

基于餐厨废弃油脂磺化合成的 生物油磺酸盐界面性能

龙运前¹,张世明²,于金彪²,于晓明¹,宋付权³,朱维耀⁴

(1.浙江海洋大学 创新应用研究院,浙江 舟山 316022; 2.中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院,山东 东营 257015;
3.浙江海洋大学 石化与能源工程学院,浙江 舟山 316022; 4.北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083)

摘要:为了扩大油田驱油用表面活性剂的来源,利用餐厨废弃油脂经磺化反应合成了生物油磺酸盐,分析了生物油磺酸盐质量分数、氯化钠质量浓度、钙镁离子总质量浓度和温度对生物油磺酸盐溶液与原油间界面张力的影响。结果表明,随着生物油磺酸盐质量分数的增加,生物油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力减小,当生物油磺酸盐质量分数增至0.15%时,最低界面张力能够降至超低水平。当氯化钠质量浓度小于80 g/L时,随着氯化钠质量浓度的增大,生物油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力保持在超低水平。当钙镁离子总质量浓度小于400 mg/L时,随着钙镁离子总质量浓度的增加,生物油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力也保持在超低水平。随着温度的升高,生物油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力呈现先减小后递增的趋势,当温度升至70 ℃时,最低界面张力仍保持在超低水平。与大庆油田某厂使用的石油磺酸盐相比,生物油磺酸盐在降低油水界面张力和耐盐及抗高温和钙镁离子性能方面均有一定优势。

关键词:餐厨废弃油脂 生物油磺酸盐 磺化反应 界面性能 界面张力

中图分类号:TE357.46

文献标识码:A

Interfacial properties of biological oil sulfonate synthesized from waste cooking oil by sulfonation

LONG Yunqian¹, ZHANG Shiming², YU Jinbiao², YU Xiaoming¹, SONG Fuquan³, ZHU Weiyao⁴

(1. Institute of Innovation & Application, Zhejiang Ocean University, Zhoushan City, Zhejiang Province, 316022, China;
2. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 3. School of Petrochemical and Energetic Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan City, Zhejiang Province, 316022, China; 4. School of Civil & Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing City, 100083, China)

Abstract: In order to expand sources of surfactants used for oil displacement in oilfield, the biological oil sulfonate was synthesized from waste cooking oil by sulfonation. The influences of mass fraction of biological oil sulfonate, mass concentration of sodium chloride, total mass concentration of calcium and magnesium ions and temperature on the interfacial tension between biological oil sulfonate solution and crude oil were studied. The results show that the minimum interfacial tension between biological oil sulfonate solution and crude oil decreases with the increase of mass fraction of biological oil sulfonate. The minimum interfacial tension can be reduced to the ultra-low level when mass fraction of the biological oil sulfonate increases to 0.15%. The minimum interfacial tension between biological oil sulfonate solution and crude oil remains at ultra-low level with an increase of mass concentration of sodium chloride when the mass concentration of sodium chloride is less than 80 g/L. The minimum interfacial tension between biological oil sulfonate solution and crude oil maintains at ul-

收稿日期:2018-03-06。

作者简介:龙运前(1978—),男,湖南绥宁人,助理研究员,博士,从事油气田开发与提高采收率研究。联系电话:(0580)2262589, E-mail: longyunqian@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“微米米多孔介质中油-水-水-气两相渗流机理”(11472246)和“基于分形几何理论的页岩储层体积压裂缝网模型研究”(11602221),浙江省公益技术应用研究项目“基于餐厨废弃油脂生物油磺酸盐驱油剂的开发”(2016033032)。

tra-low level with the increasing total mass concentration of calcium and magnesium ions when the total mass concentration of calcium and magnesium ions is lower than 400 mg/L. The minimum interfacial tension between biological oil sulfonate solution and crude oil decreases first and then increases with an increase of temperature. But the minimum interfacial tension keeps at ultra-low level with temperature under 70 °C. Compared with petroleum sulfonate provided by Daqing Oil-field, the biological oil sulfonate has a better effect on reducing interfacial tension between oil and water at high mass concentration of sodium chloride, high temperature and high total mass concentration of calcium and magnesium ions.

Key words: waste cooking oil; biological oil sulfonate; sulfonation; interfacial property; interfacial tension

随着中国经济的快速发展,中国对石油及石油产品的需求量一直呈上升趋势^[1-2]。中国主要大中型油田都已处于水驱开发阶段末期,进入了以三次采油为代表的新技术油田开发阶段,表面活性剂驱油已在各大油田广泛使用^[3-4]。目前,三次采油用表面活性剂主要有石油羧酸盐、石油磺酸盐和重烷基苯磺酸盐等^[5],合成可供选择原料的范围较窄,主要以炼油副产品石油馏分为主^[6]。近年来经常出现原料供应紧张的情况,亟需扩大原料的来源。

中国具有丰富的餐厨废弃油脂资源,以年均消费食用油量 2.100×10^4 t/a计,每年产生废弃油脂量为 $400 \times 10^4 \sim 800 \times 10^4$ t/a,能够收集起来作为资源的废弃油脂量约为 400×10^4 t/a^[7]。目前,中国餐厨废弃的油脂没有得到合理利用,作为垃圾排放的比例接近40%^[8-9]。餐厨废弃油脂不仅猛烈冲击食品安全,还严重污染环境。餐厨废弃油脂的工业化应用主要集中在生物柴油产品^[10]及肥皂和其他洗涤产品^[11]的制备。刘先杰等以餐厨废弃油脂与二乙醇胺为原料,采用甘油酯法合成的脂肪酸二乙醇胺表面活性剂,具有较强的乳化能力,能够有效降低水溶液表面张力^[12]。黄毅等用工业油脂经磺化制成了磺酸盐驱油剂,其具有较高的界面活性,能将油水界面张力降至超低水平^[13]。所使用的工业油脂主要有效成分为甘油脂肪酸三酯,而餐厨废弃油脂的主要成分也是甘油脂肪酸三酯,但后者更为低廉,来源更为广泛。为此,笔者利用餐厨废弃油脂,经磺化反应合成生物油磺酸盐,分析生物油磺酸盐质量分数、氯化钠质量浓度、钙镁离子总质量浓度和温度对合成的生物油磺酸盐溶液与原油间界面张力的影响,并与大庆油田某厂使用石油磺酸盐溶液的界面性能进行比较,以期餐厨废弃油脂合成的生物油磺酸盐应用提供依据。

1 实验器材与方法

1.1 实验器材

实验仪器主要包括:日本岛津公司生产的FT-

IR Prestige-21型傅立叶变换红外光谱仪,美国科诺工业有限公司生产的TX500界面张力仪,上海皓庄仪器有限公司生产的J-HH-2A精密数显恒温水浴,德国Sartorius公司生产的TE412电子天平。

实验材料主要包括:取自舟山市某废油回收厂的餐厨废弃油脂,大庆油田某厂的石油磺酸盐,大庆油田某厂粘度为15.37 mPa·s的脱气脱水原油,实验用水为模拟地层水,其矿化度为5 963.04 mg/L。实验用化学试剂包括碳酸钠、氯化钠、氯化镁、氯化钙、碳酸氢钠、硫酸钠、四氯化碳、发烟硫酸、1,2-二氯乙烷、二氯甲烷、三氯甲烷、99.5%的乙醇溶液、氢氧化钠、氯化碘、冰乙酸和环己烷等,均为国药集团化学试剂有限公司生产的分析纯。

1.2 实验方法

1.2.1 生物油磺酸盐的制备

将体积比为1:3的餐厨废弃油脂和1,2-二氯乙烷加入到3口烧瓶中,快速搅拌使餐厨废弃油脂完全溶解,在室温下,按餐厨废弃油脂和发烟硫酸体积比为8:1往3口烧瓶中缓慢滴加发烟硫酸,同时快速搅拌混合溶液,当发烟硫酸滴加完以后,利用恒温水浴加热至60 °C,并保持恒温反应5 h,待反应结束后,往3口烧瓶中缓慢滴加氢氧化钠溶液,进行水解、中和,直至混合溶液呈碱性,往3口烧瓶中加入蒸馏水进行稀释,同时充分搅拌混合溶液,使其充分混合均匀后,用分液漏斗分离混合溶液的下层液体,得到浅棕色粗产品,经减压蒸馏,除去溶剂和水,得到的橙色胶质即为生物油磺酸盐产品。

1.2.2 FTIR谱图测定

利用FTIR Prestige-21型傅立叶变换红外光谱仪对餐厨废弃油脂、石油磺酸盐和生物油磺酸盐进行红外光谱分析,对其官能团进行定性研究。样品制备方式为溴化钾压片法,扫描范围为 $400 \sim 4\,000$ cm^{-1} ,分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描次数为70。

1.2.3 油水界面张力影响因素实验方法

表面活性剂质量分数 用模拟地层水分别配制质量分数为0.05%,0.1%,0.15%,0.2%和0.3%的生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液,在温度为40 °C的

条件下,用TX500界面张力仪测定生物油磺酸盐、石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力,测定时间为120 min。

氯化钠质量浓度 固定表面活性剂质量分数为0.2%,用模拟地层水配制氯化钠质量浓度分别为10,20,40,80和100 g/L的生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液,在温度为40 °C的条件下,用TX500界面张力仪测定生物油磺酸盐、石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力,测定时间为120 min。

钙镁离子总质量浓度 固定表面活性剂质量分数为0.2%,用模拟地层水分别配制钙镁离子总质量浓度为100,200,300,400和500 mg/L的生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液,在温度为40 °C的条件下,用TX500界面张力仪测定生物油磺酸盐、石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力,测定时间为120 min。

温度 用模拟地层水配制表面活性剂质量分数为0.2%的生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液,分别在温度为30,40,50,60和70 °C的条件下,用TX500界面张力仪测定生物油磺酸盐、石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力,测定时间为120 min。

2 实验结果与分析

2.1 生物油磺酸盐的结构表征

由餐厨废弃油脂、石油磺酸盐和生物油磺酸盐的FTIR谱图(图1)可知:在餐厨废弃油脂的FTIR谱图中,3 010 cm^{-1} 处为不饱和碳链的C—H伸缩振动峰,1 652 cm^{-1} 处为C=C伸缩振动峰,1 377和720 cm^{-1} 处为不饱和碳链的C—H弯曲振动峰,以上这些吸收峰均为明显的烯烃特征峰。在生物油磺酸盐的FTIR谱图中,这些明显的烯烃特征峰消失,但是在2 922和2 849 cm^{-1} 处的饱和碳链的C—H伸缩振动峰不变,并且在3 473 cm^{-1} 处出现了O—H伸缩振动峰,1 221 cm^{-1} 处为—SO₃H基团不对称振动峰,1 083 cm^{-1} 处为—SO₃H基团对称振动峰,648 cm^{-1} 处为C—S伸缩振动峰。可见,餐厨废弃油脂中部分不饱和C=C双键与三氧化硫发生磺化反应,合成的产物为带有羟基的生物油磺酸盐。此外,在石油磺酸盐的FTIR谱图上,同样在1 221 cm^{-1} 处出现—SO₃H基团不对称振动峰,1 083 cm^{-1} 处出现—SO₃H基团对称振动峰,648 cm^{-1} 处出现C—S伸缩振动峰,但是在1 592和1 478 cm^{-1} 处多了2个芳环的吸收特征峰,证实石油磺酸盐基本结构中不存在生物分解能力差、环境治理难度大、对环境有污染的芳环结构,

而生物油磺酸盐基本结构中不含芳环结构,为简单的烷烃碳链。

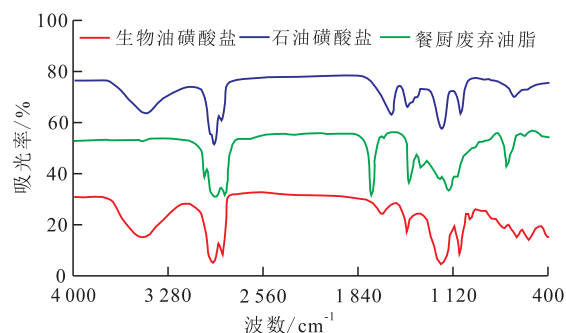


图1 生物油磺酸盐、石油磺酸盐和餐厨废弃油脂的FTIR谱图

Fig.1 FTIR spectrum of biological oil sulfonate, petroleum sulfonate and waste cooking oil

2.2 表面活性剂质量分数对界面张力的影响

表面活性剂质量分数对生物油磺酸盐溶液、石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力的影响结果(图2)表明,随着时间的增加,生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力均先迅速减小再逐渐增大,60 min后基本达到平衡值,生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力在20 min内均基本降至最低值。除质量分数为0.1%的生物油磺酸盐溶液外,随着表面活性剂质量分数的增大,生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间

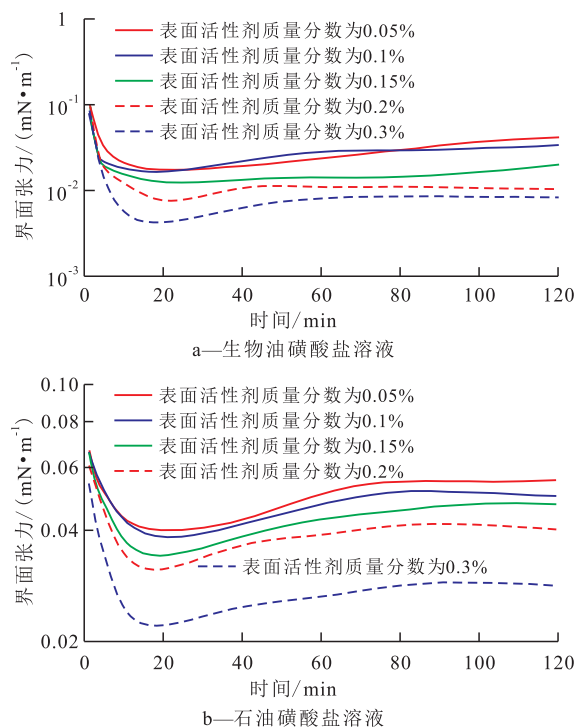


图2 表面活性剂质量分数对不同表面活性剂溶液与原油间动态界面张力的影响

Fig.2 Influence of mass fraction of surfactant on dynamic interfacial tension between surfactant solutions and crude oil

动态界面张力曲线逐渐下移,即动态界面张力随表面活性剂质量分数的增大而降低。总体而言,在相同表面活性剂质量分数下,生物油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力的降幅大于石油磺酸盐。

由表面活性剂质量分数对生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力的影响(图3)可以看出,随着表面活性剂质量分数的增加,生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力均减小。这是由于表面活性剂具有亲油和亲水基团,亲水基团伸入水相,亲油基团伸入油相,表面活性剂分子聚集在油水界面上,当表面活性剂质量分数增大时,油水界面上聚集的分子数量增多,导致界面张力逐渐减小^[14]。此外,当质量分数为0.05%~0.3%时,石油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力只能降至低界面张力,未能降至超低界面张力;而当生物油磺酸盐质量分数增至0.15%时,生物油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力就已降至超低界面张力。不同表面活性剂质量分数时,生物油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力均低于石油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力。说明该生物油磺酸盐降低油水界面张力的能力强于石油磺酸盐。

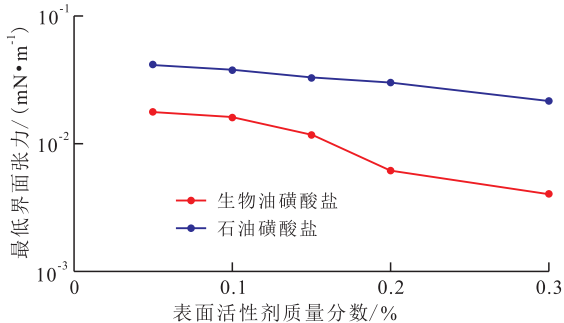


图3 表面活性剂质量分数对不同表面活性剂溶液与原油间最低界面张力的影响

Fig.3 Influence of mass fraction of surfactant on minimum interfacial tension between surfactant solutions and crude oil

2.3 氯化钠质量浓度对界面张力的影响

固定表面活性剂质量分数为0.2%,分析氯化钠质量浓度对生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力的影响(图4)可知,当氯化钠质量浓度一定时,随着时间延长,生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力呈现先减小后增大的趋势。生物油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力基本在5 min内降至最低界面张力,在40 min时生物油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力基本趋于稳定。而石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力基本在10 min内降至最低界面张力,在40 min时也基本趋于稳定。

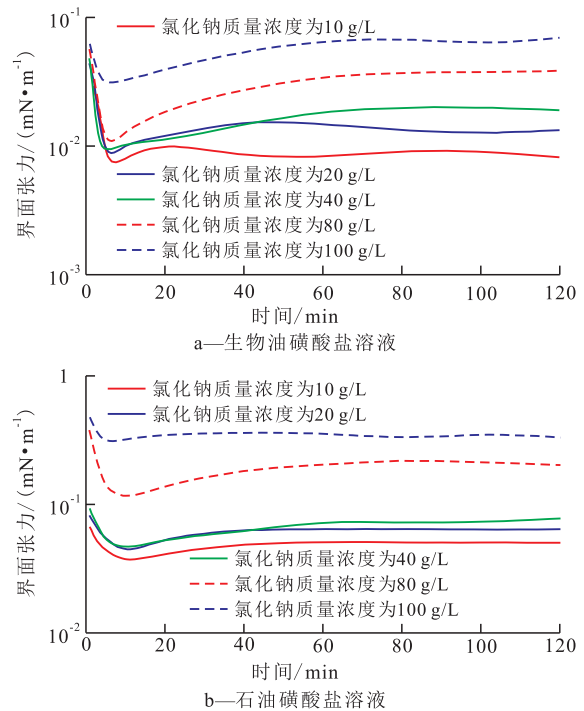


图4 氯化钠质量浓度对不同表面活性剂溶液与原油间动态界面张力的影响

Fig.4 Influence of mass concentration of sodium chloride on dynamic interfacial tension between surfactant solutions and crude oil

由氯化钠质量浓度对生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力的影响(图5)可知,随着氯化钠质量浓度增大,生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力呈现逐渐增大的趋势。当氯化钠质量浓度小于80 g/L时,生物油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力增幅较小,且最低界面张力一直保持在超低水平;当氯化钠质量浓度大于80 g/L后,生物油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力迅速增大,但最低界面张力也能保持在低界面张力。对于石油磺酸盐溶液,当氯化钠质量浓度小于40 g/L时,石油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力增幅较小,且最低界面张力保持在低界面

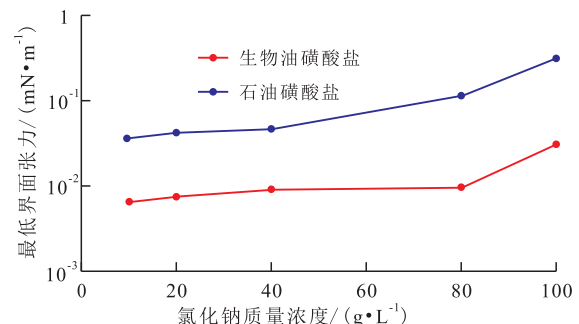


图5 氯化钠质量浓度对不同表面活性剂溶液与原油间最低界面张力的影响

Fig.5 Influence of mass concentration of sodium chloride on minimum interfacial tension between surfactant solutions and crude oil

张力,但当氯化钠质量浓度大于40 g/L时,石油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力增幅变大,直至氯化钠质量浓度达到80 g/L时,石油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力超出低界面张力的范围。可见,生物油磺酸盐的耐盐能力强于石油磺酸盐。这是由于生物油磺酸盐合成过程中,餐厨废弃油脂中不饱和和碳链的双键因磺化断开而连接上磺酸基团后,整个分子呈现一种多分支结构,这种多分支结构在一定程度上具有更好的耐盐能力^[15]。

2.4 钙镁离子总质量浓度对界面张力的影响

固定表面活性剂质量分数为0.2%,钙镁离子总质量浓度对生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力的影响结果(图6)表明,当钙镁离子总质量浓度一定时,随着时间增加,生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力均呈现先减小后增大的趋势,并均在10 min内降至最低,在40 min左右界面张力基本趋于稳定。

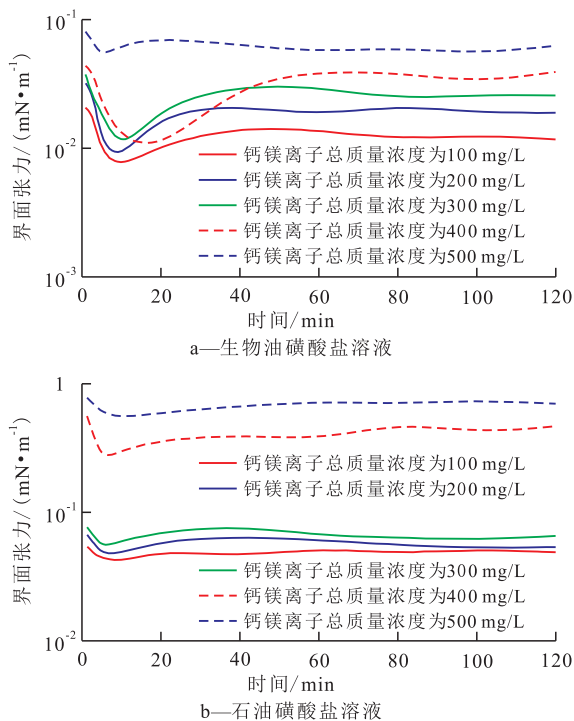


图6 钙镁离子总质量浓度对不同表面活性剂溶液与原油间动态界面张力的影响

Fig.6 Influence of total mass concentration of calcium and magnesium ions on dynamic interfacial tension between surfactant solutions and crude oil

分析钙镁离子总质量浓度对生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间的最低界面张力的影响(图7)可知,随着钙镁离子总质量浓度增加,生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力呈逐渐递增趋势。这是由于钙镁离子容易与生物油磺酸盐、石油磺酸盐反应或络合,降低了界面活

性^[16]。当钙镁离子总质量浓度小于400 mg/L时,生物油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力保持在超低水平;当钙镁离子总质量浓度增至500 mg/L时,最低界面张力增至低界面张力。对于石油磺酸盐溶液,当钙镁离子总质量浓度大于300 mg/L后,石油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力超出了低界面张力的范围。可见,生物油磺酸盐具有更强的抗钙镁离子能力。这同样是由生物油磺酸盐分子的多分支结构所致。

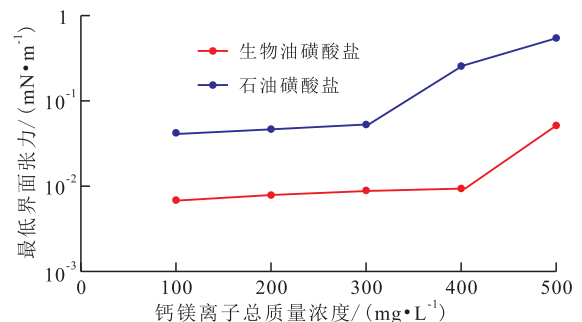


图7 钙镁离子总质量浓度对不同表面活性剂溶液与原油间最低界面张力的影响

Fig.7 Influence of total mass concentration of calcium and magnesium ions on minimum interfacial tension between surfactant solutions and crude oil

2.5 温度对界面张力的影响

固定表面活性剂质量分数为0.2%,分析温度对生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力的影响(图8)可知,当温度一定时,随着时间增加,生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力均呈现先减小后增大的趋势。随着温度升高,生物油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力降至最低界面张力所用的时间逐渐增加,从30℃时的10 min增大到70℃时的40 min,80 min后生物油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力才逐渐趋于稳定。而对于石油磺酸盐溶液与原油间动态界面张力基本在20 min内就降至最低界面张力,40 min后界面张力趋于稳定。

温度对生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力的影响(图9)表明,随着温度升高,生物油磺酸盐和石油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力均呈现先减小后递增的趋势,最低界面张力减小和递增的幅度都不大。这是因为,随着温度升高,表面活性剂分子的热运动加剧,表面活性剂分子的动能增大,能够移动范围变宽,使得分子之间的距离增大,分子间的相互引力变小,表面活性剂分子更易于向油水界面聚集,从而降低了油水界面张力^[17]。当温度为50℃时,由于热运动导致表面活性剂分子向油水界面聚集的过程达到平衡,最低

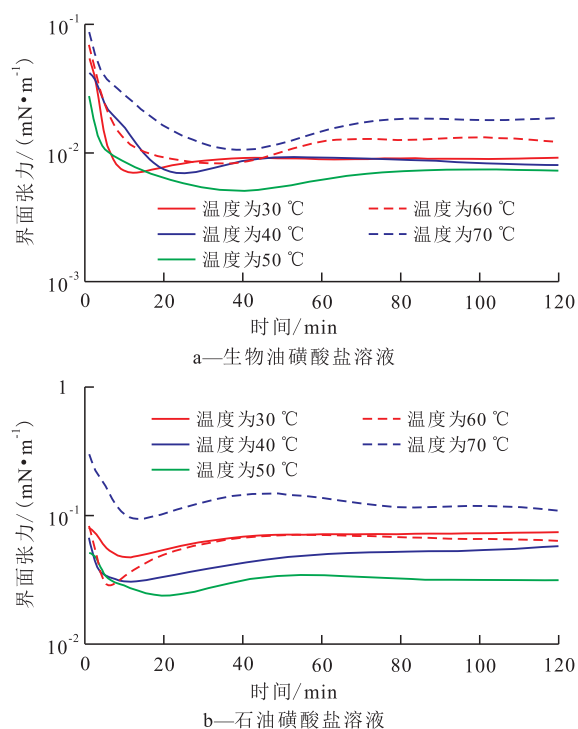


图8 温度对不同表面活性剂溶液与原油间动态界面张力的影响

Fig.8 Influence of temperature on dynamic interfacial tension between surfactant solutions and crude oil

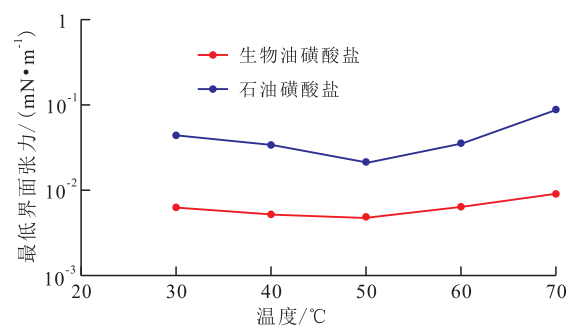


图9 温度对不同表面活性剂溶液与原油间最低界面张力的影响

Fig.9 Influence of temperature on minimum interfacial tension between surfactant solutions and crude oil

界面张力降至最低,但随着温度进一步升高,表面活性剂分子的热运动又会破坏这种平衡,使得最低界面张力又逐渐增大。但当温度升至70℃时,生物油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力仍能保持在超低水平,石油磺酸盐溶液与原油间的最低界面张力仍能保持在低界面张力。说明生物油磺酸盐和石油磺酸盐均具有一定的抗高温能力。

3 结论

餐厨废弃油脂磺化合成的生物油磺酸盐的FT-IR谱图表明,餐厨废弃油脂与三氧化硫发生磺化反应,产物为带有羟基的生物油磺酸盐,其结构中不

含芳环结构,为简单的烷烃碳链。

随着生物油磺酸盐质量分数增加,生物油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力减小,当生物油磺酸盐质量分数增至0.15%时,最低界面张力降至超低界面张力。当氯化钠质量浓度小于80 g/L时,随着氯化钠质量浓度增大,生物油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力虽有增加,但最低界面张力也能保持在超低界面张力。当钙镁离子总质量浓度小于400 mg/L时,随着钙镁离子总质量浓度增加,生物油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力增大,但最低界面张力也仍然能保持在超低界面张力。随着温度升高,生物油磺酸盐溶液与原油间最低界面张力呈现先减小后递增的趋势,当温度升至70℃时,最低界面张力也仍然能保持在超低界面张力。

与大庆油田某厂使用的石油磺酸盐相比,生物油磺酸盐在降低油水界面张力和耐盐及抗高温和钙镁离子性能方面均具有一定优势。

参考文献:

- [1] 撒利明,甘利灯,黄旭日,等.中国石油集团油藏地球物理技术现状与发展方向[J].石油地球物理勘探,2014,49(3):611-626.
SA Liming, GAN Lideng, HUANG Xuri, et al. The status and development direction of reservoir geophysics in CNPC[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(3): 611-626.
- [2] 冯建辉,蔡勋育,牟泽辉,等.中国石油化工股份有限公司“十二五”油气勘探发现与“十三五”展望[J].中国石油勘探,2016,21(3):1-13.
FENG Jianhui, CAI Xunyu, MOU Zehui, et al. Oil and gas exploration of China Petroleum and Chemical Corporation during the 12th Five-Year Plan and the prospect for the 13th Five-Year Plan[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 1-13.
- [3] 唐海龙.聚合物-表面活性剂复合驱注采调控技术研究[J].特种油气藏,2017,24(3):123-128.
TANG Hailong. Research on injection-production control technique with polymer-surfactant combination flooding[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(3): 123-128.
- [4] 张本艳,党文斌,王少朋,等.鄂尔多斯盆地红河油田长8储层致密砂岩油藏注CO₂提高采收率[J].石油与天然气地质,2016,37(2):272-275.
ZHANG Benyan, DANG Wenbin, WANG Shaopeng, et al. CO₂-EOR in Chang8 tight sandstone reservoir of Honghe oilfield in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 272-275.
- [5] 曹立迎,刘传喜,孙建芳,等.低渗透碳酸盐岩稠油油藏热复合化学方法提高采收率实验[J].油气地质与采收率,2016,23(3):101-105.
CAO Liying, LIU Chuanxi, SUN Jianfang, et al. EOR experiment of thermal compound chemical technology in low permeability carbonate heavy oil reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery

- Efficiency, 2016, 23(3): 101-105.
- [6] 闫福丽, 刘卫东, 孙灵辉, 等. 高凝油及其组分与表面活性剂作用关系[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(1): 119-123.
YAN Fuli, LIU Weidong, SUN Linghui, et al. Interactions between the high pour point oil or its components and surfactants[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(1): 119-123.
- [7] 姚志龙, 闵恩泽. 废弃食用油脂的危害与资源化利用[J]. 天然气工业, 2010, 30(5): 123-128.
YAO Zhilong, MIN Enze. A double-edged sword of the discarded edible oils: Harmful pollutants or resources utilization[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(5): 123-128.
- [8] 王鹏照, 刘熠斌, 杨朝合. 我国餐厨废油资源化利用现状及展望[J]. 化工进展, 2014, 33(4): 1 022-1 029.
WANG Pengzhao, LIU Yibin, YANG Chaohe. Added value chemicals from used cooking oil: Advances and prospects[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(4): 1 022-1 029.
- [9] 胡昊, 贺文智, 黄菊文, 等. 废弃食用油脂资源化利用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(11): 5 004-5 007, 5 013.
HU Hao, HE Wenzhi, HUANG Juwen, et al. Research progress on waste edible oils recycling[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(11): 5 004-5 007, 5 013.
- [10] KUSDIANA D, SAKA S. Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment[J]. Bioresource Technology, 2004, 91(3): 289-295.
- [11] 姚志龙, 闵恩泽. 生物柴油(脂肪酸甲酯)化工利用技术进展[J]. 天然气工业, 2010, 30(1): 127-132.
YAO Zhilong, MIN Enze. Technical progress in using fatty acid methyl esters as raw materials for chemicals[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(1): 127-132.
- [12] 刘先杰, 陈立功, 曹书翰, 等. 餐饮废油制取脂肪酸二乙醇酰胺的研究[J]. 中国油脂, 2013, 38(9): 55-59.
LIU Xianjie, CHEN Ligong, CAO Shuhan, et al. Preparation of fatty acid alkanolamide from waste cooking oil[J]. China Oils and Fats, 2013, 38(9): 55-59.
- [13] 黄毅, 朱红, 王芳辉, 等. 一种新型生物油脂磺酸盐驱油剂的制备及性能[J]. 石油学报, 2009, 30(2): 275-279.
HUANG Yi, ZHU Hong, WANG Fanghui, et al. Preparation and performance of a novel oil-displacement surfactant using sulphonate fatty acid ester[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 275-279.
- [14] 王宪中, 康万利, 孟祥灿, 等. 高盐油藏下两性/阴离子表面活性剂协同获得油水超低界面张力[J]. 物理化学学报, 2012, 28(10): 2 285-2 290.
WANG Xianzhong, KANG Wanli, MENG Xiangcan, et al. Ultra-low interfacial tension in high salinity reservoir driven by synergistic interaction of zwitterionic and anionic surfactants[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2012, 28(10): 2 285-2 290.
- [15] 黄毅, 朱红, 王芳辉, 等. 两种非芳香性磺酸盐驱油剂的合成及应用[J]. 石油学报: 石油加工, 2009, 25(2): 196-201.
HUANG Yi, ZHU Hong, WANG Fanghui, et al. Preparation and application of two novel nonaromatic sulphonate oil-displacing agents[J]. Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section, 2009, 25(2): 196-201.
- [16] 仇莉, 吴芳, 张弛, 等. 驱油用表面活性剂的发展及界面张力研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2010, 25(6): 59-65.
ZHANG Li, WU Fang, ZHANG Chi, et al. Development of surfactants for enhanced oil recovery factor and study of their interfacial tension[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2010, 25(6): 59-65.
- [17] 赵海娜, 程新皓, 赵欧狄, 等. 阴阳离子表面活性剂混合体系在克拉玛依油田中获得超低界面张力[J]. 物理化学学报, 2014, 30(4): 693-698.
ZHAO Haina, CHENG Xinhao, ZHAO Oudi, et al. Mixed cationic and anionic surfactant systems achieve ultra-low interfacial tension in the Karamay oil field[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2014, 30(4): 693-698.

编辑 常迎梅