

文章编号:1674-2974(2016)06-0117-07

低聚季铵盐对聚驱采出水包油乳状液破乳机理^{*}

吴亚^{1,2}, 陈世军¹, 陈刚^{1†}, 徐家业¹

(1. 西安石油大学 化学化工学院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西师范大学 化学化工学院, 陕西 西安 710062)

摘要:针对聚驱采出的高含水原油乳状液稳定性强、油水分离困难,采用瓶试法筛选出一类对含聚乳状液油水分离性能极好的破乳剂低聚季铵盐 I,当 I 加量浓度为 25 mg/L 时,55 °C 破乳进行到 60 min 时,脱水率达 96.5%,与常规的聚醚或多胺类破乳剂相比,乳状液脱出水色透明澄清,油水界面齐。通过光学显微镜、动态分析仪、接触角测量从微观和宏观分析研究了低聚季铵盐 I 对乳状液的作用机理。研究表明,相比常规的聚醚或多胺破乳剂,低聚季铵盐 I 对聚驱采出水包油乳状液油滴聚结速度更快;自由水层在油滴聚结分离区占主导作用的是不稳定机制,低聚季铵盐 I 使乳状液中油滴发生向上的迁移运动而非絮凝沉降,有利于脱出游离水的分离和水质的提高;接触角测量表明低聚季铵盐 I 使乳状液处理的岩石表面转向水湿状态,对乳化膜的强润湿改变性能导致液膜破裂,油水分离。

关键词:低聚季铵盐;水包油乳状液;光学显微镜;稳定性分析;润湿性

中图分类号:O647.2;TE357.46

文献标识码:A

Demulsification Mechanism of O/W Emulsion Containing Polymer using Oligomeric Quaternary Ammonium Salt

WU Ya^{1,2}, CHEN Shi-jun¹, CHEN Gang^{1†}, XU Jia-ye¹

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an Shiyou Univ, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Shaanxi Normal Univ, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

Abstract: To address polymer flooding emulsion in high water cut crude oil demulsification and oil-water separation, the bottle test method for the screening of a class of polymer containing liquid oil-water separation was used and the oligomeric quaternary ammonium salt I was found to show excellent demulsification performance. When ammonium salt I was added with the concentration of 25 mg/L, and the emulsion was demulsified at 55 °C for 60 min, the dehydration rate reached 96.5%. Compared with conventional polyether or polyamines demulsifiers, the quaternary ammonium salt I made the solution clearer and oil-water interface neater. The mechanism of the quaternary ammonium salt I affecting the emulsion was studied with optical microscope, dynamic analyzer and contact angle analyses. It was shown that free water in the oil droplet coalescence separation zone accounting for a leading role was instable and the emulsion oil droplet moved upward when oligomeric quaternary ammonium salt I was added to polymer flooding produced water. Being immersed, the solution of ammonium salt I on the surface of the pore core turned to water wet state. The result showed that changes of the interfacial wettability of the pore core on the membrane emulsification of

^{*} 收稿日期:2015-08-11

基金项目:高等学校学科创新引智计划(B14041);国家自然科学基金资助项目(21571121, 21376189), National Natural Science Foundation of China(21571121, 21376189);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2016JQ2040)

作者简介:吴亚(1979-),女,河南淮阳人,西安石油大学讲师,陕西师范大学博士(后)

† 通讯联系人,E-mail:gangchen@xsyu.edu.cn

strong dissolving capacity might lead to the rupture of the liquid film and oil-water separation. The contact angle measurement showed that the salt I of the liquid surface of the emulsion changed to water wet state, the strong wettability of the emulsion film was caused by the change of the film breakup, and the oil water was successfully separated.

Key words: oligomeric quaternary ammonium salt; O/W emulsion; optical microscope; stability analysis; interfacial wettability

随着大部分油田进入高含水期,三次采油技术的普遍应用,通过使用性价比高的聚合物和表面活性剂的化学驱是一种非常重要的提高原油采收率的方法^[1].然而由于采出液中聚合物、表面活性剂、水不溶颗粒的相互作用,含聚合物的采出液成为一种复杂的油水体系,采出液的处理难度增大^[2].在原油脱水方面表现为:脱水率降低、油水界面不清晰、污水质量下降.脱水后 HPAM 使污水黏度增加、胶体电荷排斥力增强,乳化严重,油水分离速度减慢、净化难度加大^[3].加之 O/W 型乳状液的形成,残留的 HPAM 与阳离子型絮凝剂和混凝剂共存时影响絮凝沉降效果,导致污水含油量和悬浮物含量严重超标,处理后的含聚污水难以达到回注原地层的水质要求^[4].因此,研制破乳能力强、脱水速度快、脱水率高、脱水后污水质量好和适应含聚合物采出液的破乳助剂已成为聚驱采出液处理的研究方向.

化学助剂通常用来破坏原油乳状液的稳定性而实现破乳^[5-6].针对 O/W 型乳状液,20 世纪 80 年代后期以来,有效的破乳剂主要为有机胺类、阳离子聚丙烯酰胺类和阳离子聚醚型破乳剂^[7-8].它们用于高含水原油预脱离游离水或含油污水除油显示出很好的效果.对于聚合物驱采出液原油破乳剂的作用机理主要包括^[9-11]:聚合物驱原油破乳剂比常规破乳剂表面活性高,本身带正电,可以迅速分散到油水界面上,本身构成一个新的易破裂的界面膜,将原有的乳化剂形成的界面膜击破,使其稳定性大大降低,这种膜在电场力和重力沉降的作用下,发生了絮凝聚结使油水分离成层;破乳剂还可以与原油产出液中的聚合物发生作用,降低原油乳状液的粘度;破乳剂与憎水的乳化剂作用生成络合物,从而使乳化剂失去了乳化性能;聚合物驱原油破乳剂对乳化膜有很强的溶解能力,通过溶解使乳化膜破裂;亦可以中和油水界面膜上的电荷,破坏受电荷保护的界面膜,这都促进了油滴的聚结分离.可以说化学破乳剂与 O/W 型乳状液的作用是一个复杂的动态过程,对于某种特定类型的原油乳液和破乳剂而言,破乳作用机理可能是多种机理并存或是某种破乳机理起

主要作用^[12].然而关于聚驱采出 O/W 型乳状液微观和宏观破乳机理却很少研究.

本研究采用瓶试法筛选出针对聚驱采出 O/W 型乳状液油水分离效果最佳的破乳剂,并通过光学显微镜、动态分析仪、接触角测量从微观和宏观分析研究该类破乳剂对 O/W 型乳状液破乳过程和作用机理,以期为解决聚驱采出 O/W 型乳状液的破乳和污水处理问题作出建设性指导.

1 实验方法

1.1 实验药品

实验用阳离子低聚季铵盐 I(相对分子质量 $1 \times 10^3 \sim 3 \times 10^3$) 为实验室自制,合成、表征见文献^[13].U-3 油溶性破乳剂,PA-0930, JM-1527, AE-933 和 AE-10 为水溶性破乳剂,均为实验室自制^[6].

1.2 实验方案及步骤

1.2.1 模拟含聚油田污水的配制

配制矿化度为 2 000 mg/L 的模拟油田污水:将聚合物聚丙烯酰胺缓慢加入到 2 000 mL 去离子水中,搅拌 1 h,加入预先称量的 NaCl, CaCl₂ · 2H₂O, 异丁醇和烷基磺酸盐表面活性剂,搅拌 30 min,配制成模拟含聚油田污水,主要组分如表 1 所示.

表 1 模拟聚驱采出水组分及浓度
Tab. 1 Concentrations in simulated produced water from polymer flood

组分	质量分数/%
NaCl	1.00
CaCl ₂ · 2H ₂ O	0.18
烷基磺酸盐表面活性剂	0.05
聚合物	0.12
异丁醇	0.40

1.2.2 乳状液的配制

分别在 135 mL 已配制好的矿化度为 2 000 mg/L 模拟聚驱采出水中加入预先称量好的 15 mL 原油,配制成 150 mL 的溶液,配制成的油:水(质

量比)为1:9,然后在55℃的恒温水浴锅中高速搅拌10 min,配制成乳状液.在55℃,60 min时,在150 mL乳状液的试剂瓶中分别加入8 mL相同量的破乳剂并记录破乳情况.

1.2.3 瓶试法破乳实验方案

瓶试法破乳实验方案如图1所示.预先用1.2.1中的“模拟油田水”配制成50 mg/L I破乳剂.然后给装有150 mL乳状液的试剂瓶中分别加入8 mL的阳离子低聚物季铵盐破乳剂,配制成破乳剂含量为50 mg/L,再置于55℃恒温水浴锅中高速搅拌3 min,分别记录0 min,15 min,30 min和60 min的破乳情况,并观察60 min时的油水界面、脱出水颜色及挂壁情况.

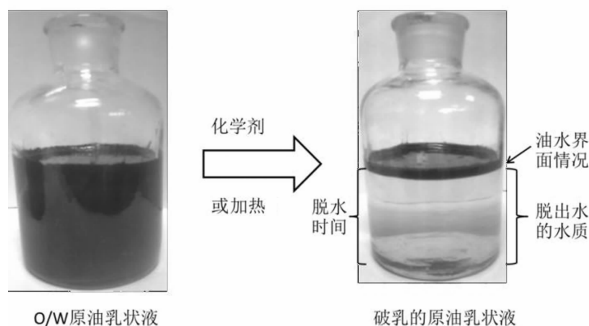


图1 瓶试法实验方案
Fig.1 Bottle test experiment

1.2.4 光学显微镜分析

采用日本 Olympus BX-51 型光学显微镜进行分析.当破乳情况进行到70%时,即在实验进行到约45 min时,用1 mL的带针头的针管吸取下层的水溶液,滴到载玻片上,盖上载玻片,然后迅速在光学显微镜下观察水溶液中的含油情况.

1.2.5 稳定性分析测试仪

利用 Turbiscan Lab4® Expert 稳定性分析仪研究了化学破乳过程.典型的步骤:将样品池放入稳定性分析测试仪(AGS)内进行测量.测量参数是:温度为室温与25℃,扫描参数是每15 min扫描一次,扫描5 h.

1.2.6 接触角

采用 JC2000D 系列接触角测量仪考察1.2.2乳状液处理的石英样品表面的润湿性.将石英样品浸入1.2.2乳状液中,取出后真空烘干,在样品表面滴0.2 μL去离子水,停留1 min,测量接触角.

2 实验结果与讨论

2.1 不同破乳剂对聚驱采出水包油乳状液的破乳性能

利用瓶试法考察水溶性和油溶性破乳剂对聚驱采出水包油乳状液的破乳性能.图2显示在55℃,60 min时,在150 mL乳状液的试剂瓶中分别加入8 mL相同量的破乳剂时的破乳情况.从图中可以看出,与空白组进行比较,尽管所选的水溶性和油溶性破乳剂均能不同程度地破坏乳状液的稳定性,然而3号样阳离子季铵盐I脱出水最清,且油水界面最齐.



图2 不同破乳剂60 min时
对含聚水包油乳状液的破乳性能
Fig.2 Demulsification effect of different
demulsifiers for 60 min

2.2 低聚季铵盐 I 破乳情况比较

从图3和表2可以看出,I在25 mg/L 60 min时脱水率达96.5%,且脱出水清,油水界面齐.30 min时脱水率在90%以上,脱水速度快.总之,低聚季铵盐是一类针对聚驱采出水包油乳状液.



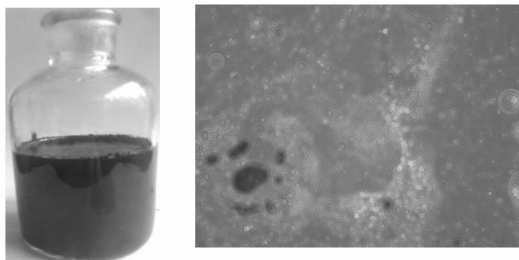
图3 低聚季铵盐 I 在 15 mg/L, 25 mg/L,
35 mg/L, 50 mg/L 60 min 时的破乳情况
Fig.3 The demulsification effect in 15 mg/L, 25 mg/L,
35 mg/L, 50 mg/L of I for 60 min, respectively

表2 季铵盐 I 在 55℃ 破乳情况
Tab.2 The demulsification effect of I at 55℃

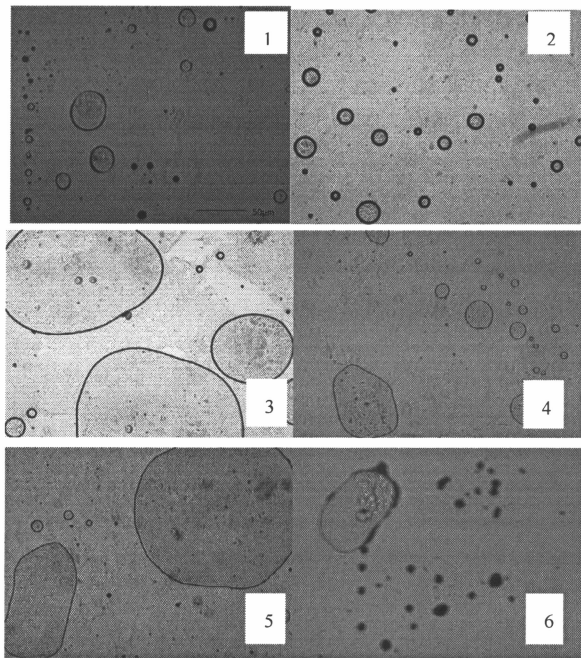
序号	I 质量浓度 (mg · L ⁻¹)	不同时间的脱水率/%			界面 状态	脱出 水色
		15 min	30 min	60 min		
1	15	67.3	85.3	93.0	齐	清
2	25	72.1	90.6	96.5	齐	清
3	35	70.3	90.1	96.9	齐	清
4	50	71.7	89.3	94.9	齐	清

2.3 光学显微镜分析乳状液脱稳机理

通过在光学显微镜下观察水包油乳状液的含油情况能够很好地给出油水界面的破乳剂的作用性能^[9].图4分别为25℃空白组和不同破乳剂PA-0930, JM-1527, I, AE-933, AE-10, U-3样品的破乳45 min时的光电子照片.



空白组 45 min 时的光电子照片



1. PA-0930; 2. JM-1527; 3. I; 4. AE-933; 5. AE-10; 6. U-3

图4 25℃不同破乳剂破乳45 min时的光电子照片

Fig. 4 The demulsification optoelectronic photos for 45min at 25℃

不同破乳剂 PA-0930, JM-1527, I, AE-933, AE-10, U-3 在 Olympus 光学显微镜下所拍摄的光电照片不同,从图片明显看出加入低聚季铵盐 I 使乳化液油滴相互吸引,快速出现大的鱼卵状“聚集体”,乳液液滴直径最大可达约 200 μm (图 2(a)). 光电子显微镜分析乳状液稳定性结果与瓶试法结果是一致的. 在含聚的 O/W 的乳状液内部油滴发生聚集和聚并,由于低聚季铵盐带正电荷,在破乳脱水过程中

依靠电中和作用使油滴脱稳,油滴互相聚并形成大油滴,当油滴粒径增大到一定水平时,乳状液实现破乳,从而导致油水两相分离.

2.4 稳定性分析测试

研究化学破乳过程,稳定性分析仪可以定性判断乳状液内部液滴的聚集、聚并、沉淀和上浮等情况,并可对破乳过程中模型乳状液各部分的变化速率、内部液滴的粒径大小等进行定量分析,有助于分析乳状液的破乳机理^[14].

我们选择 I 和 AE-933 对来自延长区块原油乳状液的稳定性进行分析. 配制油水比为 1:9 的乳状液进行稳定性分析如图 5 所示. 当在油水比为 1:9 的乳状液中加入 I 和 AE-933 时,稳定性分析曲线分别如图 6 和图 7 所示. 从图 5 可以看出,样品最初是均匀的水包油乳液,随着时间的推移,样品发生自然破乳现象,样品中的水包油乳滴由于水的密度大发生向下迁移现象,而油的密度小发生向上浮的现象,最终在样品池底部出现透光层(当透射光大于 0.2%时,要看透射光谱),说明有水在析出,而样品池顶部出现明显向上的峰,光强值明显增加,这是由于样品中油滴上浮引起的,随后顶部光强值又出现降低,这是由于油包水乳液在这过程中最顶部的基本为纯油. 比较 3 个样品的稳定性情况,从图 5~图 7 中可以看到,油水比 1:9 空白样、油水比 1:9 加入 I 和油水比 1:9 加入 AE-933 的 3 个样品的不稳定现象均有分层现象,澄清现象和颗粒粒径的变化,然而 3 个样品的稳定性指数存在差异. 在 1 h 内,原油 O/W 型模型乳状液加入季铵盐整体表现出更不稳定,更加容易失稳,说明加入季铵盐的样品有明显的分层和顶部澄清或上浮的现象和粒径变化. 从澄清区变化上看,加入季铵盐乳状液的澄清区形成得更快,体积更大. 这一现象是不能由瓶试法得到的,在 O/W 型模型乳状液底部发生液滴迁移,分别为水相的下沉和油相的上浮. 乳状液中部(背散射光光强度)BS 值逐渐减小,表明其内部的小液滴逐渐聚集到一起,小液滴逐渐聚结成大大液滴,发生的是聚集和聚并现象,推测破乳机理是内部油滴发生聚集和聚并,当粒径增大到一定水平时,乳状液实现破乳. 同时低聚季铵盐不同于阳离子型絮凝剂和混凝剂,油滴之间的聚结破乳滞后于油滴的絮凝,有效克服含聚污水中聚合物的阻碍作用.

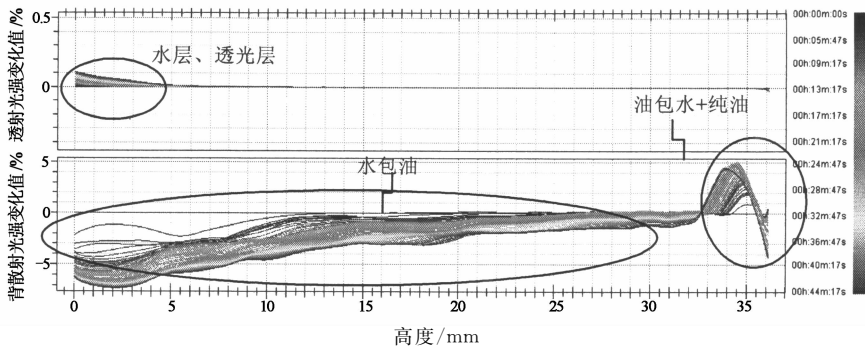


图 5 油水比-1 : 9 样品的背散射光强变化曲线
Fig. 5 The back light and scattered light intensity curve at oil/water ratio 1 : 9 without demulsifiers

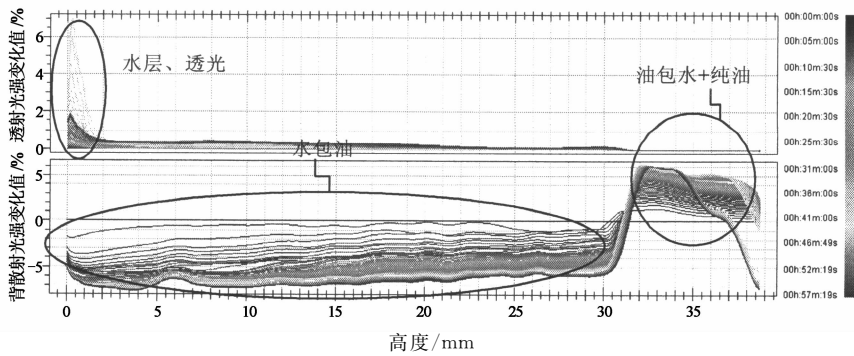


图 6 油水比-1 : 9 样品加入 I 的背散射光强变化曲线
Fig. 6 The back light and scattered light intensity curve at oil/water ratio 1 : 9 with I

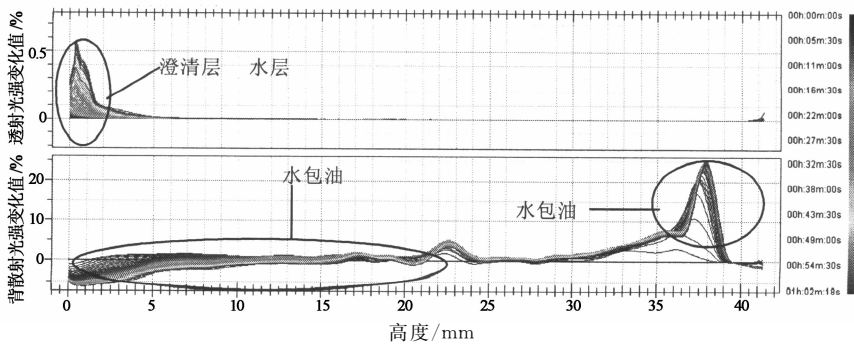


图 7 油水比-1 : 9 样品加入 AE-933 的背散射光强变化曲线
Fig. 7 The back light and scattered light intensity curve at oil/water ratio 1 : 9 with AE-933

可以用简单的稳定性动力学指数的值表征整个体系的稳定性. 稳定性动力学曲线的计算公式为:

$$d_1 = \frac{\sum_h |scan_i(h) - scan_{i-1}(h)|}{H}$$

动力学曲线是基于以下计算而得的, 在选定的高度, 比较每一次扫描测量对前一次扫描测量的光强度的变化, 并将结果累计至样品总高度而获得一个结果, 它不依赖于产品的数量. 稳定性系数是一个纯粹的数学差值的计算公式, 它反映的是样品在

整个放置时间浓度和颗粒粒径的变化幅度的综合. 变化幅度越大, 稳定性动力学指数越大, 系统就越不稳定. 从图 8 中可以看出, 3 个样品的稳定性指数存在差异, 油水比-1 : 9+I 的分层破乳最迅速, 其次是油水比-1 : 9+AE-933. 取 30 min 时样品的稳定性指数求平均值如表 3 所示. 从表 3 可以看出样品的破乳效果, 油水比-1 : 9+I 的破乳效果更好, 破乳快.

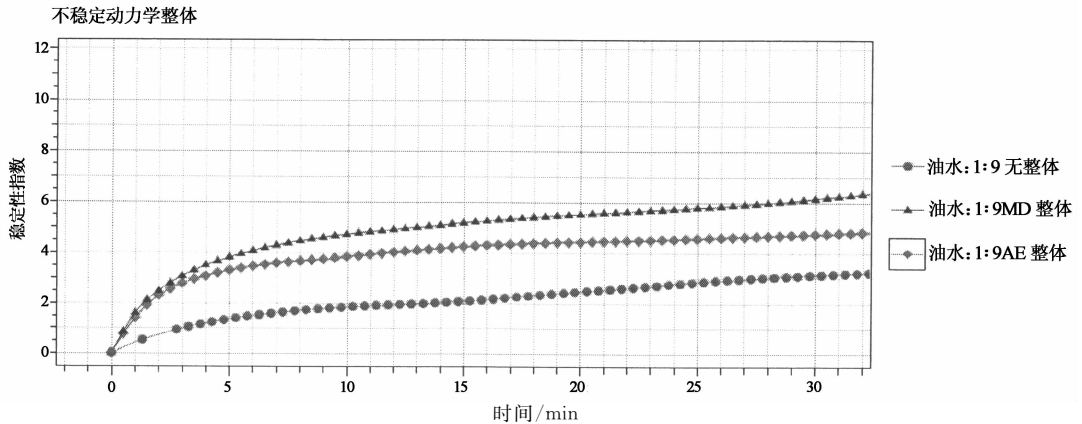


图8 低聚季铵盐 I(MD), AE-933 和无破乳剂的 3 个样品稳定性指数的比较

Fig. 8 The stability index of the emulsion adding I(MD) and AE-933 and no demulsifier respectively

表 3 低聚季铵盐 I, AE-933 和无破乳剂 3 个样品的 TSI 值

Tab. 3 TSI value of I, AE-933 and no demulsifier

Measurement	TSI (Global) -30 min	TSI (top) -30 min	TSI (middle) -30 min	TSI (bottom) -30 min
油水比-1:9	3.1	1.9	2.1	5.6
油水比-1:9+I	6.1	5.1	5.6	7.6
油水比-1:9+AE	4.7	7.3	2.7	4.3

2.5 润湿性分析

润湿性是固相粒子-流体间相互作用的重要特性,润湿性翻转也是衡量破乳剂性能的重要指标.正电性的季铵盐 I 向乳化液扩散并渗透到固体粒子之间的保护层时,易吸附在固体粒子表面,如沥青胶质粒子、石蜡晶粒、黏土粒子和金属盐粒子水滴表面而改变表面润湿性能,破坏保护层上粒子间的接触,使界面膜强度剧烈降低而破裂.通过乳状液处理的岩心模拟体系中存在的界面,经过测定接触角反映低聚季铵盐对乳状液界面的作用.图 9 可以明显地看

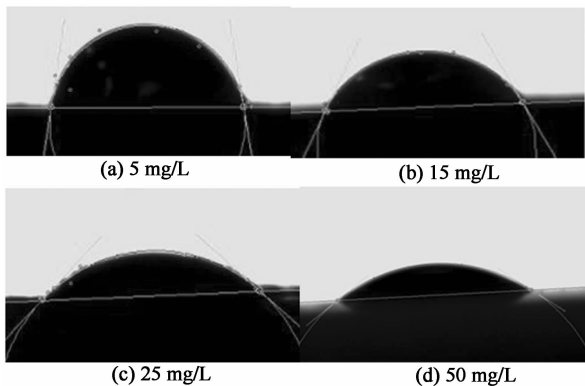


图 9 不同加量季铵盐 I(5 mg/L, 15 mg/L, 25 mg/L, 50 mg/L)对岩石表面润湿状态影响 (80.7°, 64.3°, 42.7°, 35.2°)

Fig. 9 Change of surface wettability with different dosage quaternary ammonium salt I (5 mg/L, 15 mg/L, 25 mg/L, 50 mg/L)

出低聚季铵盐的加入使岩石表面润湿性向水湿翻转(接触角从 80.7°到 35.2°).与表面活性剂破乳剂对乳状液界面膜的作用不同,虽然低聚季铵盐为非表面活性物质,由于其带正电,有利于中和带负电的颗粒或液滴,先脱稳,再通过对接界面膜的强润湿翻转能力,将原有的乳化剂形成的界面膜击破,在电场力和重力沉降的作用下,发生絮凝聚结使油水分离成层^[15].

3 结论

1)通过瓶试法获得了一种破坏聚驱采出水包油乳状液稳定性的高效快速的破乳剂低聚季铵盐,当季铵盐 I 浓度为 25 mg/L 时,55 °C 破乳进行到 60 min 时,脱水率达 96.5%,且油水界面齐,脱出水色透明澄清.

2)通过乳状液破乳过程的光电子显微图像分析表明,与聚醚或多胺破乳剂相比季铵盐对聚驱采出水包油乳状液油滴聚结速度更快;稳定性分析乳状液的动态聚并过程结果表明凝析油加入季铵盐 I 有分层和顶部澄清或上浮的现象和粒径变化,自由水层在油滴聚结分离区占主导作用的是不稳定机制,低聚季铵盐 I 使乳状液中油滴发生向上的迁移运动而非絮凝聚降,有利于脱出游离水的分离和水质的提高;接触角测量表明低聚铵盐 I 不同于阳离子表面活性剂破乳剂,它使乳状液处理的岩石表面转向水湿状态,对乳化膜的强润湿改变性能导致液膜破裂,油水分离.本研究从微观和宏观分析研究了低聚季铵盐 I 对乳状液的作用机理,为解决聚驱采出的高含水原油乳状液稳定性强、油水分离困难问题提

拱了有益的理论指导。

参考文献

- [1] HIRASAKI G J, MILLER C A, RANEY OLINA G, *et al.* Separation of produced emulsions from surfactant enhanced oil recovery processes[J]. *Energy Fuels*, 2011, 25: 555–561.
- [2] 张维, 李明远, 林梅钦, 等. 电导率与 O/W 乳状液的稳定性[J]. *石油学报(石油加工)*, 2008, 24(5): 592–597.
ZHANG Wei, LI Ming-yuan, LIN Mei-qin, *et al.* Effect of drilling mud infiltration on water flooding behavior of reservoir rocks[J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2008, 24(5): 592–597. (In Chinese)
- [3] 何焕杰, 王中华, 王永红, 等. 国内油田三次采油聚合物驱采出液处理技术研究进展[J]. *石油炼制和化工*, 2002, 33(9): 29–32.
HE Huan-jie, WANG Zhong-hua, WANG Yong-hong, *et al.* Advance of treatment technology for produced water from polymer flooding reservoir enhanced oil recovery in China[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2002, 33(9): 29–32. (In Chinese)
- [4] 孙玉鹏, 朱瑞龙. 含聚合物原油乳液破乳剂的研究[J]. *应用化工*, 2015, 44(2): 271–272.
SUN Yu-peng, ZHU Rui-long. Polymer containing crude oil demulsifier effluence research[J]. *Applied Chemical Industry*, 2015, 44(2): 271–272. (In Chinese)
- [5] NGUYEN D, SADEGHI N, HOUSTON C. Chemical interactions and demulsifier characteristics for enhanced oil recovery applications[J]. *Energy Fuels*, 2012, 26: 2742–2750.
- [6] 陈和平, 徐家业, 张群正. 破乳剂发展的新方向[J]. *石油与天然气化工*, 2001, 30(2): 92–95.
CHEN He-ping, XU Jia-ye, ZHANG Qun-zheng. New development directions of demulsifier[J]. *Chemical Engineering of Oil and Gas*, 2001, 30(2): 92–95. (In Chinese)
- [7] CHRISTINE Dalmazzone. Development of new green demulsifiers for oil production[C]//Society of Petroleum Engineers Inc. SPE65041:1–9.
- [8] GU L, ZHU S, HRYMAK A N. Synthesis and flocculation performance of graft copolymer of N-vinyl for amide and poly (dimethylaminoethylmethacrylate) methyl chloride macromonomer[J]. *Colloid Polym Sci*, 2002, 280:167–175.
- [9] ERICA P, DAVID H, FAN Yang, *et al.* Demulsification mechanism of asphaltene-stabilized water-in-oil emulsions by a polymeric ethylene oxide-propylene oxide demulsifier[J]. *Energy Fuels*, 2014, 28: 6760–6771.
- [10] 肖中华. 原油乳状液破乳机理及影响因素研究[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2008, 30(4):165–168.
XIAO Zhong-hua. Demulsification mechanism of crude oil emulsion and its influential factors[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(4):165–168. (In Chinese)
- [11] 任妍君, 蒋官澄, 郑杜建, 等. 聚氧乙烯脂肪胺乳状液性能——不同 pH 值清洗条件下对硅酸盐岩储集层润湿性、渗透性的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1):1–4.
REN Yan-jun, JIANG Guan-cheng, ZHENG Du-jian, *et al.* Characteristics of ethoxylated fatty amine emulsion: Effects on the wettability and permeability of silicate formation under various pH conditions[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1):1–4. (In Chinese)
- [12] 孙春柳, 康万利, 刘卫东, 等. 影响原油乳状液稳定性的因素研究[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2010, 32(2): 134–137.
SUN Chun-liu, KANG Wan-li, LIU Wei-dong, *et al.* Studies on the factors affecting crude oil emulsion stability[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(2): 134–137. (In Chinese)
- [13] 吴亚, 陈世军, 徐家业, 等. 低聚季铵盐在岩心上的吸附行为分析[J]. *油田化学*, 2013, 30(3): 358–361.
WU Ya, CHEN Shi-jun, XU Jia-ye, *et al.* Analysis of the absorption behavior of oligomeric quaternary ammonium salt on sandstone surface[J]. *Oilfield Chemistry*, 2013, 30(3): 358–361. (In Chinese)
- [14] 黄翔峰, 程航, 陆丽君, 等. 利用稳定性分析仪研究化学破乳过程[J]. *化工进展*, 2010, 29(5): 825–830.
HUANG Xiang-feng, CHENG Hang, LU Li-jun, *et al.* Investigation of chemical demulsification process by stability analyzer[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2010, 29(5): 825–830. (In Chinese)
- [15] 鄢捷年. 油藏岩石润湿反转与储层损害[J]. *油田化学*, 1991, 8(4): 342–350.
YAN Jie-nian. Wettability reversal of reservoir rocks and formation damage[J]. *Oilfield Chemistry*, 1991, 8(4): 342–350. (In Chinese)