0269-2009 中石化企标操作, 测试发泡倍率和析液半衰期。

## 1.9 耐油性表征

依照中石化企标(Q/SY 1816-2015)进行测试。70 °C 下测定不同比例的油溶液(原油:煤油 = 1:2)与 0.3wt% 十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠混合溶液的发泡倍率和析液半衰期。

## 1.10 腐蚀性表征

参照 SY/T 5273-2000 失重评价和 ISO 8407-2009 腐蚀产物的清除、清洗标准进行测试。将型号为 N80 试片, 浸入浓度为 0.3wt% 的十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠溶液中, 测试不同时间下的失重率。

## 1.11 界面张力表征

使用旋转液滴界面张力仪(TX-500C), 80 °C 和 5000 rpm 条件下, 测定西柳 10 原油与 0.3wt% 十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠溶液的界面张力。

## 1.12 驱替实验

驱替测试条件为模拟目标油藏西柳 10 油藏条件 120 °C, 5 MPa; 测试原油为西柳 10 原油; 测试泡沫剂为十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠。

地层模拟离子水配制 0.3wt% 发泡液, 备用; 对岩芯抽真空饱和水, 测量岩心水相渗透率; 然后岩心

饱和油; 先用水模拟二采水驱至采出液的含水率大于 98%; 再以一定气液比注入气体和发泡液(气液混注)进行泡沫驱, 模拟三次采油泡沫驱, 注入 0.5 PV 后停止注入; 进而以地层离子水模拟后水驱, 注入量 2 个 PV 或采出液含水率大于 98% 后停止注入; 测试各个时间点的采出液的水量、油量、压力。

## 2 结果与讨论

### 2.1 产物结构的红外鉴定

由于不同烷基链长的聚氧乙烯醚萘磺酸钠的基本官能团结构以及红外谱图极为相似, 因此本文仅选择十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠进行介绍。图 2 是十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠的红外光谱图, 由图 1 可见, 在 2900、2850  $\text{cm}^{-1}$  附近出现的尖锐吸收峰为  $\text{CH}_3$ 、 $-\text{CH}_2-$  中  $\text{C}-\text{H}$  键伸缩振动峰, 1500  $\text{cm}^{-1}$  处为芳环  $\text{C}=\text{C}$  吸收峰; 1350、1250、1100  $\text{cm}^{-1}$  附近出现  $-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$  醚键吸收峰, 此为长链烷基聚氧乙烯醚的特征吸收峰; 940  $\text{cm}^{-1}$  处为芳环  $\text{C}-\text{H}$  面内弯曲振动峰; 810  $\text{cm}^{-1}$  处出现了  $\text{C}-\text{H}$  面外弯曲振动吸收峰; 680  $\text{cm}^{-1}$  处为  $-\text{S}-\text{O}$  吸收峰, 与目标产物的结构相同, 可初步断定成功合成聚氧乙烯醚萘磺酸钠。

### 2.2 表面改性效果

表 1 为 25 °C 下十、十二、十四、十六、十八烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠的表面张力及 CMC 浓度。表面张力和临界胶束浓度(CMC)是表面活性剂的重要

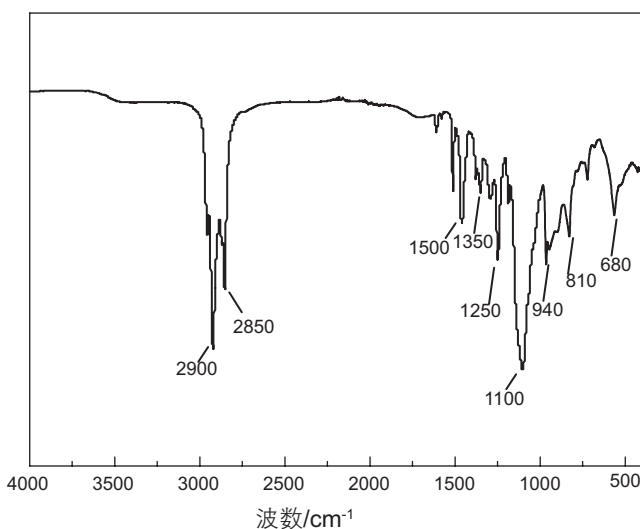


图 2 十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠红外光谱图  
Fig. 2 The FT-IR spectrum of PENS-14C



性能参数,表面张力数值越低,说明表面活性剂改性效果越好,越有利于形成泡沫体系。而CMC的浓度越低,则表明改性剂的有效使用浓度越低<sup>[15]</sup>。由表1可知,当烷基链长为10时,体系的表面张力较大,达到 $45.3 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ ;而当烷基链长大于10后,其表面张力迅速下降至 $32.4\sim 33.9 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。其中,十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠溶液的表面张力值最低,为 $32.4 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,且该链长的 $C_{\text{CMC}}$ 小于其他链长,为最小值 $0.9 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,说明当聚氧乙烯醚萘磺酸钠链长为十四时,面张力和临界胶束浓度值最低,表面活性剂该性效果最好,最容易形成泡沫体系,且改性剂的有效使用浓度最低,使用效果与经济效益最高。

### 2.3 乳化性能

图3为油水体系中十、十二、十四、十六、十八烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠溶液随温度增加的分水时间。对于油田领域的泡沫驱技术来说,所用的泡沫剂不仅需要利用泡沫的封堵调剖作用提高采收率,同时也要利用泡沫剂的乳化作用发挥其类似于化学驱的洗油效

果,此外良好的乳化效果也可以提升泡沫剂的耐油性,因此泡沫驱油剂的乳化性能是评价泡沫剂性能的重要指标之一<sup>[16]</sup>。油水体系中,十、十二、十四、十六、十八烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠溶液随温度升高的分水时间如图3所示。由图3可以看出,十碳体系水溶液分水的时间较其他烷基链长体系时间明显缩短,这是由于该体系疏水链长度短,油水界面张力高,导致乳化稳性能差。而十二~十八碳体系的分水时间比十碳体系明显增加,且相互间数据差异较小,说明它们均具有很好的乳化稳定性。由图3可知,当疏水链长度增加到一定链长后,表面活性剂亲油结构与油滴的相互作用力增强,使油水界面张力下降,乳化体系趋于稳定;此外,分子中的醚基具有较好的助溶作用,更有利于形成稳定的乳化体系<sup>[17-18]</sup>。

### 2.4 泡沫性能

图4为不同温度时0.3wt%的不同碳链长的烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠泡沫体系的发泡性能结果。由图4可知,十四碳的泡沫体系效果最好;十碳的泡沫体系

表1 不同烷基链长聚氧乙烯醚萘磺酸钠表面活性剂的 $C_{\text{CMC}}$ 和表面张力

Table 1  $C_{\text{CMC}}$  and the surface intension of PENS with different linear alkyl groups

表面活性剂	$C_{\text{CMC}}/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	表面张力 $/( \text{mN}\cdot\text{m}^{-1} )$
十烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠	1.5	45.3
十二烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠	1.3	33.9
十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠	0.9	32.4
十六烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠	1.0	33.5
十八烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠	1.1	32.8

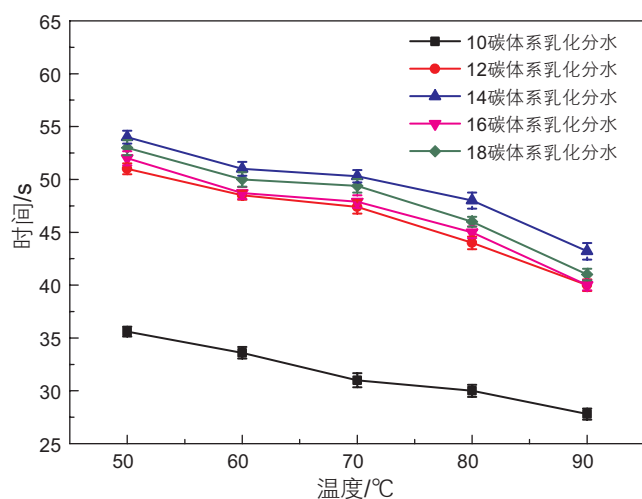


图3 不同烷基链长聚氧乙烯醚萘磺酸钠乳化分水时间

Fig. 3 The emulsifying and water-separating time of PENS with different linear alkyl groups

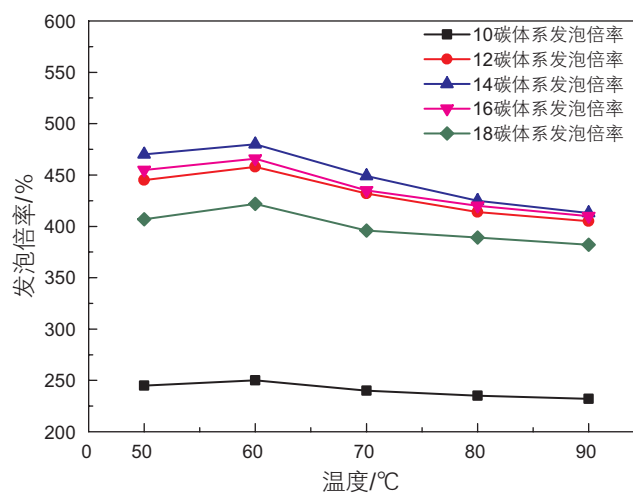


图4 不同烷基链长聚氧乙烯醚萘磺酸钠发泡倍率随温度的变化曲线

Fig. 4 The curves of the foaming ratio vs. the temperature of PENS with different linear alkyl groups

其表面张力较高导致其发泡性能最差；十八碳的泡沫体系发泡性能较差，这是由于其较长的碳链增大了分子的疏水性，降低了表面活性剂分子在溶液中的浓度，无法充分的在气—液界面形成紧密排列的定向吸附的吸附膜所致<sup>[9]</sup>。

图5为不同烷基链长聚氧乙烯醚萘磺酸钠析液半衰期随温度的变化曲线。由图5可知，随着温度升高，析液半衰期时间减少，十四碳体系的析液半衰期时间最长，稳定性最好，在90℃时，析液半衰期依然超过400s。

图6为不同烷基链长聚氧乙烯醚萘磺酸钠泡沫半衰期随温度的变化曲线。由图6可知，随着温度升高，泡沫半衰期时间减少，十四碳体系的泡沫半衰期时间最长，在90℃时，泡沫半衰期依然在2h以上，具有较好的高温泡沫稳定性。

上述泡沫性能测试结果表明，十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠具有最佳发泡性能，可作为高温发泡剂的备选，因此在后续的泡沫驱性能评价实验中，我们选择十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠作为发泡剂，制备高温泡沫驱油体系，并对该泡沫体系的抗吸附性能、耐油性、腐蚀性、界面张力和驱替效果进行了评价。

## 2.5 抗吸附性能

岩层对化学剂的吸附损失，是影响化学剂驱油效率的重要因素之一，性能良好的化学剂必须具有较强的抗岩层吸附能力。因此，化学驱油剂在实际应用前常常需要进行吸附性能评价。

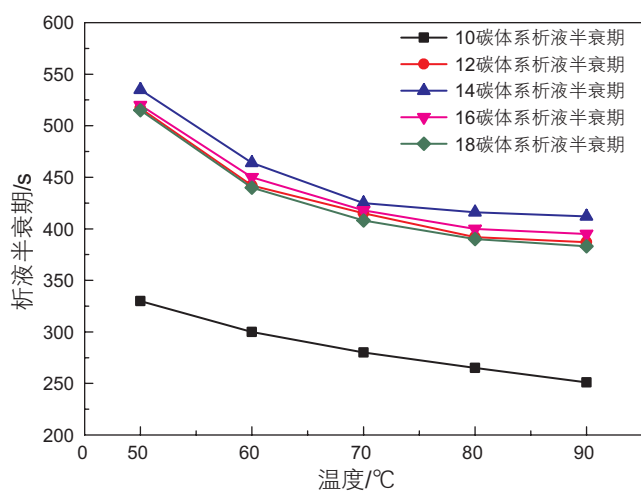


图5 不同烷基链长聚氧乙烯醚萘磺酸钠析液半衰期随温度的变化曲线

Fig. 5 The curves of the drainage half-life vs. the temperature of PENS with different linear alkyl groups

图7和图8分别为按照“中石油企标(Q/SY 1816-2015)”进行的石英砂吸附实验的发泡性能和析液半衰期测试结果。由上图可以看出，不同浓度的十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠泡沫体系在石英砂吸附前后其发泡倍率和析液半衰期下降很少，上述实验结果表明，十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠泡沫体系具有良好的抗吸附能力。

## 2.6 耐油性

多数泡沫体系遇油易消泡，导致泡沫体系不稳定和发泡倍率明显下降甚至无法发泡，因此泡沫驱油体系在低含油率条件下的耐油性能是衡量泡沫驱油剂性能的重要标准之一，良好的泡沫去油剂在低含油率条件下，需要具备较高的耐油性能。

图9和图10分别为按照“中石油企标(Q/SY 1816-2015)”进行的不同含油率条件下泡沫剂发泡倍率和析液半衰期测试结果，由图中可以看出，当十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠含量为0.3%时，在含油率不大于10%的条件下，泡沫体系的发泡倍率和析液半衰期下降很少。上述实验结果表明，十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠泡沫体系具有良好的耐油能力。

## 2.7 抗腐蚀性

多数化学剂均具有一定的腐蚀性，而高腐蚀性的化学剂会造成采油设备的损毁，导致巨大的经济损失，因此，化学剂的腐蚀性是决定该化学剂能否应用于油田领域的关键指标。

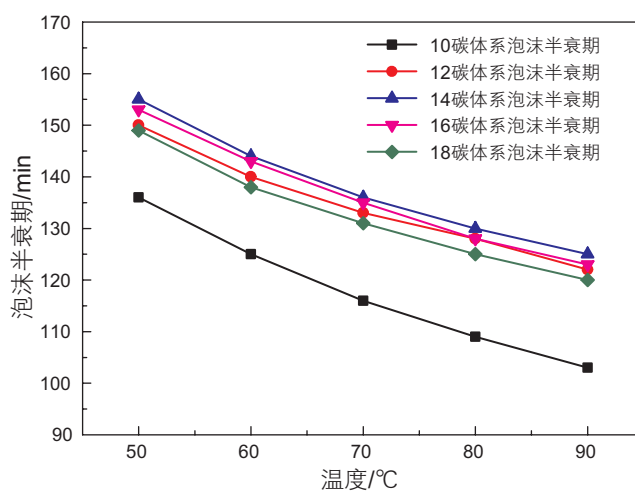


图6 不同烷基链长聚氧乙烯醚萘磺酸钠泡沫半衰期随温度的变化曲线

Fig. 6 The curves of the foaming half-life vs. the temperature of PENS with different linear alkyl groups

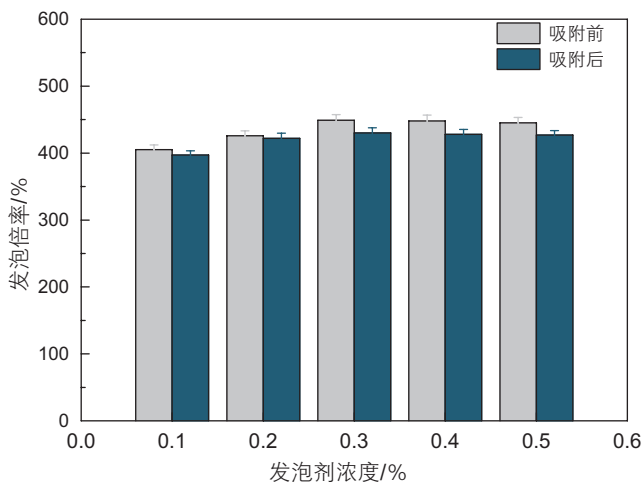


图 7 石英砂吸附对十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠发泡性能的影响

Fig. 7 The effect of quartz sand adsorption on the foaming property of PENS-14C

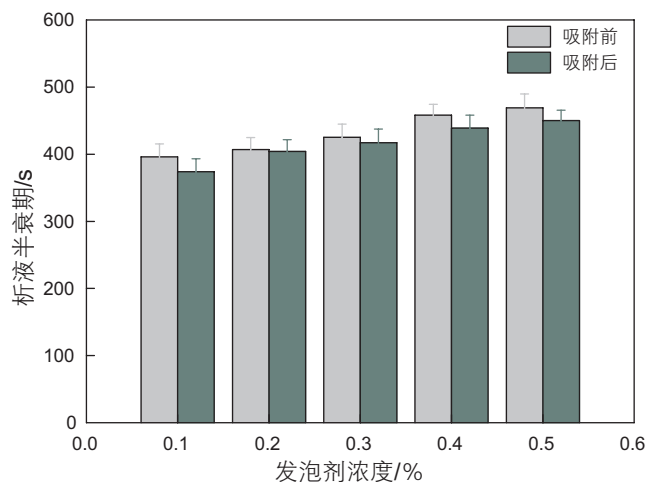


图 8 石英砂吸附对十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠析液半衰期的影响

Fig. 8 The effect of quartz sand adsorption on the durable half-life of PENS-14C foam

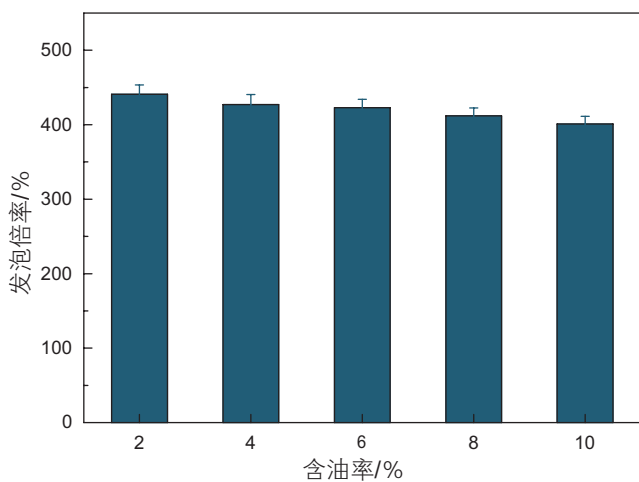


图 9 含油率对十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠发泡性能的影响

Fig. 9 The effect of the oil concentration on the foaming property of PENS-14C

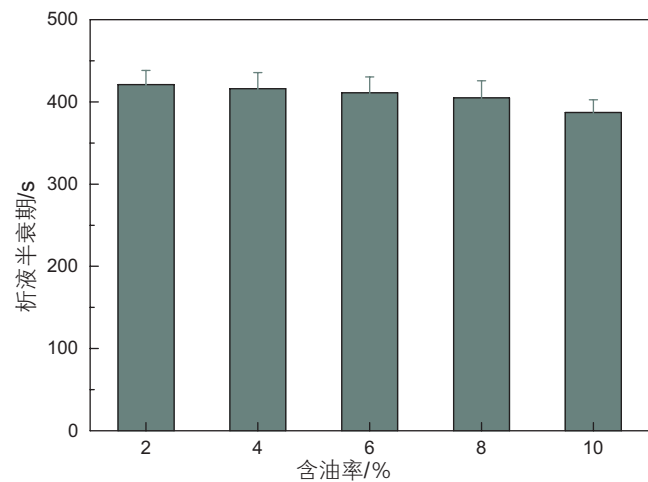


图 10 含油率对十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠析液半衰期的影响

Fig. 10 The effect of the oil concentration on the durable half-life of PENS-14C foam

图 11 为测试试片的失重曲线，其腐蚀速率计算公式如下：

腐蚀速率计算式：

$$r_{\text{corr}} = \frac{8.76 \times 10^4 \times (m_0 - m_1)}{S \times t \times \rho} \quad (1)$$

表面积计算式：

$$S = (L \cdot a + a \cdot b + L \cdot b) \cdot 2 - 2 \cdot \pi \cdot r + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot b \quad (2)$$

式中： $r_{\text{corr}}$ 为腐蚀速率，mm/a； $m_0$ 和 $m_1$ 分别为试验前后挂片质量，g； $\rho$ 为挂片密度，g/cm<sup>3</sup>； $S$ 为挂片表面积，cm<sup>2</sup>； $t$ 为试验时间，h。

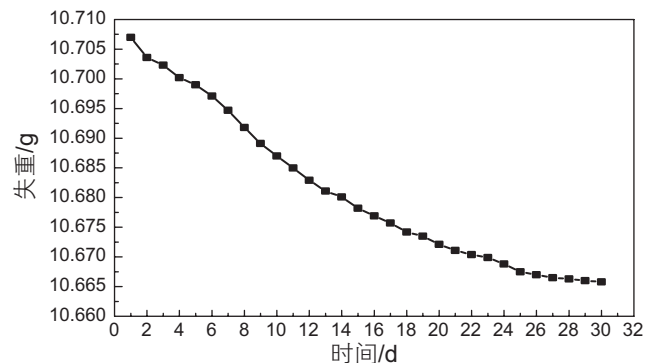


图 11 试片随腐蚀时间的失重曲线

Fig. 11 The weightloss of the test slice at different times

本实验实测的 $L$ : 5 cm,  $a$ : 0.95 cm,  $b$ : 0.295 cm, 圆孔半径 $r$ : 0.295 cm,  $S=13.0105 \text{ cm}^2$ , 密度 $\rho$ 为:  $7.85 \text{ g/cm}^3$ 。

由上式计算得十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠泡沫体系的 $r_{\text{corr}}=0.04908 \text{ mm/a}$ 小于行业标准值  $0.076 \text{ mm/a}$ , 上述实验结果表明十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠泡沫体系虽然具有一定的腐蚀性, 但腐蚀性能满足驱油剂的行业标准使用要求。

## 2.8 界面张力

界面张力是油田驱油过程中, 表面活性剂分子、油分子和水分子之间的相互作用的表现, 低界面张力更有利于提高采收率, 因此界面张力是表征驱油剂性能的重要指标。而悬液法是油田化学中测定界面张力最经典的方法。

通过悬液法, 测试得泡沫剂对目标油藏西柳 10 原油的界面张力测试结果为  $0.074 \text{ mN/m}$ , 满足驱油剂对目标原油界面张力小于  $0.1 \text{ mN/m}$  的要求。上述实验结

果说明, 该泡沫体系同时满足化学驱油剂的界面张力要求。因此十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠除实现泡沫驱油功能外, 可能还同时具有较好的化学驱油效果, 对于驱油效率提升更加明显。

## 2.9 驱替性能

驱替实验是实验室最直观准确的测试驱油剂驱油效果的方法, 因此我们对上述泡沫剂分别进行了单管驱替和双管驱替测试, 以确定其驱油效果。

图 12 为十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠单管驱替测试曲线, 表 2 为单管驱替实验岩芯参数及提高采收率数值(实验条件:  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $5 \text{ MPa}$ ,  $36.67 \text{ mD}$ )。由图 12 及表 2 可以看出, 单管驱替的水驱采收率为  $43.9\%$ ; 水驱后进行泡沫驱, 泡沫注入后, 含水率明显降低, 随着注入体积的增加, 采收率继续增加, 泡沫驱采收率  $8.05\%$ , 这是因为表活剂分子在油水界面吸附降低了油水界面张力; 泡沫驱  $0.5 \text{ PV}$  后进行后水

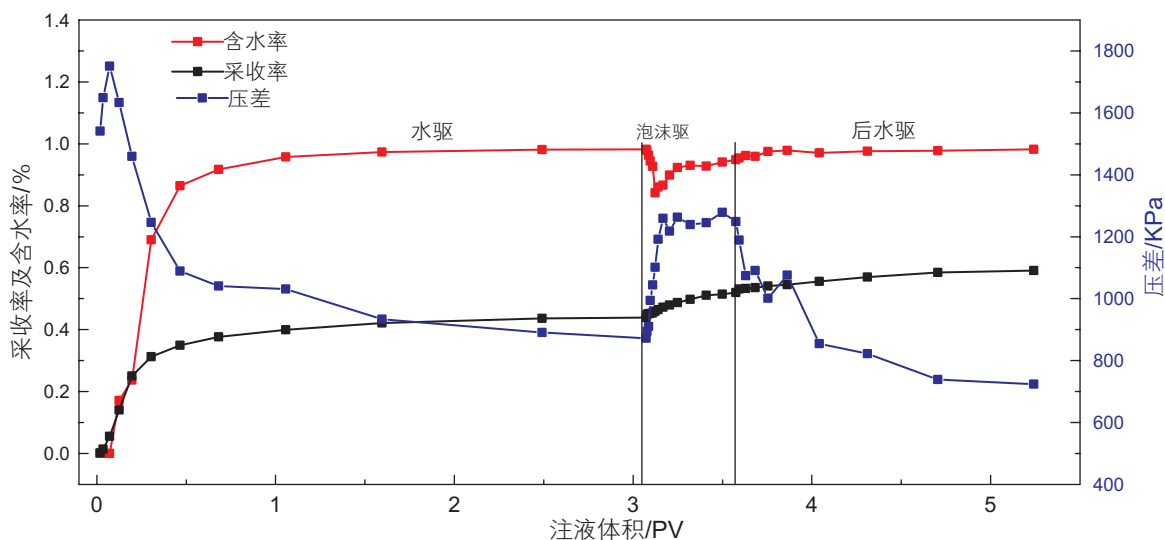


图 12 十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠单管驱替测试曲线

Fig. 12 The curves of oil-displacing test in single-pipe cores of PENS-14C

表 2 单管实验岩芯参数及提高采收率数值

Table 2 The parameters and the enhanced oil recovery of single-pipe cores

项目	数据
岩芯尺寸	3.8 cm × 30 cm
孔隙度	17.11%
空隙体积	58.21 mL
水驱采收率	43.9%
泡沫驱采收率	8.05%
后水驱	7.12%
提高率	15.17%



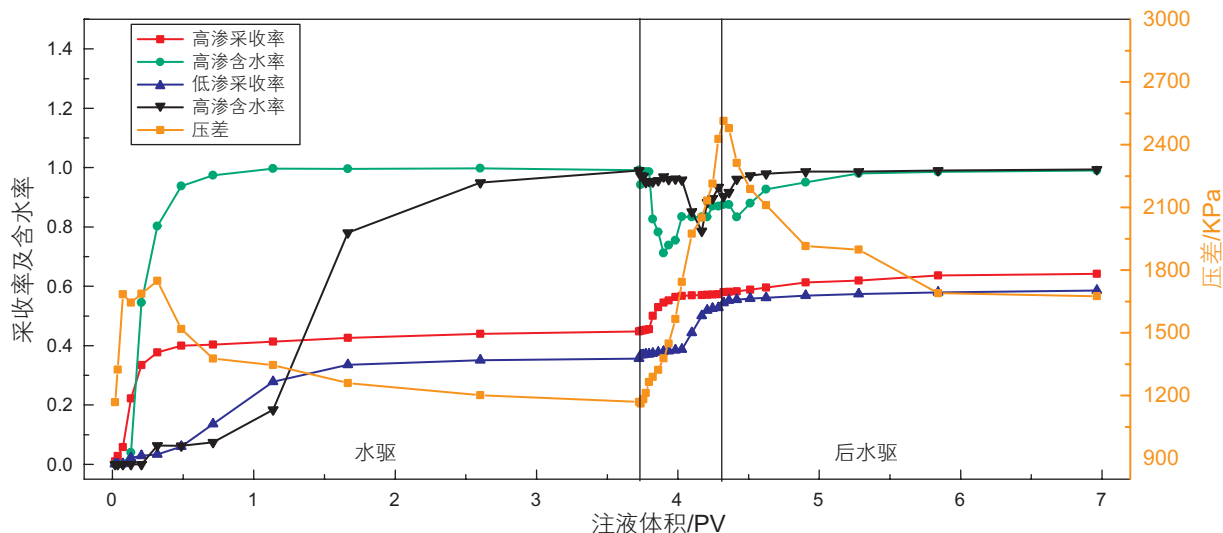


图 13 十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠双管驱替测试曲线

Fig. 13 The curves of oil-displacing test in double-pipe cores of PENS-14C

表 3 双管实验岩芯参数及提高采收率数值

Table 3 The parameters and the enhanced oil recovery of double-pipe cores

项目	数据	项目	数据
低渗岩芯尺寸	3.8 cm × 30 cm	高渗岩芯尺寸	3.8 cm × 30 cm
孔隙度	14.41%	孔隙度	17.67%
孔隙体积	49.03 mL	孔隙体积	60.12 mL
含油饱和度	68.33%	含油饱和度	70.02%
水驱采收率	35.61%	水驱采收率	44.76%
泡沫驱采收率	17.13%	泡沫驱采收率	12.57%
后水驱	5.82%	后水驱	6.90%
提高率	22.95%	提高率	19.47%
总提高采收率	21.01%		

驱, 提高采收率 7.12%。结果表明, 十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠单管驱替测试提高采收率为 15.17%, 驱油效率良好。

图 13 为十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠双管驱替测试曲线, 表 3 为双管驱替实验岩芯参数及提高采收率数值(实验条件: 120 °C, 5 MPa, 低渗岩芯 20.37 mD, 高渗岩芯 50.77 mD)。由图 13 及表 3 可知, 十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠双管驱替水驱采收率低渗为 35.61%, 高渗为 44.76%; 水驱后进行泡沫驱, 泡沫注入后, 压差上升说明泡沫的注入对管内的孔隙和孔道进行了有效封堵, 低渗岩芯泡沫采收率为 17.13%, 高渗岩芯泡沫采收率为 12.57%; 泡沫驱后进行后水驱, 低渗岩芯后水驱采收率为 5.82%, 高渗岩芯后水驱采收率为 6.90%。结果表明, 十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠双管驱替实验低渗岩芯提高采收率 22.95%, 高渗岩芯提高采收率 19.47%, 总提高采收率

为 21.01%, 实验效果良好。

### 3 结论

(1) 烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠泡沫体系具有较好的降低表面张力的作用和乳化作用, 碳数为十四时性能最佳, 碳链越短表面张力越大, 性能欠佳。

(2) 烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠泡沫体系在不同温度下(包括 90 °C 条件下)均具有良好的发泡性能和泡沫稳定性能, 其中十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠的性能最为突出。

(3) 十四烷基聚氧乙烯醚萘磺酸钠具有良好的抗吸附性、耐油性和抗腐蚀性, 对目标原油的界面张力及驱替实验结果也证明了十四碳聚氧乙烯醚萘磺酸钠适用于高温油藏的泡沫驱油。

## 参考文献

- [1] 于春涛. CO<sub>2</sub> 泡沫驱体系筛选与评价[J]. 油田化学, 2014, 31(3): 377-379. [YU C T. Screening test and evaluation on CO<sub>2</sub> foam flooding system[J]. Oilfield Chemistry, 2014, 31(3): 377-379.]
- [2] 屈鸣, 侯吉瑞, 马仕希, 王倩, 罗旻. 缝洞型油藏溶洞储集体氮气泡沫驱注入参数及机理研究[J]. 石油科学通报, 2018, 3(1): 57-66. [QU M, HOU J R, MA S X, WANG Q, LUO M. Mechanism and parameters of nitrogen foam flooding in cave reservoir bodies of fractured-cavity reservoirs[J]. Petroleum Science Bulletin, 2018, 3(1): 57-66(in Chinese).]
- [3] 宋建. 安塞油田开发中后期井网调整优化技术标准研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(11): 13-14. [SONG J. Research on technical standards of well pattern adjustment and optimization in the middle and late development of Ansaioilfield[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017, 37(11): 13-14.]
- [4] BOND D, HOLBROOK O C, LAKE C. Gas drive recovery process[P]. US2866507, 1956, 12-24.
- [5] FRIED A N. The foam-drive process for increasing the recovery of oil[R]. Report of Investigation 5866, USBM, Washington, 1961: 235-247.
- [6] 王佩华. 泡沫堵水调剖技术综述[J]. 钻采工艺, 2000(2): 62-63+70. [WANG P H. Overview on technology of water shutoff/profile control agent of foam[J]. Drilling & Production Technology, 2000(2): 62-63+70.]
- [7] 杨兴利, 郭平, 何敏侠. 空气泡沫驱高稳定性起泡剂的合成及性能评价[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(2): 240-246. [YANG X L, GUO P, HE M X. Synthesis and performance evaluation of high stability foaming agent for air foam flooding[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(2): 240-246.]
- [8] 张建强, 潘竞军, 邓伟兵, 等. 稠油热采用起泡剂的筛选[J]. 油田化学, 2018, 35(03): 98-103. [ZHANG J Q, PAN J J, DENG W B, et al. Evaluation of foaming agent for heavy oil thermal recovery[J]. Oilfield Chemistry, 2018, 35(03): 98-103.]
- [9] 姚雪, 孙宁, 吕亚慧, 等. 泡沫调驱体系研究进展[J]. 油田化学, 2020, 37(01): 169-177. [YAO X, SUN N, LV Y H, et al. Research progress of foam profile-controlling and flooding system[J]. Oilfield Chemistry, 2020, 37(01): 169-177.]
- [10] 杜勇. 低张力泡沫驱油体系提高采收率研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(29): 131-135. [DU Y. Research of low tension foam system in enhanced oil recovery[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(29): 131-135.]
- [11] 孙建峰, 郭东红, 崔晓东, 等. 甜菜碱类低界面张力泡沫驱油体系性能研究[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(3): 92-95. [SUN J F, GUO D H, CUI X D, et al. Study on properties of low interfacial tension foam flooding system as betaine[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(3): 92-95.]
- [12] 于涛, 刘华沙, 王超群, 等. 烷基芳基磺酸钠对烷烃的乳化性能[J]. 应用化学, 2011, 28(05): 560-564. [YU T, LIU H S, WANG C Q, et al. Emulsifying properties of sodium alkyl aryl sulfonate to alkanes[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2011, 28(05): 560-564.]
- [13] 王骁轲, 赵金麟. 复合表面活性剂驱油剂的性能评价[J]. 石油化工应用, 2019, 38(02): 41-43+55. [WANG X K, ZHAO J L. Performance evaluation of composite surfactant flooding agent[J]. Petrochemical Industry Application, 2019, 38(02): 41-43+55.]
- [14] 李世伦. 天然气工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 314-353. [LI S L. Gas Engineering[M]. Petroleum industry press, 2005: 314-353.]
- [15] 欧阳向南, 唐善法, 刘霜, 等. 双子表面活性剂临界胶束浓度规律研究进展[J]. 断块油气田, 2012, 19(05): 654-657. [OUYANG X N, TANG S F, LIU S, et al. Advance in regularity research on critical micelle concentration of Gemini surfactants[J]. Fault Block Oil & Gas Field, 2012, 19(05): 654-657.]
- [16] 史胜龙, 王业飞, 王振彪, 等. 微泡沫在高温高盐油藏中的驱油作用[J]. 油田化学, 2017, 34(01): 96-102. [SHI S L, WANG Y F, WANG Z B, et al. Displacement of micro-foam in high-temperature and high-salt oil reservoirs[J]. Oil Field Chemistry, 2017, 34(01): 96-102.]
- [17] 李小瑞, 解颖, 王海花, 等. 酯基型双子表面活性剂的合成及驱油性能[J]. 精细化工, 2017, 34(12): 1370-1378. [LI X R, XIE Y, WANG H H, et al. Synthesis and oil displacement performance of gemini surfactants with ester group[J]. Fine Chemicals, 2017, 34(12): 1370-1378.]
- [18] 杨卉艳, 康保安, 孙永强, 等. 脂肪醇聚氧乙烯醚丙基磺酸钠的合成及性能[J]. 精细石油化工, 2012, 29(4): 30-34. [YANG H Y, KANG B A, SUN Y Q, et al. Synthesis and performance of the alkyl alcohol polyoxyethylene propyl ether sulfonate[J]. Speciality Petrochemicals, 2012, 29(4): 30-34.]
- [19] 王世荣, 李祥高, 刘东志, 等. 表面活性剂化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010, 77-78. [WANG S R, LI X G, LIUD Z, et al. Surfactant Chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010, 77-78.]