

The Influence Study on Stability of Oil-Based Drilling Fluids Emulsion

Ruibin He¹, Xuejing Liu², Tao Xie¹, Tie Geng², Pinghua Dong¹

¹China National Offshore Oil Corporation Tianjin Branch, Tianjin

²Oilfield Chemicals Division, China Oilfield Services Limited, Yanjiao Hebei

Email: herb@cnooc.com.cn

Received: Mar. 10th, 2020; accepted: Apr. 13th, 2020; published: Jun. 15th, 2020

Abstract

In order to fully understand the influence on the stability of oil-based drilling fluid emulsion, emulsifiers PF-EMUL-2 and PF-COAT-2 were selected to prepare emulsion. The influence of emulsifier concentration, oil-water ratio, concentration and type of internal salt, type of base liquid and barite on emulsion stability were studied. The results show that, the emulsion stability increases with the increase of oil-water ratio, and compared with Na⁺, Ca²⁺ ions can improve the interfacial film strength of emulsion droplets. The study also shows that barite adsorbs some emulsifiers after high-temperature aging, which results in a decrease of emulsifying affection, so more emulsifiers should be added to stabilize the emulsion in high-density drilling fluid. All the studies provide theoretical basis for controlling the stability of oil-based drilling fluid system.

Keywords

Oil-Based Drilling Fluid, Emulsion, Microscopic Appearance, Average Particle Size, Stability

油基钻井液乳液稳定性影响因素研究

何瑞兵¹, 刘雪婧², 谢涛¹, 耿铁², 董平华¹

¹中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津

²中海油田服务股份有限公司油田化学事业部, 河北 燕郊

Email: herb@cnooc.com.cn

收稿日期: 2020年3月10日; 录用日期: 2020年4月13日; 发布日期: 2020年6月15日

摘要

为充分了解油基钻井液乳液稳定性影响因素, 选择了界面张力值低的乳化剂PF-EMUL-2与PF-COAT-2配制乳液。研究了乳化剂浓度、油水比、内相盐浓度与种类、基液种类以及重晶石对乳液稳定性的影响。研究发现, 3 wt% PF-EMUL-2与1 wt% PF-COAT-2复配时, 随着油水比增大, 乳液稳定性增强, 与Na⁺离子相比, Ca²⁺离子能提高乳液滴的界面膜强度。高温老化后重晶石吸附部分乳化剂, 造成乳化能力下降, 因此高密度钻井液中需加入较多的乳化剂稳定乳液。这些研究为控制油基钻井液体系的稳定性提供理论基础。

关键词

油基钻井液, 乳液, 微观形貌, 界面张力, 平均粒径, 稳定性

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

油基钻井液以其抗高温、抑制性强、润滑性好和对储层损害小的优点, 成为页岩气及非常规气藏开采过程经常使用的钻井液体系[1] [2] [3]。油包水钻井液用油量少, 降低生产成本幅度大, 成为常用的油基钻井液[4]。但是, 油包水钻井液为热力学不稳定体系, 在钻井过程中随着乳化剂的消耗, 会乳化失效[5]。且油基钻井液组成复杂, 影响乳液稳定性的因素多变, 因此研究油基钻井液乳液稳定规律成为重要内容。

乳化剂是配制油基钻井液的关键组分, 油基钻井液是否稳定很大程度上取决于该剂的合理使用[6] [7]。乳化剂形成的界面膜, 由于化学结构、相对分子质量、外界条件不同, 具有不同的流变特性和强度[8]。乳液中乳化剂浓度、油水比、内相盐等因素直接影响乳液滴大小及稳定性。

根据乳化剂筛选原则及界面张力值, 选择了2种适用于油基钻井液的乳化剂PF-EMUL-2与PF-COAT-2, 分析讨论了乳化剂浓度、油水比、盐浓度及种类、重晶石对油基钻井液乳液稳定性影响因素, 为控制油基钻井液体系的稳定性提供理论基础。

2. 试验材料与仪器

1) 试验材料 3#白油, 生物柴油, 气制油; 主乳化剂 PF-EMUL-1, PF-EMUL-2; 辅乳化剂 PF-COAT-1,

PF-COAT-2; 有机土 PF-MOGEL; 重晶石均取自天津中海油服化学有限公司; 氧化钙(分析纯), 氯化钠(分析纯)。

2) **试验仪器** WT-2000A 变频高速搅拌器; FANN 23E 破乳电压仪; OFITE 高温滚子炉; OFITE800 旋转黏度计; BS 323S 型电子天平; DM4000M 智能显微镜; Krüss-K12 程序表面张力仪。

3. 评价理论及方法

3.1. 乳液稳定理论

作为油基钻井液的重要组成部分, 乳化剂稳定乳液的主要原因如下:

1) **降低油水界面张力**乳化剂分子吸附在油水界面, 亲油基团伸向油相而亲水基团伸入水相, 从而能够抵消界面上的剩余表面自由能, 降低两相界面张力。

2) **形成坚固的界面膜**乳化剂吸附在油水界面, 能够形成具有一定强度的界面膜。按照吉布斯函数, 界面张力降低引起表面吉布斯自由能减少, 形成更紧密的分子排列, 从而增加吸附膜强度, 乳液体系趋于稳定; 增加液滴所带电荷, 乳液滴之间的排斥力随之增加, 使其在做无休止布朗运动时受到碰撞而不易破裂, 避免水珠变大。这也是使用 2 种或以上乳化剂在界面上形成“复合膜”提高乳化效果、增加乳液稳定性的主要原因之一。

3) **增加连续相黏度**乳化剂多属于亲油性乳化剂, 其非极性基团的截面直径大于极性基团。当主乳化剂在油相中的浓度超过 CMC (临界胶束浓度) 时, 乳化剂在油水界面层上的吸附量与油相内的分散量近乎动态平衡。而乳化剂浓度一般都会远大于其本身在油相中的 CMC, 因此会有较多乳化剂处于外相中, 从而增加外相黏度, 在一定程度上会影响油基钻井液体系的流变性能。

3.2. 乳液制备

固定油水比 8:2, 改变材料加量, 高速(10,000 r/min)搅拌混合后, 于常温条件下乳化 20 min; 取一部分于显微镜下观测样品乳液滴粒径; 另一部分于 150℃滚子炉老化 16 h, 观察乳液变化情况。

4. 影响因素与评价

4.1. 乳化剂选择

油水界面张力是考察界面组成、结构和性质的重要物理参数。界面张力能反映表面活性剂从油水两相向界面扩散和吸附的动态平衡过程。测量油水两相的界面张力对乳液的稳定性有十分重要的参考价值。采用吊环法检测了两套乳化体系乳化剂的界面张力值, 结果如表 1 所示。

Table 1. Effect of emulsifier on oil-water interfacial tension

表 1. 乳化剂对油水界面张力的影响

| 样品 | 界面张力/(mN·m ⁻¹) |
|-----------|----------------------------|
| PF-EMUL-1 | 16.8 |
| PF-COAT-1 | 3.2 |
| PF-EMUL-2 | 2.3 |
| PF-COAT-2 | 0.0 |

由表 1 可知, PF-COAT-2 降低油水界面张力的效果最好, 几乎接近于零; PF-EMUL-2 与 PF-COAT-1 降低油水界面张力的效果次之, 且两者相差不大; PF-EMUL-1 降低油水界面张力的效果最差。因此, 可

以推断 PF-EMUL-2 与 PF-COAT-2 复配乳化剂, 其降低油水界面张力的效果较好。PF-EMUL-2 与 PF-COAT-2 所配制乳液 150℃ 老化 16 h 后稳定性良好, 乳化效率 > 90%。故以下试验选择 PF-EMUL-2 与 PF-COAT-2 复配乳化剂展开研究。

4.2. 乳化剂浓度对乳液稳定性的影响

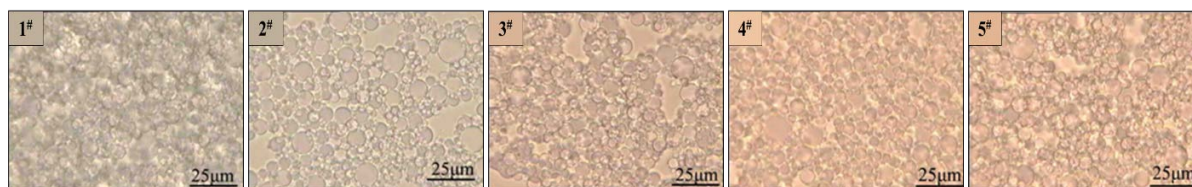
在乳液稳定性原理的研究中, 很早就提出有 2 种及以上的表面活性剂在界面上吸附, 通过乳化剂复配会形成一种复合界面膜。这种界面膜比单一的乳化剂所形成的界面膜更加紧密, 强度更高[9] [10] [11]。界面膜强度与乳化剂的加量直接关系界面膜强度, 影响乳液稳定性。

在 280 mL 气制油中, 控制辅乳化剂 PF-COAT-2 加量 1 wt% 不变; 再分别加入(1~4) wt% 主乳化剂 PF-EMUL-2, 加入 25 wt% CaCl₂ 水溶液 70 mL, 高速(10,000 r/min)搅拌 20 min, 装入老化罐中于 150℃ 老化 16 h 后, 观察老化前后乳液微观形貌及平均粒径。结果如表 2、图 1 所示。

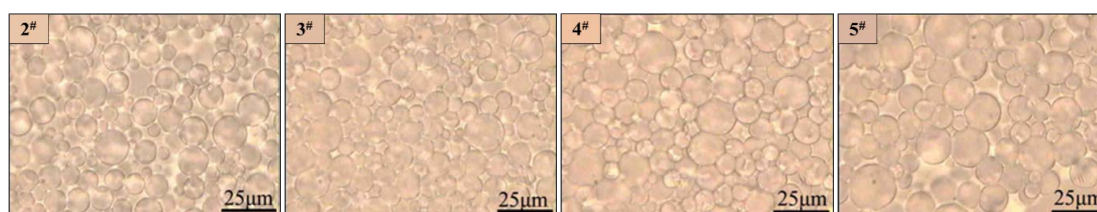
Table 2. The influence of the concentration of emulsifier on the average particle size of emulsion droplets

表 2. 乳化剂浓度对乳液滴平均粒径的影响

| 样品编号 | PF-EMUL-2/(wt%) | 平均粒径/ μm | | 聚并稳定性(24 h) |
|------|-----------------|---------------------|-------|-------------|
| | | 高温老化前 | 高温老化后 | |
| 1# | 1 | 6.3 | -- | 部分破乳 |
| 2# | 2 | 6.7 | 8.9 | 轻微破乳 |
| 3# | 2.5 | 5.9 | 8.9 | 轻微破乳 |
| 4# | 3 | 5.4 | 10.0 | 观察时聚并 |
| 5# | 4 | 5.4 | 11.4 | 观察时聚并 |



(a) 高温老化前



(b) 高温老化后

Figure 1. Microscope picture of the emulsion droplets

图 1. 乳液滴显微镜图片

由表 2、图 1(a)可以看出, 在高温老化之前, 乳液滴的聚并稳定性较高。由图 1(b)可见, 150℃ 老化 16 h 后, 1# 样品发生破乳现象, 有明显的油水分层, 没有必要再进行微观观察。其余 4 个样品乳液稳定性较好。PF-EMUL-2 加量较小时, 老化后出现破乳现象, 说明浓度较低时, 油水界面上吸附的分子较少, 水珠界面膜强度较低, 内相分子间频繁的碰撞极易使得液滴破裂合并变大, 从而使所形成的乳液不稳定。当乳化剂的浓度提高到一定程度后, 界面上形成有定向吸附的乳化剂分子紧密排列的界面膜, 乳液稳定

性得到提高。

4.3. 油水比对乳液稳定性的影响

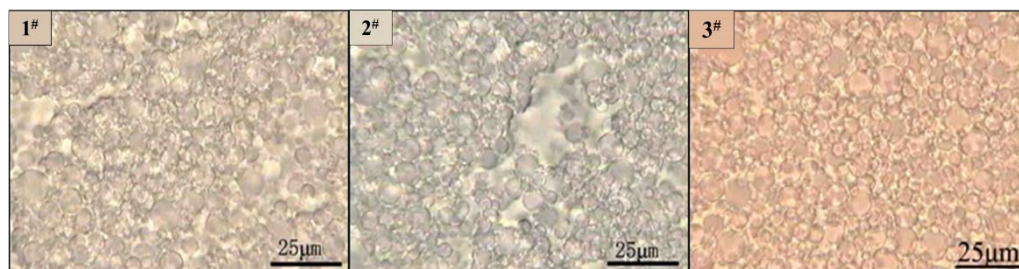
油水比是指乳液中油水之间的比例关系，水相所占的比例越小，乳液中分散液滴的密度越小，液珠碰撞聚结的几率就会有所下降。乳化剂浓度相同时，油水比较高的乳液中，表面活性剂分子平均吸附到油相与水珠之间的界面层的量就会更大，在油水界面上排列的更紧密，有利于形成更为稳定的乳液[12][13]。

在 280 mL 气制油中，加入 3 wt% PF-EMUL-2 和 1 wt% PF-COAT-2；再改变 25 wt% CaCl_2 水溶液的加量，调整油水比，高速(10,000 r/min)搅拌 20 min，装入老化罐中于 150℃老化 16 h 后，观察老化前后乳液微观形貌及平均粒径。结果如表 3、图 2 所示。

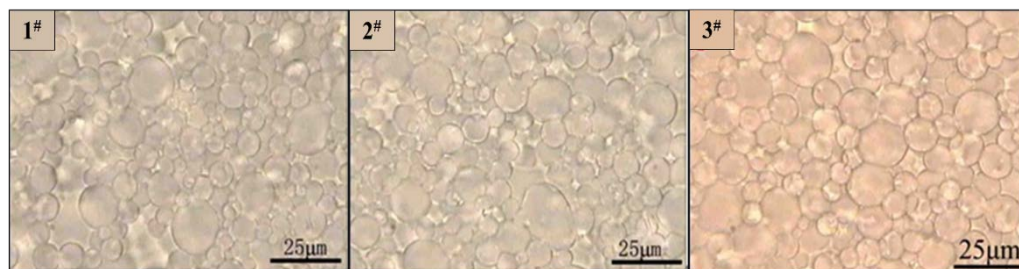
Table 3. Effect of oil-water ratio on the average particle size of emulsion droplets

表 3. 油水比对乳液滴平均粒径的影响

| 样品编号 | 油水比 | 平均粒径/ μm | |
|------|-----|---------------------|-------|
| | | 高温老化前 | 高温老化后 |
| 1# | 6:4 | 5.5 | 7.1 |
| 2# | 7:3 | 5.1 | 7.8 |
| 3# | 8:2 | 5.4 | 10.2 |



(a) 高温老化前



(b) 高温老化后

Figure 2. Microscope photo of different oil-water emulsion droplets

图 2. 不同油水乳液滴显微镜照片

乳化剂浓度相同且油水比为 5:5 时，乳液有明显的油水分层现象；可能是因为较高水相含量时，乳化剂不足以降低 2 种液体间界面张力而使混合体系达到稳定的作用，导致油水分层。高温老化前油水比为 6:4、7:3、8:2 的乳液粒径相差不大，均在 5~6 μm 范围内。经过 150℃老化 16 h 后，各样品粒径均有明显的增加；其中油水比 8:2 的乳液粒径增加最明显，几乎增大了 1 倍。可以说明，油水比越高的乳液，界面层上乳化剂分子密集程度高，程现出较高的稳定性。

4.4. 盐浓度对乳液稳定性的影响

内相电解质的浓度与地层活度平衡,才能有利于井壁稳定和钻井顺利。通常采用 NaCl 或 CaCl₂ 调节,其中 Ca²⁺加强液滴界面强度效果更好,高温下 Ca²⁺能与乳化剂结合,更有利于乳液稳定[14] [15] [16]。且二价金属皂有利于形成 W/O 型乳状液,所以使用 CaCl₂ 调节活度,更易形成更加稳定的 W/O 型乳状液。

在 280 mL 气制油中,加入 3 wt% PF-EMUL-2 和 1 wt% PF-COAT-2;再分别加入浓度不同的 CaCl₂ 水溶液,保持油水比 8:2,高速(10,000 r/min)搅拌 20 min,装入老化罐中于 150℃老化 16 h 后,观察老化前后乳液微观形貌及平均粒径。结果如表 4、图 3 所示。

Table 4. The influence of the concentration of CaCl₂ on the average particle size of emulsion droplets

表 4. CaCl₂ 浓度对乳液滴平均粒径的影响

| 样品编号 | CaCl ₂ 浓度/(wt%) | 平均粒径/μm | |
|------|----------------------------|---------|--------|
| | | 高温老化前 | 高温老化后 |
| 1# | 0 | 7.4 | (油水分离) |
| 2# | 10 | 3.4 | (油水分离) |
| 3# | 15 | 4.7 | (油水分离) |
| 4# | 20 | 4.7 | 10.7 |
| 5# | 25 | 5.4 | 10.0 |
| 6# | 30 | 5.3 | 7.2 |

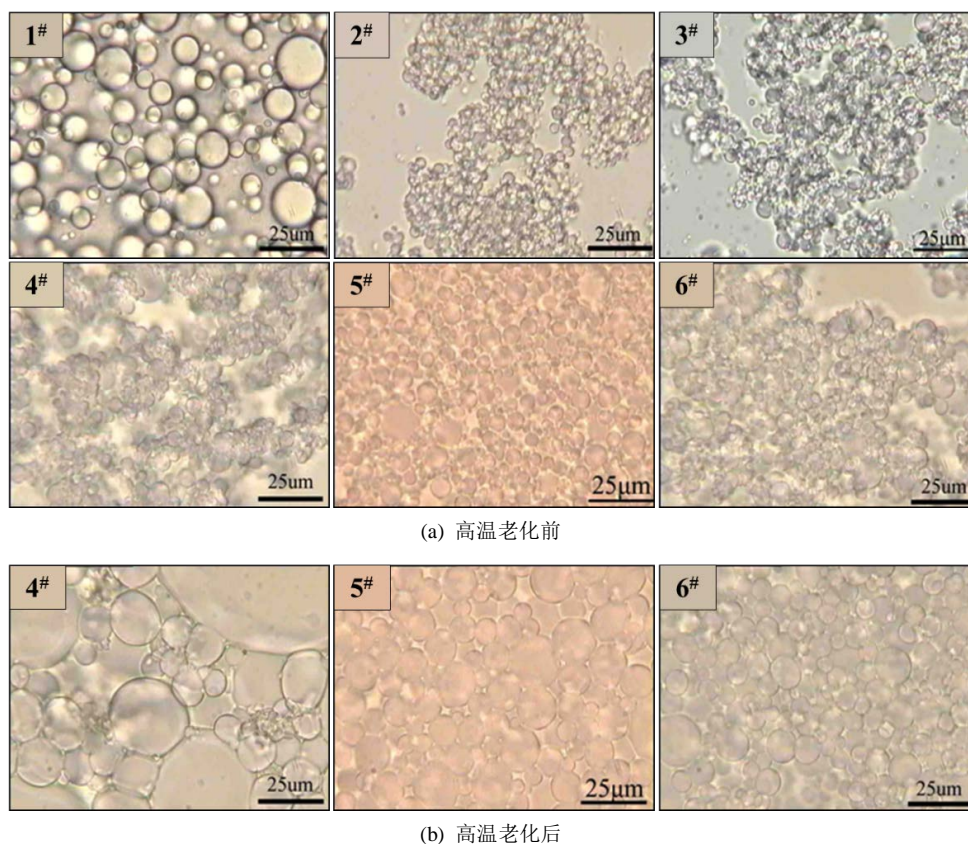


Figure 3. Microscope pictures of emulsion droplets with different CaCl₂ concentrations

图 3. 不同 CaCl₂ 浓度的乳液滴显微镜图片

高温老化之前,水相不含 CaCl_2 制备的乳液滴粒径较大,添加 CaCl_2 后能够明显降低乳液滴粒径尺寸。可能是因为 Ca^{2+} 有助于乳化剂吸附在油水界面,有效降低油水界面张力,从而使得乳液滴粒径减小。高温老化之后, CaCl_2 浓度较低时(0 wt%~15 wt%)乳液严重破乳,油水分离现象严重;而 CaCl_2 浓度较高时(20 wt%~30 wt%)乳液无水相析出,但乳液滴粒径明显增大。其中显微镜观察 CaCl_2 浓度为 20 wt% 的乳液时有明显的水滴聚并现象,说明 Ca^{2+} 浓度较低时,乳液抗高温稳定性能较差,较高的 Ca^{2+} 能够更有效的促进乳化剂在油水界面的吸附,有利于二价金属皂的形成。根据定向楔理论,有利于形成较为稳固的界面膜,从而有效提高了油包水乳液的抗高温稳定性能。

4.5. 盐种类对乳液稳定性的影响

为研究水相中不同盐种类对乳液稳定性的影响,以 NaCl 溶液为内相,相同条件下测定其对乳液稳定性的影响。

在 280 mL 气制油中,加入 3 wt% PF-EMUL-2 和 1 wt% PF-COAT-2;再分别加入浓度不同的 NaCl 溶液,保持油水比 8:2,高速(10,000 r/min)搅拌 20 min,装入老化罐中于 150°C 老化 16 h 后,观察老化前后乳液微观形貌及平均粒径。结果如表 5、图 4、图 5 所示。

Table 5. The influence of the concentration of NaCl on the average particle size of emulsion droplets before high temperature aging
表 5. 高温老化前 NaCl 浓度对乳液滴的平均粒径的影响

| 样品编号 | NaCl 浓度/(wt%) | 平均粒径/ μm |
|------|------------------------|---------------------|
| 1# | 10 | 2.7 |
| 2# | 15 | 1.6 |
| 3# | 20 | 3.4 |
| 4# | 25 | 4.7 |

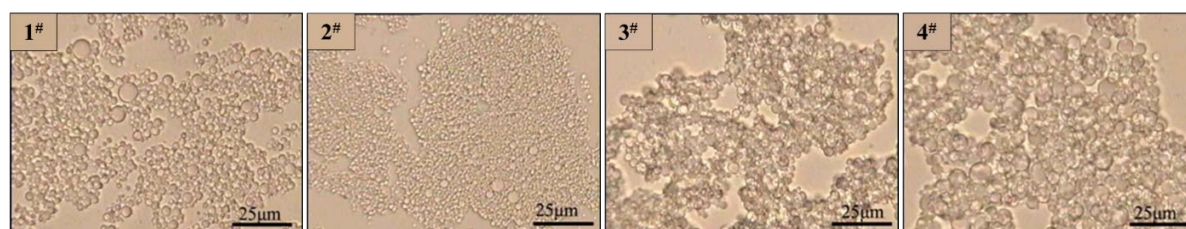


Figure 4. Microscope pictures of emulsion droplets with different NaCl concentrations before high temperature aging
图 4. 高温老化前不同 NaCl 浓度的乳液滴显微镜图片



Figure 5. Broken milk pictures of emulsion with different NaCl concentrations after high temperature aging
图 5. 高温老化后不同 NaCl 浓度乳液破乳图片

对于 PF-EMUL-2 与 PF-COAT-2 复配制备的乳液体系, 高温老化前, 水相中不添加无机盐时, 所得水滴粒径较大, 添加 CaCl_2 或 NaCl 后均能明显降低盐水滴粒径尺寸, 说明 Ca^{2+} 或 Na^+ 均有助于乳化剂吸附在油水界面, 有效降低油水界面张力, 从而使得乳液滴粒径减小。高温老化后, 与前期研究 CaCl_2 浓度对乳液稳定性的结果对比可知, 水相中盐种类为 CaCl_2 时, 其浓度较低的(0 wt%~15 wt%)乳液发生严重的油水分离现象; 浓度为 20 wt% 时乳液虽未破乳, 但在显微镜下可以观察到明显的水滴聚并现象; 浓度较高的(25 wt%~30 wt%)乳液无水相析出, 也未观察到水滴聚并现象, 但乳液滴粒径明显增大。而水相中盐种类为 NaCl 时, 在 NaCl 浓度 10 wt%~25 wt% 范围内, 乳液体系均发生油水分层现象。可以说明乳状液内相中二价无机盐形成的乳状液的稳定性大于一价无机盐, 二价钙离子可以促进二元金属皂的形成并形成稳固的界面膜, 从而提高了乳液的抗高温稳定性能。

4.6. 基液对乳液稳定性的影响

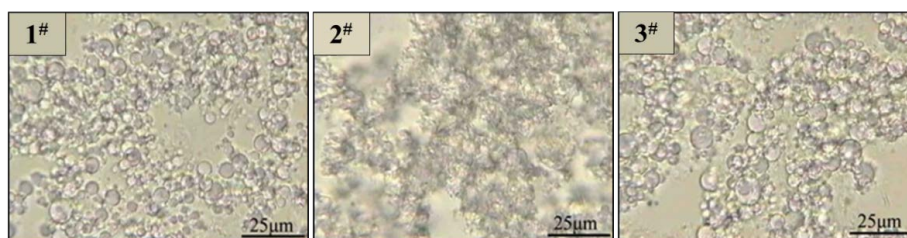
基液是油基钻井液的主要组分, 乳化剂与基液的配伍性决定了油基钻井液的性能。因此, 本部分选择具有代表性的生物柴油、3#白油、气制油作为基础油, 研究了 PF-EMUL-2 与 PF-COAT-2 在不同基液中形成乳液的稳定性差异。

在 280 mL 不同基液(3#白油、生物柴油、气制油)中, 先加入 3 wt% PF-EMUL-2 和 1 wt% PF-COAT-2 以及 25 wt% CaCl_2 水溶液 70 mL, 再加入 2 wt% PF-MOGEL 稳定乳液, 高速(10,000 r/min)搅拌 20 min, 装入老化罐中 150℃ 老化 16 h 后, 观察老化前后乳液微观形貌及平均粒径。结果如表 6、图 6 所示。

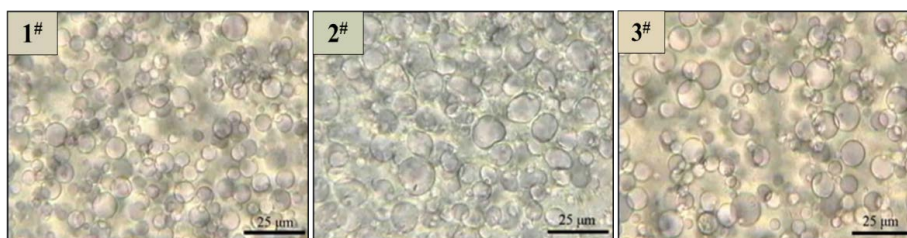
Table 6. Effect of base fluid on average particle size of emulsion droplets

表 6. 基液对乳液滴的平均粒径的影响

| 样品编号 | 基液类型 | 平均粒径/ μm | |
|------|------|---------------------|-------|
| | | 高温老化前 | 高温老化后 |
| 1# | 白油 | 4.5 | 5.8 |
| 2# | 生物柴油 | 5.2 | 10.7 |
| 3# | 气制油 | 5.2 | 6.8 |



(a) 高温老化前



(b) 高温老化后

Figure 6. Microscope pictures of emulsion droplets in different base fluids

图 6. 不同基液中乳液滴显微镜图片

对于 PF-EMUL-2 与 PF-COA-2 复配并添加有机土制备的乳液体系, 高温老化前, 不同油相类型均能制备得到油包水乳液且乳液滴粒径相差较小; 白油、气制油为基液的乳液滴有较好的分散性; 而生物柴油为基液的乳液显微镜下可以观察到絮凝现象, 因为生物柴油中非极性物质和亲油性乳化剂的非极性基团分子间作用力能够很好的结合。高温老化后, 以白油、气制油为基液的乳液滴粒径未发生较大的变化; 而以生物柴油为基液的乳液滴粒径几乎增大一倍, 这可能是因为生物柴油的粘度较低, 液珠在连续相中受到的运动阻力较小, 乳状液稳定性随之降低。说明基液的极性和粘度影响乳液稳定性。

4.7. 加重剂对乳液稳定性的影响

乳化剂分子结构中含有一定比例的亲疏水基团, 它们通过吸附作用可以改变加重剂颗粒的表面特性。因此, 加重剂会对油包水乳液稳定性造成一定影响。

在 2 份 280 mL 气制油中, 其中 1 份加入 3 wt% PF-EMUL-2 和 1 wt% PF-COAT-2 以及 70 mL 25 wt% CaCl_2 水溶液, 另外 1 份乳化剂加量翻倍, 2 份都加入 2 wt% 重晶石, 高速(10,000 r/min)搅拌 20 min, 装入老化罐中于 150°C 老化 16 h 后, 观察老化后乳液微观形貌及平均粒径。结果如图 7 所示。

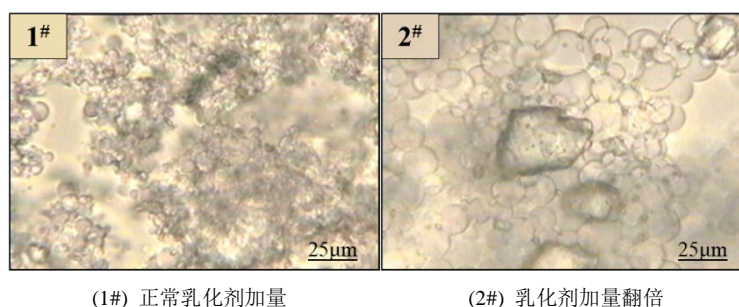


Figure 7. Effect of barite on the stability of emulsion
图 7. 重晶石对乳液稳定性的影响

对于 PF-EMUL-2 与 PF-COAT-2 复配制备的乳液体系, 添加重晶石会降低乳液抗高温稳定性, 这是由于乳化剂在高温环境下由油水界面脱附后吸附在重晶石表面, 导致油水界面张力增大, 界面膜强度降低, 从而在高温状态下难以维持稳定, 发生油水分层现象。将乳化剂加量分别增大 1 倍后, 由图 7 可见, 乳液滴粒径虽有明显增大, 但并未发生破裂现象, 说明部分乳化剂在高温环境下由油水界面脱附后吸附在重晶石表面, 剩余的乳化剂仍能维持乳液稳定性, 避免了油水分层。

5. 结论

- 1) 选择的乳化剂 PF-EMUL-2 与 PF-COAT-2 能够配制出稳定的乳液, 二者比例 3:1 时, 界面上形成有定向吸附的乳化剂分子紧密排列的界面膜, 有助于乳液稳定。
- 2) 油水比越高的乳液由于其液滴的分散程度和界面层上乳化剂分子密集程度高而呈现出较高的稳定性。
- 3) 基液的极性和粘度影响乳液的稳定性。
- 4) 与 Na^+ 离子相比, Ca^{2+} 能够更有效地促进乳化剂在油水界面的吸附, 有利于形成较为稳固的界面膜, 从而有效提高了油包水乳液的抗高温稳定性。
- 5) 当乳液中加入加重剂后, 乳化剂在高温环境下由油水界面脱附后吸附在重晶石表面, 剩余的乳化剂仍能维持乳液稳定性, 避免了油水分层。因此, 高密度油基钻井液需要较多的乳化剂稳定钻井液体系。

基金项目

本文属中海石油(中国)有限公司重大科技专项《渤海油田 3000 万吨持续稳产关键技术研究》课题 6: 渤海边缘油田高效开发钻完井配套技术。

中海石油(中国)有限公司重大科技专项(CNOOC-KJ 135 ZDXM36 TJ06TJ)。

参考文献

- [1] 鄢捷年. 钻井液工艺学[M]. 北京: 石油大学出版社, 2012: 89-110.
- [2] 王中华. 国内外油基钻井液研究与应用进展[J]. 断块油气田, 2011, 18(4): 533-537.
- [3] 何涛, 李茂森, 杨兰平, 等. 油基钻井液在威远地区页岩气水平井中的应用[J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(3): 1-5.
- [4] 康毅力, 杨斌, 游利军, 等. 油基钻井液对页岩储层保护能力评价[J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 99-104.
- [5] 王旭东, 郭保雨, 张海青, 等. 抗高温油包水型乳化剂的研制与应用[J]. 钻井液与完井液, 2013, 30(4): 9-12.
- [6] McLachlan, A.A. (2007) Synthesis and Characterization of the Solution Properties of Novel Amine Functional Surfactants.
- [7] Zaera, F. (2011) Surface Chemistry at the Liquid/Solid Interface. *Surface Science*, **605**, 1141-1145. <https://doi.org/10.1016/j.susc.2011.04.021>
- [8] 李明远, 吴肇亮. 石油乳状液[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 72.
- [9] Evans, N., Langlois, B., Audibert-Hayet, A., Dalmazzone, C. and Deballe, E. (2000) High Performance Emulsifiers for Synthetic Based Muds. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, 1-4 October 2000, SPE-63101-MS. <https://doi.org/10.2118/63101-MS>
- [10] Kang, W. and Wang, D. (2001) Emulsification Characteristic and De-Emulsifiers Action for Alkaline/Surfactant/Polymer Flooding. *SPE Asia Pacific Improved Oil Recovery Conference*, Kuala Lumpur, 6-9 October 2001, SPE-72138-MS. <https://doi.org/10.2118/72138-MS>
- [11] 许明标, 唐海雄, 曾晶, 等. 一种高效油基钻井液乳化剂的加量极限[J]. 石油天然气学报, 2009, 30(5X): 278-280.
- [12] Burrows, K., Evans, J., Hall, J. and Kirsner, J. (2001) New Low Viscosity Ester Is Suitable for Drilling Fluids in Deepwater Applications. *SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference*, San Antonio, 26-28 February 2001, SPE-66553-MS. <https://doi.org/10.2118/66553-MS>
- [13] Messler, D., Kippie, D. and Webb, T. (2002) Improved Techniques of Deepwater SBM Displacements: A Case History. *International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control*, Lafayette, 20-21 February 2002, SPE-73711-MS. <https://doi.org/10.2118/73711-MS>
- [14] Aston, M., Mihalik, P., Tunbridge, J. and Clarke, S. (2002) Towards Zero Fluid Loss Oil Based Muds. *Proceedings—SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, San Antonio, 29 September-2 October 2002, 1021-1029. <https://doi.org/10.2118/77446-MS>
- [15] Growcock, F.B., Khan, A.M. and Simon, G.A. (2003) Application of Water-Based and Oil-Based Aprons in Drilling Fluids. *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, Houston, 5-7 February 2003, 79-85. <https://doi.org/10.2118/80208-MS>
- [16] Fimreite, G., Asko, A., Massam, J., Taugbol, K., Omland, T.H., Svanes, K., Kroken, W., Andreassen, E. and Saasen, A. (2004) Invert Emulsion Fluids for Drilling through Narrow Hydraulic Windows. *SPE/IADC Drilling Conference*, Dallas, 2-4 March 2004, SPE-87128-MS. <https://doi.org/10.2118/87128-MS>