

阳离子/非离子复合表面活性剂改变油湿性砂岩表面润湿性机制

王业飞¹, 白羽¹, 侯宝峰², 王任卓¹, 白群山³, 张希喜¹

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 长江大学石油工程学院, 湖北武汉 430100;
3. 中国石油集团大庆油田有限责任公司, 黑龙江大庆 163414)

摘要:通过表面张力、接触角及 Zeta 电位测量首次研究并提出阳离子/非离子复合表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)/辛基苯聚氧乙烯醚(TX-100)改变油湿性砂岩表面润湿性的吸附模型及机制。结果表明:阳离子/非离子复合表面活性剂 CTAB/TX-100 改变油湿性砂岩表面润湿性的效果比单一阳离子表面活性剂 CTAB 及非离子表面活性剂 TX-100 的效果更显著;CTAB 与 TX-100 间存在良好的协同效应,CTAB 分子预先吸附在油湿性砂岩表面充当锚粒子,TX-100 分子通过疏水作用与其形成聚集体,从而提高了 TX-100 及 CTAB 在油湿性砂岩表面的吸附量;TX-100 的存在也提高了 CTAB 与油湿性砂岩表面羧酸类物质形成离子对的能力,并使离子对的解吸附能力增强,因此改变油湿性砂岩表面润湿性的效果更显著。

关键词:阳离子表面活性剂;非离子表面活性剂;复合表面活性剂;油湿性砂岩;润湿性改变

中图分类号:TE 357.46 **文献标志码:**A

引用格式:王业飞,白羽,侯宝峰,等. 阳离子/非离子复合表面活性剂改变油湿性砂岩表面润湿性机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(2):165-171.

WANG Yefei, BAI Yu, HOU Baofeng, et al. Mechanistic study on wettability alteration of oil-wet sandstone surface using mixed cationic-nonionic surfactants[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(2): 165-171.

Mechanistic study on wettability alteration of oil-wet sandstone surface using mixed cationic-nonionic surfactants

WANG Yefei¹, BAI Yu¹, HOU Baofeng², WANG Renzhuo¹, BAI Qunshan³, ZHANG Xixi¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. School of Petroleum Engineering in Yangtze River University of Petroleum, Wuhan 430100, China;
3. Daqing Limited Company of CNPC, Daqing 163414, China)

Abstract: The surface tension, contact angle and zeta potential measurements were used to study adsorption models for CTAB/TX-100 mixtures on oil-wet sandstone surface and mechanism for wettability alteration of oil-wet sandstone surface using mixed cationic-nonionic surfactants. It is found that the mixed cationic-nonionic surfactants CTAB/TX-100 show better performance in changing wettability of oil-wet sandstone surface than single CTAB and TX-100. The CTAB and TX-100 present good synergistic effects. The pre-adsorbed CTAB molecules act as anchors on the oil-wet sandstone surface, allowing TX-100 molecules to form mixed aggregates with them through chain-chain interactions, which results in the promotion of TX-100 and CTAB adsorption on oil-wet sandstone surface. Meanwhile, the ability of CTAB for forming ion pairs with carboxylic acid substances can be promoted by TX-100. And the adsorption and desorption capability of ion pairs are enhanced as well. Therefore, the mixed cationic-nonionic surfactants show better effect on wettability alteration of oil-wet sandstone surface than single surfactants.

收稿日期:2017-07-20

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05058-003);长江学者和创新团队发展计划(IRT1294)

作者简介:王业飞(1968-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为调剖堵水、化学驱、油水井化学处理、油田化学品。E-mail: wangyf@upc.edu.cn.

Keywords: cationic surfactant; nonionic surfactant; mixed surfactant; oil-wet sandstone; wettability alteration

在三次采油中,表面活性剂通过改变固-液界面性质,使油藏岩石表面发生润湿反转,从而获得更高的采收率^[1-4]。目前表面活性剂改变油湿性表面润湿性机制研究大多针对单一表面活性剂^[5-10]。Standnes 等^[5]提出了阳离子表面活性剂改变油湿性碳酸盐岩表面润湿性的“离子对机制”和非离子、阴离子表面活性剂改变油湿性碳酸盐岩表面润湿性的“吸附机制”。Hou 等^[6]证实了阳离子表面活性剂及非离子、阴离子表面活性剂改变油湿性砂岩表面润湿性的机制同为“离子对机制”及“吸附机制”。研究发现,与非离子及阴离子表面活性剂相比,阳离子表面活性剂改变油湿性固体表面润湿性的效果最佳,但由于砂岩表面带负电,导致生产开发中阳离子表面活性剂的吸附损耗较大。体系当中添加适量的非离子表面活性剂进行复配使用,能够降低表面活性剂体系的吸附损耗^[6,11]。目前针对阳离子/非离子复合表面活性剂改变固体表面润湿性的研究较少,且主要针对水湿性表面^[11-16]。Zhao 等^[16]研究了阳离子/非离子复合表面活性剂中阳离子、非离子表面活性剂浓度的变化对于水湿性表面润湿性的影响。Zhang 等^[15]提出了阳离子/非离子复合表面活性剂在水湿性膨润土表面的吸附模型。笔者利用石英片及石英砂模拟砂岩表面,通过多种手段研究阳离子/非离子复合表面活性剂改变油湿性砂岩表面润湿性的吸附模型及机制。

1 实验

1.1 材料和仪器

实验材料:石英片(25 mm×25 mm×2 mm,中国科学院上海光机所),分析纯石英砂(0.124~0.15 mm,国药集团化学试剂有限公司);分析纯阳离子表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB),化学纯非离子表面活性剂辛基苯聚氧乙烯醚(TX-100),表面活性剂均为国药集团化学试剂有限公司生产;原油(胜坨油田,25℃下密度0.870 g/cm³,黏度63.5 mPa·s,酸值1.4);分析纯正庚烷(国药集团化学试剂有限公司);模拟地层水中,Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻的质量浓度分别为17.570、1.169、1.870、23.648 g/L。

实验仪器:JC2000D 接触角测量仪(上海中晨数字技术设备有限公司);Sartorius 电子分析天平(德国赛多利斯仪器设备有限公司);Dataphysics DCAT21 表/界面张力动态接触角测量仪(德国

Dataphysics 仪器股份有限公司);Nano-Zeta-MeterZeta 电位仪(英国马尔文仪器有限公司);鼓风干燥箱(上海捷呈实验仪器有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 石英片与石英砂的老化处理

为获取油湿性砂岩表面,对石英片及石英砂进行老化处理。原油是一种比较稳定的胶体分散体系,其分散相是以沥青质为核心,依附于它的胶质为溶剂化层而构成的胶束,其分散介质则主要由油分和部分胶质组成^[17-19]。在原油中加入正庚烷稀释时,由于沥青质不溶于正庚烷,它会通过自身强烈的弯曲变形远离溶剂并吸附于浸泡在其中的石英表面^[20]。经红外光谱及原子力显微镜等手段证实,石英表面经正庚烷质量分数为20%的正庚烷-原油体系浸泡处理后,原油中的很多组分(如沥青质中的羧酸类物质等)均吸附于石英表面^[6]。通过接触角测定筛选出正庚烷-原油老化体系中,20%的正庚烷-原油体系对石英表面的老化效果最佳^[21],因此选用20%的正庚烷-原油体系进行石英表面的老化处理。

将石英片浸入铬酸中24 h,用去离子水冲洗干净,后将石英片放入鼓风干燥箱中烘干处理。将干燥后的石英片浸没在20%的正庚烷-原油体系中,在75℃条件下老化14 d,取出后用正庚烷冲洗石英片直至洗液为无色,将石英片放入鼓风干燥箱中烘干备用。将石英砂研成粉末(直径范围4~10 μm),浸入铬酸中24 h,用去离子水冲洗干净后将石英粉末放入鼓风干燥箱中烘干处理。将干燥后的石英粉末浸没在20%的正庚烷-原油体系中,在75℃条件下老化14 d,老化后将石英粉末抽滤,后用正庚烷冲洗直至洗液为无色^[17-18],将石英粉末放入鼓风干燥箱中烘干备用。

接触角测定结果显示,模拟地层水在未经处理的石英片表面接触角为10°,经老化处理后,其表面水相接触角为134°,表现出很强的油湿性,表明20%的正庚烷-原油体系老化效果很好。

1.2.2 石英片与石英砂的表面活性剂处理

用模拟地层水配制不同质量分数的CTAB溶液、TX-100溶液及CTAB/TX-100复合表面活性剂溶液($m_{\text{CTAB}}:m_{\text{TX-100}}=1:2$)。将老化后的干燥石英片浸没在不同表面活性剂溶液中恒温振荡24 h。用不同表面活性剂溶液配制石英粉末悬浮液,后将悬

浮液在室温条件下放置 24 h。

1.2.3 表面张力测定

实验利用 DCAT21 表/界面张力动态接触角测量仪测定不同表面活性剂溶液在室温条件下的表面张力。

1.2.4 Zeta 电位测量

Zeta 电位是存在于扩散双电层滑动面上的电位,对固体表面的性质有重要影响^[7]。实验利用 Nano-Zeta-Meter Zeta 电位测定仪测定石英粉末悬浮液中粒子的电泳迁移率,并利用 Smoluchowski 公式计算粒子的 Zeta 电位:

$$\zeta = \frac{K\eta U}{\varepsilon}$$

式中, U 为电泳迁移率; ε 为分散介质的介电常数; ζ 为 Zeta 电位; η 为溶液黏度; K 为定值并取决于粒子形状。粒子为球状时 K 取 1.5, 粒子为棒状或片状时 K 取 1.0, 本次研究中 K 取 1.5。表面活性剂溶液在加入石英粉末前后,其自然 pH 值变化不大,因此在 Zeta 电位测量之前不需要校准 pH 值^[18]。

1.2.5 接触角测定

利用 JC2000D 接触角测量仪在室温条件下通过躺滴法测定不同表面活性剂溶液在其处理过的老化石英片表面的接触角,躺滴法测定接触角原理见

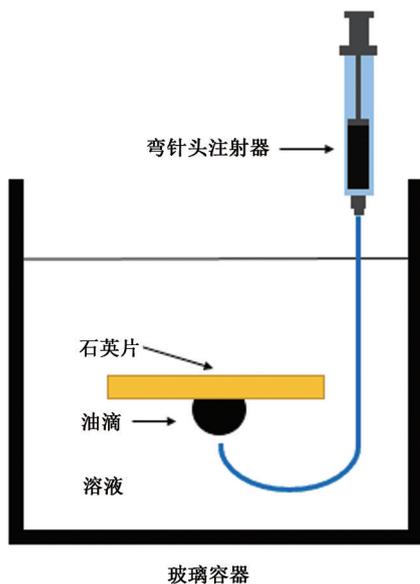


图 1 躺滴法测定接触角原理图

Fig.1 Schematic diagram of contact angle determination using sessile drop method

图 1。该方法是在玻璃容器中加入表面活性剂溶液,将一块经该表面活性剂溶液处理过的老化石英片浸没在玻璃容器液面下。为获得较准确的接触角值,用弯针头注射器于石英片下方不同的位置注射

6 滴油,从而可获得接触角的平均值。由于润湿滞后,实验中油滴与石英片表面的接触时间应大于 30 min^[18],待其形状不再发生变化时,近距离摄取油滴几何形状,从而获取水相接触角。

2 结果分析

不同表面活性剂体系表面张力与质量分数的关系见图 2。可以看出,随着表面活性剂质量分数的增加,表面活性剂溶液的表面张力均逐渐减小,后趋于稳定。将图中曲线进行拟合可得,CTAB/TX-100 复合表面活性剂溶液的临界胶束浓度 (w_{cmc}) 为 0.0035%, CTAB 溶液的 w_{cmc} 为 0.0075%, TX-100 溶液的 w_{cmc} 为 0.028%。经比较可知, $w_{cmc,复配} < w_{cmc,CTAB} < w_{cmc,TX-100}$ 。由于阳离子与非离子表面活性剂分子间存在协同效应,阳离子表面活性剂 CTAB 分子与非离子表面活性剂 TX-100 分子头基间相互嵌入,形成混合聚集体,使得阳离子表面活性剂分子头基间的静电斥力降低,因此其与单一阳离子、非离子表面活性剂相比 w_{cmc} 降低^[15]。

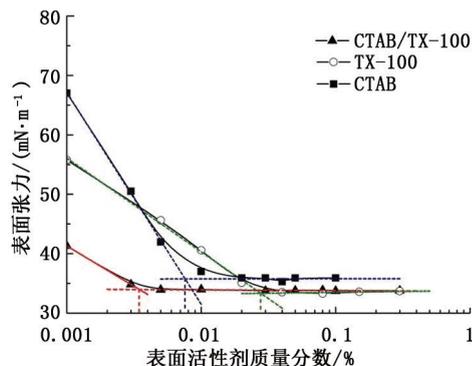


图 2 不同表面活性剂体系的表面张力

Fig.2 Surface tensions of different surfactant solutions

老化石英粉末在不同表面活性剂溶液中分别浸泡处理 24 h 之后的 Zeta 电位如图 3 所示。可以看出,未经表面活性剂溶液处理的老化石英粉末的 Zeta 电位为 -4.0 mV。经 CTAB 溶液处理后,老化石英粉末的 Zeta 电位随 CTAB 质量分数的增加先升高后降低并趋于稳定。经 TX-100 溶液处理后,老化石英粉末的 Zeta 电位随 TX-100 质量分数的增加先略有降低后趋于平衡。经 CTAB/TX-100 复合表面活性剂溶液处理后的老化石英粉末的 Zeta 电位随表面活性剂质量分数的增加亦先升高后降低并趋于稳定,但在表面活性剂质量分数低于临界胶束浓度时,同一质量分数条件下,经 CTAB/TX-100 复配体系处理的石英粉末的 Zeta 电位高于 CTAB 处理的石英粉末的 Zeta 电位,且 Zeta 电位的最终稳定

值比 CTAB 处理后的低。

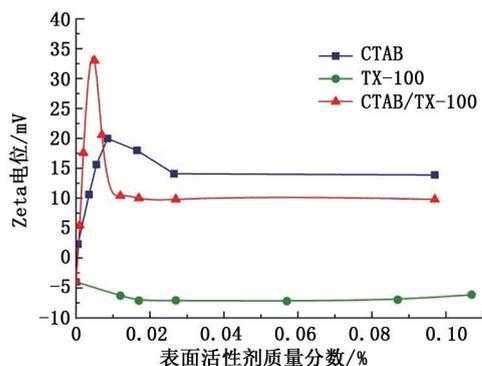


图3 经不同表面活性剂处理的石英粉末的 Zeta 电位

Fig.3 Zeta potential of quartz powder treated with different surfactant solutions

在低质量分数条件下(临界胶束浓度以下),由于 CTAB 分子不断吸附于老化石英粉末表面,与原油中的羧酸类物质形成离子对,导致 CTAB 溶液处理后的老化石英粉末的 Zeta 电位由 -4.0 mV 逐渐增加至 20.0 mV,而此时溶液中尚未形成胶束,因此离子对无法从石英表面解吸附^[8]。在临界胶束浓度以下,由于 TX-100 分子通过疏水作用不断吸附于老化石英粉末表面,因此随表面活性剂质量分数的增大, TX-100 处理后的石英粉末的 Zeta 电位不断降低^[6]。在同一质量分数条件下,经 CTAB/TX-100 复合表面活性剂溶液处理的石英粉末的 Zeta 电位高于 CTAB 处理的石英粉末的 Zeta 电位,由此实验现象推测可知, CTAB/TX-100 复配体系中 CTAB 的吸附量大于其在单一 CTAB 溶液中的吸附量。这是由于 CTAB 与 TX-100 间存在协同效应, CTAB 分子通过静电引力预先吸附在油湿性石英表面充当锚粒子, TX-100 分子通过疏水作用与其形成聚集体^[15],从而提高了 CTAB 分子在油湿性石英表面的吸附量。

当表面活性剂质量分数超过临界胶束浓度时,由于阳离子表面活性剂 CTAB 分子与石英粉末表面羧酸类物质形成的离子对不可逆地从石英粉末表面解吸附,并增溶于由 CTAB 分子形成的胶束中,导致经 CTAB 溶液处理后的石英粉末的 Zeta 电位由 21.2 mV 降至 14.1 mV。将老化石英砂的红外谱图与经 CTAB 溶液处理后的老化石英砂的红外谱图进行对比可以看出,经 CTAB 溶液处理后,老化石英砂红外谱图中对应 $C=O$ 、 $C-O$ 基团伸缩振动的大部分吸收峰消失,此结果证实经 CTAB 溶液浸泡处理后,老化石英砂表面吸附的大部分羧酸类物质从固

体表面解吸附^[8]。当表面活性剂浓度超过临界胶束浓度时,经 TX-100 处理后的石英粉末的 Zeta 电位趋于稳定,表明 TX-100 在老化石英表面达到了饱和和吸附。达到临界胶束浓度后,经 CTAB/TX-100 复合表面活性剂溶液处理后的石英粉末的 Zeta 电位由 33.2 mV 降至 10.0 mV。可能是由于阳离子表面活性剂 CTAB 分子与非离子表面活性剂 TX-100 分子形成的聚集体与石英表面的羧酸类物质形成离子对,而后不可逆地从石英表面解吸附,并增溶于由 CTAB 和 TX-100 分子形成的混合胶束中。经 CTAB 溶液处理的老化石英粉末的 Zeta 电位的稳定值为 14.1 mV,而经 CTAB/TX-100 复合表面活性剂处理的老化石英粉末的 Zeta 电位的稳定值为 10 mV,低于 CTAB 处理后的稳定值,表明 CTAB/TX-100 复合表面活性剂对于油湿性砂岩表面羧酸类物质的解吸附能力比单一阳离子表面活性剂 CTAB 更强^[16]。

Zeta 电位测定的实验结果也证实了表面张力的测定结果。经 CTAB/TX-100 复配体系处理后的老化石英粉末的 Zeta 电位在表面活性剂质量分数达到 0.0035% 时开始下降,而 CTAB 处理的老化石英粉末的 Zeta 电位在表面活性剂质量分数度达到 0.0075% 时才开始下降,此结果与表面张力测定结果一致,表明阳离子/非离子复合表面活性剂的临界胶束浓度比单一阳离子表面活性剂低。

为了验证 Zeta 电位测定结果的合理性,测定了老化前石英片、老化后石英片及经 CTAB、TX-100、CTAB/TX-100 复配体系处理过的老化石英片表面的水相接触角,分别为 10° 、 134° 、 57° 、 108° 和 43° 。图 4 为老化石英片表面经 CTAB、TX-100、CTAB/TX-100 复配体系处理后的润湿性变化。由图 4 看出,未经处理的老化石英片表面的水相接触角为 134° ,经 CTAB/TX-100 复配体系处理过的老化石英片表面的水相接触角为 43° ,而经 CTAB、TX-100 处理后的石英片表面的水相接触角分别为 57° 和 108° ,显然 CTAB/TX-100 复合表面活性剂在改变油湿性砂岩表面润湿性方面的性能优于单一阳离子表面活性剂 CTAB 及非离子表面活性剂 TX-100。这主要是由于 CTAB 分子与 TX-100 分子间存在复配协同效应,二者构成的混合聚集体与油湿性砂岩表面羧酸类物质形成离子对的驱动力为静电引力、氢键、范德华力的共同作用力,其作用效果远远大于单一的静电引力、氢键及范德华力。

图 5 与图 6 分别为阳离子表面活性剂 CTAB 与非离子表面活性剂 TX-100 改变油湿性砂岩表面润

湿性的吸附模型。实验结果证实了阳离子表面活性剂改变油湿性砂岩表面润湿性的离子对机制,带正电的表面活性剂分子与原油中的羧酸类物质结合构成离子对,随后离子对从固体表面上解吸附并增溶于由阳离子表面活性剂形成的胶束中(图 5)。同时也证实了非离子表面活性剂润湿反转的吸附机制,非离子表面活性剂的疏水链与油湿性砂岩表面的羧酸类物质间存在疏水作用,导致表面活性剂分子在油湿性砂岩表面的吸附,从而改变其润湿性^[5-6](图 6)。



图 4 经不同表面活性剂体系处理后老化石英片表面的润湿性变化

Fig. 4 Wettability alteration of aged quartz surfaces treated with different surfactant solutions

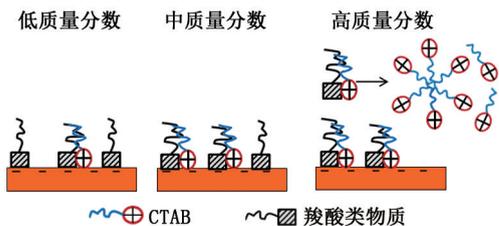


图 5 阳离子表面活性剂 CTAB 改变油湿性砂岩表面润湿性吸附模型

Fig. 5 Adsorption model of cationic surfactant CTAB on oil-wet sandstone surface

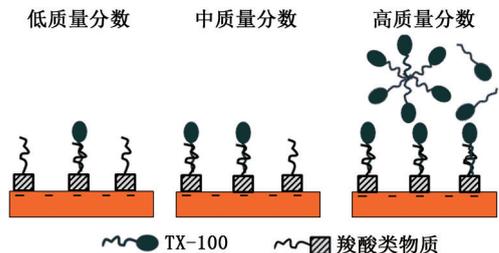


图 6 非离子表面活性剂 TX-100 改变油湿性砂岩表面润湿性吸附模型

Fig. 6 Adsorption model of nonionic surfactant TX-100 on oil-wet sandstone surface

基于上述实验结果,提出了如图 7 所示的阳离子/非离子复合表面活性剂 CTAB/TX-100 改变油湿性砂岩表面润湿性的吸附模型。在低质量分数条件下,由于静电引力远大于疏水作用力,导致 CTAB

与 TX-100 分子间存在竞争吸附,CTAB 在油湿性砂岩表面吸附得更多^[11-13]。中等质量分数条件下,吸附在油湿性砂岩表面的 CTAB 分子充当锚粒子,TX-100 分子通过疏水作用与其形成聚集体,提高了 CTAB 与 TX-100 分子的吸附量^[14-15]。表面活性剂质量分数再升高,CTAB 与 TX-100 分子头基间相互嵌入,在溶液中形成混合胶束,此时 CTAB 与 TX-100 分子构成的聚集体与羧酸类物质形成的离子对从油湿性固体表面解吸附并增溶于混合胶束中,使油湿性固体表面的润湿性向水湿方向转化。

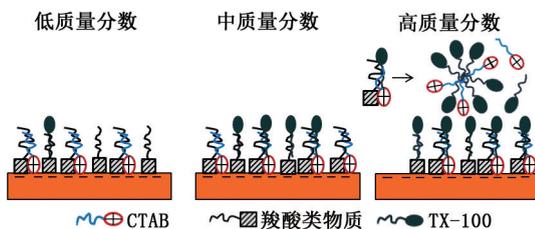


图 7 阳非离子复合表面活性剂 CTAB/TX-100 改变油湿性砂岩表面润湿性吸附模型

Fig. 7 Adsorption model of mixed cationic-nonionic surfactant CTAB/TX-100 on oil-wet sandstone surface

在 Zhang^[15]等提出的阳离子/非离子复合表面活性剂改变水湿性膨润土表面润湿性的吸附模型中,在低质量分数条件下,阳离子表面活性剂溴代十六烷基吡啶(HDPB)分子通过静电引力吸附于带负电的膨润土表面,非离子表面活性剂的亲水头基通过氢键和偶极作用吸附于膨润土表面。由于静电引力强于氢键和偶极作用,因此 HDPB 与 TX-100 间同样存在强烈的竞争吸附,且 HDPB 的吸附量较高。随表面活性剂质量分数的升高,TX-100 分子通过疏水作用与已经吸附在膨润土表面的 HDPB 分子及 TX-100 分子形成聚集体,从而提高了 HDPB 及 TX-100 的吸附量。当溶液中形成混合胶束时,聚集体在固-液界面的吸附达到平衡,并不会从固体表面解吸附。

基于上述结果提出阳离子/非离子复合表面活性剂改变油湿性砂岩表面润湿性的机制。CTAB 与 TX-100 间存在良好的协同效应,预先吸附的 CTAB 分子像锚一样吸附在油湿性砂岩表面,TX-100 分子通过疏水作用与其形成聚集体,从而提高了 TX-100 及 CTAB 在油湿性砂岩表面的吸附量。TX-100 的存在也促进了混合胶束的形成及 CTAB 与油湿性砂岩表面羧酸类物质形成离子对的能力,并使离子对的解吸附能力更强,因此改变油湿性砂岩表面润

湿性的效果更显著^[15-16]。

3 结 论

(1) 阳离子/非离子复合表面活性剂 CTAB/TX-100 改变油湿性砂岩表面润湿性的效果比单一阳离子表面活性剂 CTAB 及非离子表面活性剂 TX-100 更显著。

(2) 阳离子/非离子复合表面活性剂 CTAB/TX-100 改变油湿性砂岩表面润湿性的机制为 CTAB 与 TX-100 间存在复配协同效应, TX-100 分子通过疏水作用与已经吸附在油湿性砂岩表面的 CTAB 分子形成聚集体, 同时提高了 CTAB 与 TX-100 在油湿性砂岩表面的吸附量。TX-100 的存在也促进了 CTAB 与油湿性砂岩表面羧酸类物质形成离子对的能力, 并使离子对的解吸附能力更强, 因此使油湿性砂岩表面润湿反转的效果更显著。

参考文献:

- [1] WANG Y, XU H, YU W, et al. Surfactant induced reservoir wettability alteration: recent theoretical and experimental advances in enhanced oil recovery[J]. *Petroleum Science*, 2011, 8(4): 463-476.
- [2] ZHANG D L, LIU S, PUERTO M, et al. Wettability alteration and spontaneous imbibition in oil-wet carbonate formations[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2006, 52(1/2/3/4): 213-226.
- [3] MOHAN K, GUPTA R, MOHANTY K K. Wettability altering secondary oil recovery in carbonate rocks[J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25(9): 3966-3973.
- [4] 蒋平, 张贵才, 葛际江, 等. 润湿反转机制的研究进展[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2007, 22(6): 78-84.
JIANG Ping, ZHANG Guicai, GE Jijiang, et al. Progress in the research of wettability reversal mechanism[J]. *Journal of Xi'an Shiyou Institute(Natural Science Edition)*, 2007, 22(6): 78-84.
- [5] STANDNES D C, AUSTAD T. Wettability alteration in chalk(2): mechanism for wettability alteration from oil-wet to water-wet using surfactants[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2000, 28(3): 123-143.
- [6] HOU B F, WANG Y F, HUANG Y. Mechanistic study of wettability alteration of oil-wet sandstone surface using different surfactants[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 330: 56-64.
- [7] JARRAHIAN K, SEIEDI O, SHEYKHAN M, et al. Wettability alteration of carbonate rocks by surfactants: a

- mechanistic study[J]. *Colloids & Surfaces A Physico-chemical & Engineering Aspects*, 2012, 410(18): 1-10.
- [8] 侯宝峰, 王业飞, 曹绪龙, 等. CTAB 改变油湿性砂岩表面润湿性机制的研究[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 30(5): 95-100.
HOU Baofeng, WANG Yefei, CAO Xulong, et al. Study on the mechanism of CTAB changing the wettability of oil wet sandstone[J]. *Journal of Xi'an Shiyou Institute(Natural Science Edition)*, 2015, 30(5): 95-100.
 - [9] GUPTA R, MOHANTY K K. Wettability alteration mechanism for oil recovery from fractured carbonate rocks[J]. *Transport in Porous Media*, 2011, 87(2): 635-652.
 - [10] GOLABI E. Chemical induced wettability alteration of carbonate reservoir rocks [J]. *International Journal of Chemical Studies*, 2009, 6: 66-73.
 - [11] XU Q, VASUDEVAN T V, SOMASUNDARAN P. Adsorption of anionic-nonionic and cationic-nonionic surfactant mixtures on kaolinite [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 1991, 142(2): 528-534.
 - [12] HUANG L, MALTESH C, SOMASUNDARAN P. Adsorption behavior of cationic and nonionic surfactant mixtures at the alumina-water interface [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 1996, 177(1): 222-228.
 - [13] HARI A C, PARUCHURI R A, SABATINI D A, et al. Effects of pH and cationic and nonionic surfactants on the adsorption of pharmaceuticals to a natural aquifer material [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(8): 2592-2598.
 - [14] ZHOU Q, SOMASUNDARAN P. Synergistic adsorption of mixtures of cationic gemini and nonionic sugar-based surfactant on silica [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2009, 331(2): 288-294.
 - [15] ZHANG Y, ZHAO Y, ZHU Y, et al. Adsorption of mixed cationic-nonionic surfactant and its effect on bentonite structure [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(8): 1525-1532.
 - [16] ZHAO S, HUANG G, AN C, et al. Enhancement of soil retention for phenanthrene in binary cationic gemini and nonionic surfactant mixtures: characterizing two-step adsorption and partition processes through experimental and modeling approaches [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 286: 144-151.
 - [17] 王业飞, 徐怀民, 齐自远, 等. 原油组分对石英表面润湿性的影响与表征方法 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(5): 155-159.
WANG Yefei, XU Huaimin, QI Ziyuan, et al. Effects of crude fractions on quartz surface wettability and characterization method [J]. *Journal of China University of Pe-*

- troleum(Edition of Natural Science),2012,36(5):155-159.
- [18] QI Z, WANG Y, HE H, et al. Wettability alteration of the quartz surface in the presence of metal cations[J]. Energy Fuels, 2013,27(12):7354-7359.
- [19] 梁文杰. 石油化学[M]. 东营:中国石油大学出版社,2009.
- [20] 于维钊,乔贵民,张军,等. 沥青质在石英表面吸附行为的分子动力学模拟[J]. 石油学报(石油加工), 2012,28(1):76-82.
- YU Weizhao, QIAO Guimin, ZHANG Jun, et al. Molecular dynamics simulation of asphaltene adsorption on quartz surface[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section),2012,28(1):76-82.
- [21] 王所良. 低界面张力体系改变岩石润湿性机制研究[D]. 青岛:中国石油大学,2011.
- WANG Suoliang. Research of rock wettability alteration mechanisms concerning low interfacial tension system [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2011.

(编辑 刘为清)