

基于强化界面润湿调控的多羟基苯磺酸盐驱油剂的合成与性能评价

李琳^{*,a,b} 王子昭^{a,b} 刘佳伟^{a,b} 陈佳^{a,b} 金晓^{a,b} 戴彩丽^{a,b}

(^a 中国石油大学(华东) 石油工程学院 青岛 266580)

(^b 中国石油大学(华东) 非常规油气开发教育部重点实验室 青岛 266580)

摘要 通过调控原油-岩石界面润湿性进而提高采收率是油田高效开发的重要思路。现有阴离子表面活性剂改变岩石表面润湿能力有限, 研发强化界面润湿调控性能的新型驱油剂具有重要应用意义。本工作合成了一种新型表面活性剂二羟甲基十二烷基苯磺酸钠(SDDBS), 通过红外和核磁进行结构表征。探究了 SDDBS 在亲油岩石表面的吸附行为、降低油水界面张力能力、对岩石表面润湿性调控能力、油膜剥离能力以及驱油性能。实验结果表明 SDDBS 可在亲油岩石表面均匀吸附, 临界胶束浓度下可将油水界面张力降至 2.54 mN/m, 亲油玻璃片经 0.02% (w) SDDBS 溶液处理 48 h 后, 其空气中水滴接触角由 100.2°降低至 24.5°, 水下油滴接触角由 19.2°增加至 153.9°, 证明 SDDBS 可将亲油/疏水的岩石表面调控为强亲水/水下强疏油状态。采用 0.02% (w) SDDBS 溶液在 60 °C 下处理原油老化的玻璃片, 24 h 内油膜剥离面积高达 89%, 在地层水条件下油膜剥离面积仍可达 81%。室内模拟岩心驱油实验结果显示采收率提高 10.53%。本工作通过一步法合成一种新型多羟基苯磺酸盐驱油剂, 通过引入氢键强化其界面润湿调控能力用于油膜高效剥离, 具有较强实际应用潜力。

关键词 表面活性剂; 驱油剂; 界面润湿性; 油膜剥离

Synthesis and Performance Evaluation of Polyhydroxy Benzene Sulfonate Oil Displacement Agent Based on Enhanced Interfacial Wettability Control

Li, Lin^{*,a,b} Wang, Zizhao^{a,b} Liu, Jiawei^{a,b} Chen, Jia^{a,b} Jin, Xiao^{a,b} Dai, Caili^{a,b}

(^a School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

(^b Key Laboratory of Unconventional Oil & Gas Development (China University of Petroleum (East China)), Ministry of Education, Qingdao 266580, China)

Abstract Controlling the wettability of the oil-rock interface is an important way for highly efficient oilfield development. For existing anionic surfactants, their capability of changing the wettability of the rock surface is limited. Therefore, developing novel oil displacement agent with enhanced interfacial wettability control capability is of great significance. In this work, an interfacial wettability controlling oil displacement agent, sodium dimethyldodecyl benzene sulfonate (SDDBS), was synthesized and the structure was characterized by Fourier transform infrared (FT-IR) and ¹H-nuclear magnetic resonance (¹H NMR). The critical micelle concentration (cmc) of SDDBS was measured by spinning drop method and was determined as 0.02% (w). The adsorption behavior of SDDBS on oil-wet rock surface, the interfacial tension reduction property, wettability controlling property, oil film peeling performance and the oil displacement performance were evaluated. Based on the atomic force microscopy (AFM) images, SDDBS could adsorb uniformly on the surface of oil-wet rocks. The oil/water interfacial tension could be reduced to 2.54 mN/m under cmc. After immersing the oil-wet glass sheet in 0.02% (w) SDDBS solution for 48 h, the contact angle of the glass sheet towards water drop in air reduced from 100.2° to 24.5°, while the contact angle towards oil drop underwater increased from 19.2° to 153.9°, proving that SDDBS could regulate the wettability of the oil-wet/hydrophobic rock surface to strong hydrophilic/underwater oleophobic state. The oil film peeling performance of SDDBS was evaluated by calculating the remaining oil film area by graphical analysis software. When soaked in 0.02% (w) SDDBS solution at 60 °C, the area of oil film could be reduced by 89% within 24 h. The oil film reduction rate could still reach 81% in simulated formation water, indicating good reservoir adaptability. Laboratory simulation core displacement experiments were conducted at 60 °C and the results showed that the oil recovery rate was increased by 10.53%. In this work, a novel polyhydroxy benzene sulfonate surfactant was synthesized by one-step method. By introducing hydrogen bond to enhance the interfacial wetting control ability of surfactant, the oil film could be peeled off efficiently, exhibiting strong practical application potential.

Keywords surfactant; oil displacement agent; interfacial wettability; oil film peeling off

* E-mail: lilin@upc.edu.cn

Received August 31, 2021; published December 13, 2021.

Supporting information for this article is available free of charge via the Internet at <http://sioc-journal.cn>.

Project supported by the National Key R&D Program of China (No. 2019YFA0708700), the National Natural Science Foundation of China (No. 52174054) and Shandong Provincial Natural Science Foundation (No. ZR2019BEE046).

国家重点研发计划项目(No. 2019YFA0708700)、国家自然科学基金(No. 52174054)和山东省自然科学基金(No. ZR2019BEE046)资助。

1 引言

石油作为基础关键燃料及化工原材料,是保障国民经济和社会发展至关重要的战略资源.目前我国多数油田虽进入开发中后期,但剩余油资源丰富,增储上产潜力巨大,研发高效驱油剂对于进一步提高石油采收率意义重大.亲水砂岩油藏岩石表面长期被原油浸润,吸附胶质沥青质组分后润湿性转变为亲油,常规水驱后亲油性岩石表面仍然存在残余油膜.根据粘附功公式 $W = \delta[1 + \cos(\theta_{oil})]$,通过降低油水界面张力 δ 或增加油-固接触角 θ_{oil} ,可以降低原油在岩石表面的粘附功,使得吸附的油膜易于剥离^[1-4].研究表明,油水界面张力低至 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ mN/m,油膜剥离效果亦十分有限,通过调控原油-岩石界面润湿性进而提高采收率是油田高效开发的重要思路^[5-7].

近年来国内外主要采用的油田用润湿反转表面活性剂包括非离子型表面活性剂、离子型表面活性剂及复配体系等^[8-11].张小琴等^[12]研究一种新型非离子双子表面活性剂硬脂酸葡萄糖酯甲苄马来酸双酯,经研究其具有低界面张力(5 mN/m)和良好稳定性,可以显著提升二氧化硅表面疏油性(水下油滴接触角 128.17°).Wu 等^[13]合成了一种三季铵盐型阳离子表面活性剂,将其与阴离子型表面活性剂 α -烯烴磺酸盐复配,由于阴离子与阳离子相互吸引,使得界面上分子排列紧密,达到超低界面张力(4.5×10^{-4} mN/m),室内岩心驱替实验表明,注入复配体系使得采收率提高了 8.35%.实验证明低界面张力有利于提高采收率,但对于主要以油膜形式存在的剩余油,单一追求低界面张力无法达到高效油膜剥离效果.表面活性剂对砂岩及碳酸盐岩油藏润湿性影响主要通过表面清洗及表面覆盖实现^[14].阳离子表面活性剂通过其阳离子部分与吸附在岩石表面的原油酸性组分形成离子对,清洗表面油层同时暴露原亲水表面.阴离子表面活性剂通过其疏水尾部与亲油岩石表面相互作用,阴离子亲水头基覆盖亲油岩石表面使得表面转向水湿,同时增加岩石表面与油膜间静电斥力,提高洗油效率^[15-19].

现有阴离子表面活性剂如石油磺酸盐类具有成本低和界面活性好的优点,但与地层岩石表面吸附较弱,改变岩石润湿性能力有限^[20-26].采用合理的分子设计增强阴离子表面活性剂在岩石表面的吸附,强化其润湿调控能力,实现从亲油到强亲水/强疏油润湿性转变,促进壁面油膜的高效剥离,是本文的研究意义所在.本研究以十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、甲醛、甲醇等为主要原料制备了一种强化界面润湿调控性能的新型驱油剂二羟甲基十二烷基苯磺酸钠(SDDBS).探究了其吸附性能、界面润湿调控性能、油膜剥离性能以及宏观驱油性能等.实验结果表明 SDDBS 可将亲油岩石表面润湿调控至强疏油状态(水下油滴接触角 $>153.9^\circ$),驱油效果显著.

2 结果与讨论

2.1 界面润湿性调控驱油剂的结构表征

界面润湿性调控驱油剂 SDDBS 的合成示意图如图 1 所示.通过红外光谱和核磁共振氢谱对合成原料十二烷基苯磺酸钠(SDBS)和最终产物二羟甲基十二烷基苯磺酸钠(SDDBS)进行结构表征.由图 2a 可见,位于 1456 和 1638 cm^{-1} 的特征峰证明了苯环的存在,3434 cm^{-1} 处宽峰为 O—H 的伸缩振动峰,通过对比 SDBS 和 SDDBS 的红外光谱,可以判断 SDDBS 中含有羟基基团.由图 2b 可得, δ 4.8 为 D_2O 溶剂峰; δ 0.6~1.49 为亚甲基上的质子峰(a); δ 2.32~2.60 的三重峰为甲基上的质子峰(d); δ 3.35 为羟基上的质子峰(b); δ 7.14 为芳烃特征峰(c).通过 ^1H NMR 确定了最终产物中羟基等基团的存在及位置.红外光谱和核磁共振氢谱结果表明目标产物 SDDBS 合成成功,结构准确.

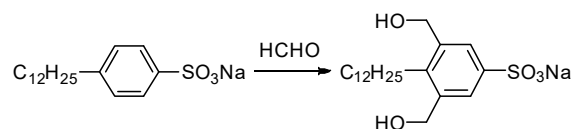


图 1 SDDBS 合成示意图

Figure 1 Synthesis schematic diagram of SDDBS

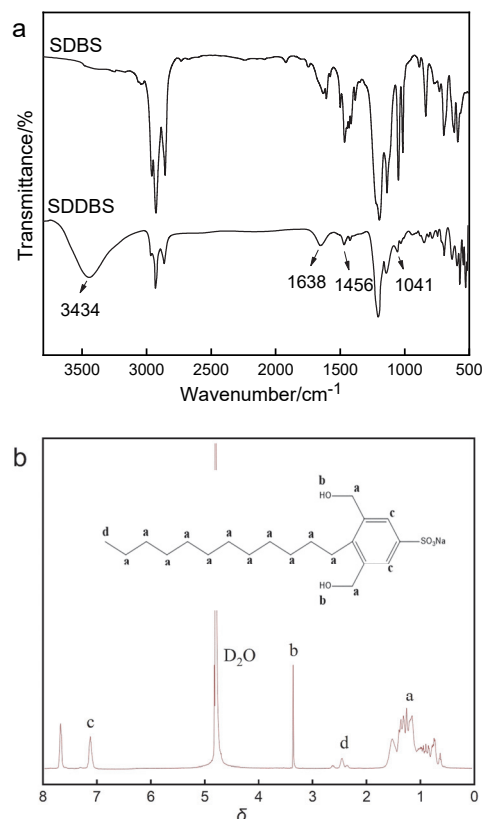


图 2 (a) SDDBS 红外光谱图和(b)核磁共振氢谱

Figure 2 (a) FT-IR and (b) ^1H NMR of SDDBS

2.2 界面润湿性调控驱油剂的性能评价

2.2.1 临界胶束浓度

使用界面流变仪测量不同浓度 SDDBS 溶液平衡状态下的表面张力, 得到 SDDBS 的表面张力随浓度变化曲线如图 3 所示. 通过数值拟合得到转折点, 确定 SDDBS 溶液的临界胶束浓度(cmc)为 0.02% (w), 该浓度也作为后续性能评价实验的使用浓度.

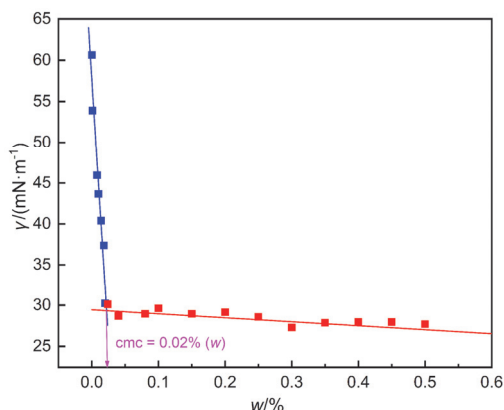


图 3 室温下 SDDBS 的表面张力随质量浓度变化曲线

Figure 3 Change of surface tension with mass concentration of SDDBS at room temperature

2.2.2 吸附性能

将亲油云母片在 0.02% (w) SDDBS 溶液中处理 10 min, 以模拟界面润湿调控驱油剂在亲油岩石表面的吸附. 使用原子力显微镜(AFM)观察吸附后云母片的表面形貌. 如图 4 所示, SDDBS 在亲油云母片表面吸附层厚

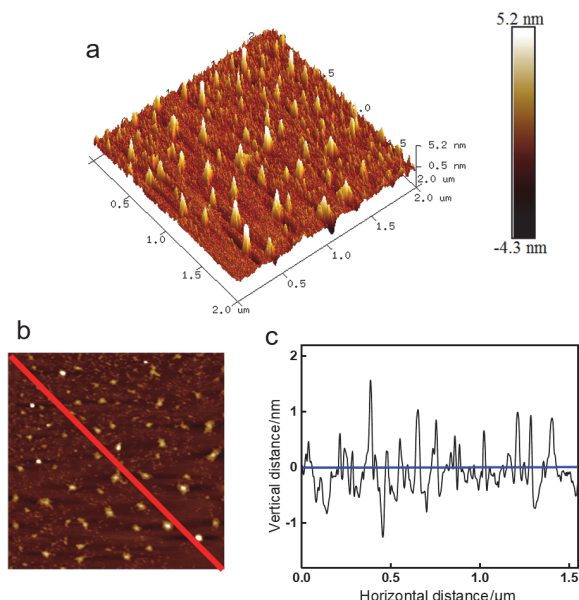


图 4 (a)亲油处理云母片在 0.02% (w) SDDBS 溶液中吸附后 AFM 表面形貌 3D 图; (b) AFM 表面形貌 2D 图; (c)吸附高度剖面图

Figure 4 (a) 3D figure of AFM surface morphology of oil-wet mica after adsorption in 0.02% (w) SDDBS solution; (b) 2D figure of AFM surface morphology; (c) adsorption thickness diagram of selected path

度约为 1.25 nm, 表面吸附得较为均匀, 主要呈不规则颗粒状分布, 平均粗糙度为 0.96 nm. 采用紫外分光光度法测定了不同浓度的 SDDBS 在亲油处理的石英砂表面吸附量, 结果如图 S1(见支持信息)所示, SDDBS 饱和吸附量约为 5.9 mg/g, 较文献报道^[4,27]具有良好的吸附性能.

2.2.3 降低油水界面张力性能

使用旋转滴法测量不同浓度 SDBS 和 SDDBS 溶液平衡状态下与油的界面张力, 分别使用正己烷(图 5)与十二烷(图 S2, 见支持信息)为油相, 实验结果表明 SDDBS 与 SDBS 在降低油水界面张力能力上差异不大. 由图 5 可知, 随着 SDDBS 溶液的质量浓度增大, 界面张力先逐渐降低, 在浓度增加至 0.02% (w)后趋于稳定. SDDBS 溶液可将油水界面张力降低至 2.6 mN/m^[28-30]. 探究了盐浓度对 SDDBS 降低油水界面张力的影响(图 S3, 见支持信息), 实验结果表明界面张力随盐浓度升高而降低, 在地层水条件下 SDDBS 可降低油水界面张力至 1.05 mN/m.

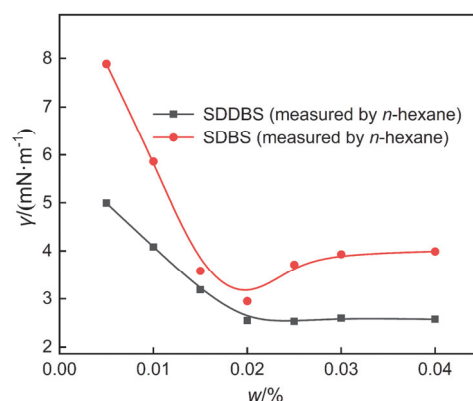


图 5 SDBS 与 SDDBS 正己烷-水界面张力随质量浓度变化曲线

Figure 5 Change of *n*-hexane/water interfacial tension with mass concentration of SDBS and SDDBS at 60 °C

2.2.4 润湿性调控性能

亲油处理后玻璃片的空气中水滴接触角为 100.2°, 水下油滴接触角为 19.2°, 为疏水亲油性. 将亲油玻璃片分别浸泡在 0.02% (w)去离子水配置的 SDBS、SDDBS 溶液和地层水配置的 SDDBS 溶液中 48 h, 使用接触角测量仪分别测量不同处理时间下其水滴接触角及水下油滴接触角. 结果如图 6 所示. SDDBS 润湿性调控能力较 SDBS 有较大提升, 处理后空气中水滴接触角由 65.1°降至 24.5°, 水下油滴接触角由 87.3°升至 153.9°. 经 SDDBS 处理后的玻璃片呈现亲水/水下强疏油性. 为探究盐对界面润湿调控性能的影响, 使用地层水配置的 SDDBS 溶液处理亲油玻璃片, 结果表明处理后空气中水滴接触角为 35.6°, 水下油滴接触角为 133.6°, 说明地层水的引入降低了 SDDBS 对亲油表面的亲水疏油调

控效果. 这是由于地层矿化度条件下, SDDBS 分子链团聚影响界面吸附, 导致润湿调控能力略有下降.

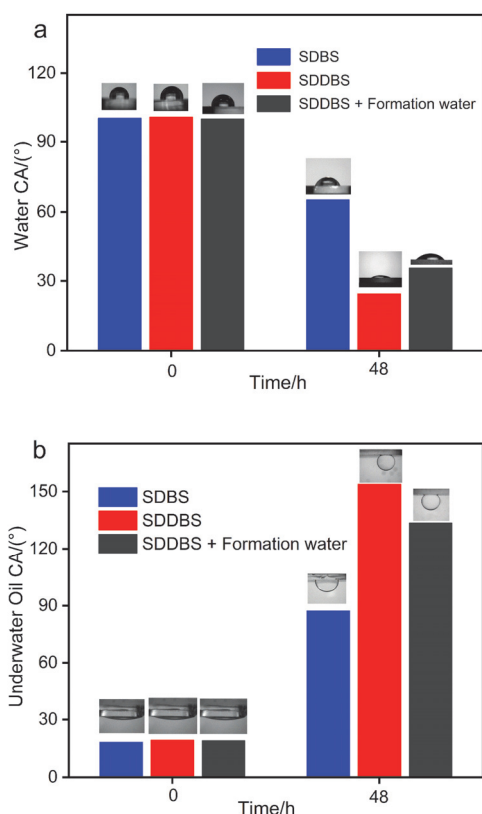


图 6 亲油玻璃片在去离子水配置 SDBS、SDDBS 及地层水配置 SDDBS 溶液中浸泡 48 h 后空气中水滴接触角(a)和水下油滴接触角(b)
Figure 6 Contact angles of water droplets in air (a) and oil droplets underwater (b) after the oil-wet glass sheets were soaked in SDBS, SDDBS solution with deionized water and SDDBS solution with formation water for 48 h

2.2.5 油膜剥离性能

将亲油处理后的玻璃片表面涂覆原油(原油成分见表 S1, 见支持信息), 100 °C 下老化 48 h, 模拟油藏岩石表面油膜. 在 60 °C 下将原油老化的玻璃片分别浸入 0.02% (w) 的 SDBS 和 SDDBS 溶液中, 记录实验过程中油膜剥离状态, 通过图形分析软件得到不同时刻下的油膜相对面积.

如图 7a 所示, 经 SDDBS 溶液处理后, 油膜面积降低明显, 油膜收缩最终以油珠形式从岩石表面脱离. 而经 SDBS 溶液处理后, 油膜面积仅有少量减少, 24 h 后仍有大部分油膜未被有效剥离. 油膜相对面积随时间的变化曲线如图 7b 所示, SDDBS 处理后, 24 h 内油膜面积减小了 89%(黑色曲线). 而油膜在 SDBS 中面积仅减小约 53%(蓝色曲线), 说明羟基的引入有效促进了油膜剥离. 使用模拟地层水(配方见表 S2, 见支持信息)配置 0.02% (w) SDDBS 溶液, 以相同方法进行油膜剥离实验, 得到图 7b 红色曲线. 由图可得, 地层水条件下 SDDBS 溶液的油膜剥离效果减弱, 24 h 内油膜面积减小了 81%,

结合前述润湿性调控与界面张力结果, 盐浓度的增加虽然降低了油水界面张力, 但同时使得处理后表面水下油滴接触角减小, 疏油性减弱, 最终导致油膜剥离效果变差, 说明油固界面润湿性调控在油膜剥离中起重要作用. 较于文献报道仍具有优越效果^[27], 说明制备的 SDDBS 具有良好的油藏环境适应性, 实际应用潜力巨大.

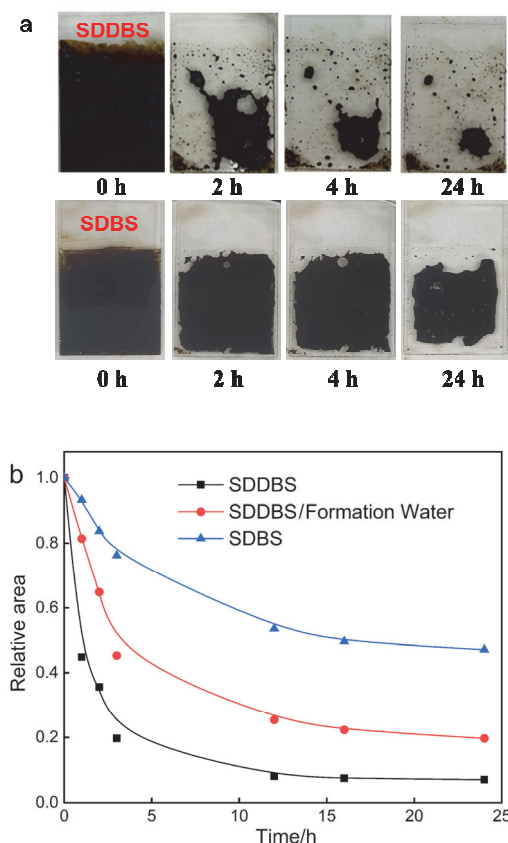


图 7 (a) SDDBS 和 SDBS 处理油膜效果; (b) 不同条件下油膜相对面积随时间变化曲线

Figure 7 (a) Oil film stripping state in SDDBS and SDBS; (b) curves of relative area of oil film over time under different conditions

如图 8 所示, SDDBS 剥离油膜机理可从以下三个方面进行阐释, 首先 SDDBS 吸附在油水界面上降低了油水界面张力; 其次, SDDBS 的二羟基通过氢键作用强化了其与岩石表面吸附, 磺酸基团富集于岩石表面使得岩石表面由亲油转变为强亲水, 极大地增加了油滴在岩石表面接触角, 降低粘附功而使得油膜易于剥离; 最后, 由于 SDDBS 在油水界面和岩石表面同时吸附, 增加剥离后油滴与岩石表面间的静电斥力, 使得剥离后油膜不易重新粘附壁面, 实现高效剥离^[31-39].

2.2.6 驱油模拟实验

结合上述研究, 选取 0.02% (w) SDDBS 溶液作为驱油剂进行岩心动态驱替实验. 本实验使用的岩心参数如表 1 所示. 驱替实验共分为三个过程: 模拟地层水驱、

表面活性剂驱、后续模拟地层水驱。驱替结果如图 9 所示, 初期地层水驱, 当采出液含水率 > 98% 时, 计算采收率为 37.36%。当注入 3.025 cm³ SDDBS 溶液后采收率提高至 41.67%, 注入压力升高。恒温保持 12 h 后进行后续水驱, 注入压力逐渐升高, 且当采出液含水率 > 98% 时, 计算采收率为 47.89%。说明 SDDBS 溶液驱在水驱基础上提高采收率 10.53%, 具有优异的驱油效果。

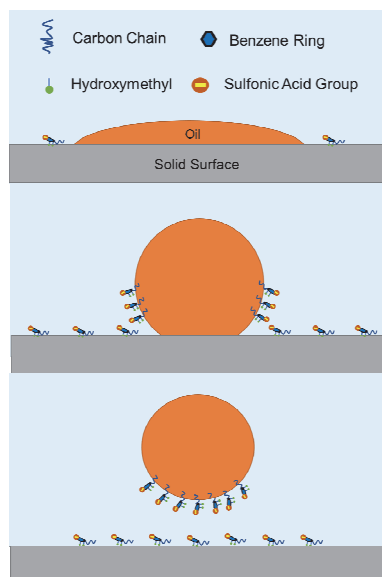


图 8 SDDBS 剥离油膜的动态过程示意图

Figure 8 Schematic diagram of oil film stripping by SDDBS

表 1 实验所用岩心参数

Table 1 Core parameters used in the experiment

长度/ cm	直径/ cm	渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)	孔隙体积/ cm ³	孔隙 度/%	含油饱和 度/%
7.482	2.526	57.0	6.05	16.21	76.00

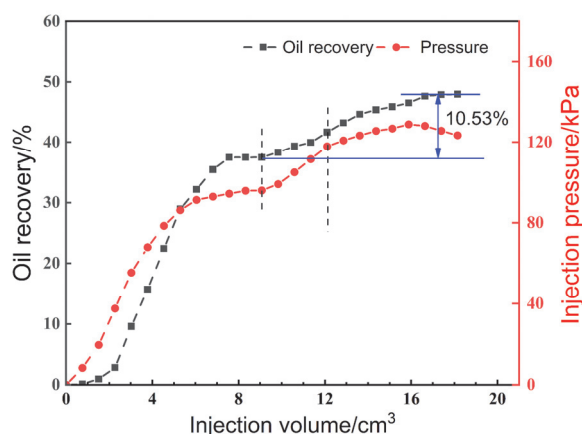


图 9 SDDBS 驱替实验结果

Figure 9 SDDBS displacement performance test results

3 结论

本研究合成了一种界面润湿性调控驱油剂 SDDBS, 该驱油剂同时具有疏水碳链、亲水磺酸根基团以及多羟

基结构。临界胶束浓度下, SDDBS 溶液可将油水界面张力降至 2.54 mN/m。SDDBS 分子中的多羟基结构可以促进其在岩石表面的吸附, 原子力显微镜实验结果显示 SDDBS 在亲油岩石表面的吸附呈均匀的不规则颗粒状分布。而 SDDBS 分子中暴露的阴离子则可以显著提高岩石表面的亲水性, 水下油滴接触角可从 19.2° 增加到 153.9°, 证明 SDDBS 可将亲油/疏水的岩石表面润湿调控为强亲水/水下强疏油状态。SDDBS 具有出色的油膜剥离能力, 24 h 内油膜剥离面积可达 89%, 地层水条件下油膜剥离面积仍可达 81%。此外, 使用 SDDBS 驱替可提高采收率达 10.53%。本研究通过一步法合成一种新型表面活性剂多羟基苯磺酸盐, 通过引入氢键强化表面活性剂界面润湿调控能力用于油膜高效剥离, 效果显著优于目前文献报道的各类油田用润湿反转表面活性剂, 具有较强实际应用潜力。

4 实验部分

4.1 界面润湿性调控驱油剂合成

按照物质的量比 1 : 2 称取十二烷基苯磺酸钠 (SDBS, 3.48 g) 和甲醛 (0.6 g)。将称量好的 SDBS 放置于 250 mL 三口烧瓶, 加入 50 mL 甲醇作为溶剂, 在回流温度 68 °C 下, 以 3 mL/min 速度边搅拌边滴加甲醛 (搅拌速率为 400 r/min), 反应 3 h。反应完毕后通过减压蒸馏和真空干燥除去溶剂, 得到白色粘稠状固体, 即为目标产物 SDDBS。

4.2 结构表征与性能评价

(1) 吸附性能

对云母片进行亲油处理, 在 40 °C 条件下, 使用新剥离的云母片浸泡于 5% (w) 的二甲基硅油乙醇溶液浸泡 7 d。浸泡完成后, 使用超声波分散仪中处理 1 d 后烘干。将处理好的云母片常温下浸泡于 0.02% (w) SDDBS 溶液 10 min。取出并用氮气流干燥。使用原子力显微镜在空气环境进行 SDDBS 在亲油表面吸附形貌的测定, 观察 SDDBS 在亲油云母片表面的吸附特性, 测量模式为轻敲模式 (TM-AFM), 使用扫描探针型号为 NCHV-A。

取用石英砂作吸附剂并清洁处理, 使用去离子水多次煮沸、浸泡, 滤出多余水份后再用 1% (w) 的稀盐酸震荡 4 h 作清洁处理, 去离子水多次冲洗过滤至滤液为中性。烘干后对吸附剂亲油处理。

配置系列浓度的 SDDBS 溶液, 将 4 g 亲油处理后的吸附剂加入到 30 g 表面活性剂溶液中, 在 60 °C 条件下振荡 12 h 后以 8000 r/min 离心 30 min。测定上清液残留 SDDBS 浓度。根据公式计算得到吸附量。

$$\Gamma = \frac{(w_0 - w) \cdot m_{\text{sol}}}{m_{\text{sand}}}$$

其中 w_0 和 w (%) 分别为初始和吸附后的 SDDBS 浓度, m_{sol} (mg) 为溶液质量, m_{sand} (g) 为吸附剂质量。

(2) 润湿性调控性能

对玻璃片进行清洁处理, 使用 1% 稀盐酸溶液处理玻璃片表面 4 h 后, 再用去离子水冲洗至表面呈中性, 烘干后对表面进行亲油处理. 将处理好的玻璃片分别浸泡在去离子水和 0.02% (w) SDDBS 溶液中 48 h. 使用接触角测量仪分别测量其空气中水滴接触角和水下油滴接触角.

4.3 油膜剥离性能

将亲油处理后的玻璃片表面均匀涂覆上原油, 在 100 °C 下老化 48 h. 将原油老化的玻璃片浸于 0.02% (w) 不同驱油剂溶液中, 得到不同时间下油膜剥离状态图片, 通过图形分析软件将图片转为灰度图, 使用框选工具选中灰度图中油膜区域即可得到该区域的灰度值. 处理后油膜的灰度值与未处理油膜的灰度值之比, 即可得到不同时刻下的剩余油膜相对面积, 该软件对图形处理的误差主要产生在小面积油膜以及中间过渡颜色的识别与处理, 软件计算误差在 3% 以内.

4.4 岩心动态驱替实验

使用 SDDBS 配置的表面活性剂作为驱油剂测量采收率. 其中实验所用物理模拟岩心驱替装置如图 S4 (见支持信息) 所示. 实验所用表面活性剂驱替液为地层水配置的 0.02% (w) SDDBS 溶液.

将岩心抽真空 12 h 后, 使用地层水进行饱和, 测量水饱和后岩心质量, 得到岩心孔隙体积 (cm³). 使用煤油和中质油体积比为 1:1 混合配置得到密度为 0.814 g/cm³ 的模拟油. 同样使岩心被模拟油饱和, 在 80 °C 下老化 21 d, 建立自然润湿条件.

在 60 °C 下以 0.1 mL/min 进行模拟地层水驱替, 直至采出液中含水量超过 98%. 在相同温度下再进行表面活性剂驱替, 将表面活性剂驱替液以 0.1 mL/min 的速度进行驱替, 注入时间为 40 min, 注入量约为 3.025 cm³, 计算表面活性剂驱替的采收率. 关闭实验装置恒温保持 12 h 以模拟实际开采关井的过程. 在相同温度下再进行后续水驱, 注入条件相同. 在整个驱替实验过程中实时记录注入压力、产油量以及产液量, 以计算每个过程的采收率.

References

- [1] Zhao, F.-L. *The Principle of EOR*, Petroleum Industry Press, Beijing, 2001, Chapter 6 (in Chinese). (赵福麟, EOR 原理, 石油工业出版社, 北京, 2001, 第 6 章.)
- [2] Sun, L.; Tian, Y.-Y. *Oilfield Chem.* **2013**, 30, 216 (in Chinese). (孙琳, 田园媛, 油田化学, 2013, 30, 216.)
- [3] Guo, H.-J. *Pet. Geol. Eng.* **2012**, 26, 105 (in Chinese). (郭洪军, 石油地质与工程, 2012, 26, 105.)
- [4] Li, L.; Chen, J.; Jin, X.; Wang, Z.-Z.; Wu, Y.-N.; Dai, C.-L. *J. Mol. Liq.* **2021**, 116973.
- [5] Shen, P.-P. *Reservoir Physics Experiment Technology*, Petroleum Industry Press, Beijing, 1995, Chapter 2-5 (in Chinese). (沈平平, 油层物理实验技术, 石油工业出版社, 北京, 1995, 第 2-5 章.)
- [6] Xu, B. *M.S. Thesis*, Northeast Petroleum University, Daqing, 2019 (in Chinese). (徐冰, 硕士论文, 东北石油大学, 大庆, 2019.)
- [7] Jian, G.; Puerto, M.; Wehowsky, A. *J. Colloid Interface Sci.* **2018**, 513, 684.
- [8] Ash, P. A.; Bain, C. D. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* **2012**, 17, 4.
- [9] Yao, Y.; Wei, M. Z. *Adv. Colloid Interface Sci.* **2021**, 294, 102477.
- [10] Hu, X.-Q. *M.S. Thesis*, Northwestern University, Xi'an, 2014 (in Chinese). (胡秀强, 硕士论文, 西北大学, 西安, 2014.)
- [11] Dabiri, A.; Honarvar, B. *J. Surfactants Deterg.* **2020**, 23, 4.
- [12] Zhang, X. Q. *M.S. Thesis*, Ocean University of China, Qingdao, 2013 (in Chinese). (张小琴, 硕士论文, 中国海洋大学, 青岛, 2013.)
- [13] Wu, X.-J.; Zhao, L.; Wang, X.-J. *J. Dispersion Sci. Technol.* **2013**, 34, 110.
- [14] Massarweh, O.; Abushaikh, A. S. *Energy Rep.* **2020**, 6, 3150.
- [15] Fuangswadi, A.; Charoensang, A.; Sabatini, D. A. *J. Surfactants Deterg.* **2006**, 9, 21.
- [16] Sun, L. H.; Liu, W. D.; Sun, C. L. *Adv. Mater. Res.* **2011**, 233, 2051.
- [17] Ebrahim, A. S.; Garrouch, A. A.; Lababidi, H. *J. Pet. Sci. Eng.* **2016**, 138, 234.
- [18] Paria, S.; Khilar, K. C. *Adv. Colloid Interface Sci.* **2004**, 110, 75.
- [19] Salager, J. L.; Forgari, A. M. *J. Surfactants Deterg.* **2017**, 16, 449.
- [20] Yamaguchi, M.; Tamura, S.; Sakata, T. *Sens. Mater.* **2018**, 30, 1307.
- [21] Jian, G.; Puerto, M.; Wehowsky, A. *J. Colloid Interface Sci.* **2018**, 513, 684.
- [22] Zana, R. *J. Colloid Interface Sci.* **2002**, 248, 203.
- [23] Atta, D. Y.; Negash, B. M.; Yekken, N.; Habte, A. D. *J. Mol. Liq.* **2020**, 321.
- [24] Zhao, T.-T.; Gong, H.-J.; Xu, G.-Y.; Cao, X.-L.; Song, X.-W.; Wang, H.-Y. *Oilfield Chem.* **2010**, 27, 112 (in Chinese). (赵涛涛, 宫厚健, 徐桂英, 曹绪龙, 宋新旺, 王红艳, 油田化学, 2010, 27, 112.)
- [25] Chen, B.-L.; Li, L.; Zhu, L.-Z. *J. Zhejiang Univ. (Sci. Ed.)* **2007**, 34, 241 (in Chinese). (陈宝梁, 李菱, 朱利中, 浙江大学学报 (理学版), 2007, 34, 241.)
- [26] Fu, M.-L.; Zhou, Y.-X. *J. Oil Gas Technol.* **2012**, 34, 128 (in Chinese). (付美龙, 周玉霞, 石油天然气学报, 2012, 34, 128.)
- [27] Li, L.; Chen, J.; Xu, X.-P.; Liu, J.-W.; Xu, Z.-Z.; Sun, W.; Zhu, Z.-X.; Dai, C.-L. *Oilfield Chem.* **2021**, 38, 90 (in Chinese). (李琳, 陈佳, 徐效平, 刘佳伟, 徐忠正, 孙雯, 朱芷萱, 戴彩丽, 油田化学, 2021, 38, 90.)
- [28] Wang, X.-Z.; Kang, W.-L.; Meng, X.-C.; Fan, H.-M.; Xu, H.; Huang, J.-W.; Fu, J.-B.; Zhang, Y.-N. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2012**, 28, 2285 (in Chinese). (王宪中, 康万利, 孟祥灿, 范海明, 徐海, 黄经纬, 傅建斌, 张一诺, 物理化学学报, 2012, 28, 2285.)
- [29] Lu, X.-G.; Wang, X.-Y.; Li, Q.; Wang, R.-J. *Acta Chim. Sinica* **2010**, 68, 1229 (in Chinese). (卢祥国, 王晓燕, 李强, 王荣健, 化学学报, 2010, 68, 1229.)
- [30] Cao, X.-L.; Lv, K.; Cui, X.-H.; Shi, J.; Yuan, S.-L. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2010**, 26, 1959 (in Chinese). (曹绪龙, 吕凯, 崔晓红, 石静, 苑世领, 物理化学学报, 2010, 26, 1959.)
- [31] Zhang, P.-L. *M.S. Thesis*, Shandong University, Jinan, 2014 (in Chinese). (张培利, 硕士论文, 山东大学, 济南, 2014.)
- [32] Ren, X.-J.; Liu, N.; Qu, Z.-H.; Zhang, N.-S. *Pet. Explor. Dev.* **2005**, 32, 123 (in Chinese). (任晓娟, 刘宁, 曲志浩, 张宁生, 石油勘探与开发, 2005, 32, 123.)
- [33] Jiang, P.; Zhang, G.-C.; Ge, J.-J.; Wang, D.-F.; Ma, T. *Acta Pet. Sin., Pet. Process. Sect.* **2008**, 24, 222 (in Chinese). (蒋平, 张贵才, 葛际江, 王东方, 马涛, 石油学报 (石油加工), 2008, 24, 222.)
- [34] Li, J.-G. *M.S. Thesis*, Northeast Petroleum University, Daqing, 2006 (in Chinese). (李俊刚, 硕士论文, 东北石油大学, 大庆, 2006.)
- [35] Jiang, P.; Zhang, G.-C. *J. Petrochem. Univ.* **2009**, 22, 61 (in Chinese). (蒋平, 张贵才, 石油化工高等学校学报, 2009, 22, 61.)
- [36] Lundborg, M.; Lindahl, E. *J. Phys. Chem. B* **2014**, 119, 810.
- [37] Li, Z.-Q.; Guo, X.-L.; Wang, H.-Y.; Li, Q.-H.; Yuan, S.-L.; Xu, G.-Y.; Liu, C.-P. *Acta Phys.-Chim. Sin.* **2009**, 25, 16 (in Chinese). (李振泉, 郭新利, 王红艳, 李青华, 苑世领, 徐桂英, 刘成卜, 物理化学学报, 2009, 25, 16.)
- [38] Wang, Y.-F.; Yu, W.-Z.; Hu, S.-Q. *J. Univ. Pet., China, Ed. Nat. Sci.* **2011**, 35, 153 (in Chinese). (王业飞, 于维钊, 胡松青, 中国石油大学学报 (自然科学版), 2011, 35, 153.)
- [39] Alqam, M.; Abu-Khamsin, S. A.; Sultan, A. S.; Okasha, T.; Yildiz, H. O. *Energy Fuels* **2019**, 33, 3.

(Cheng, B.)