

表面活性剂

N,N'-双棕榈酰基对苯二胺二乙基磺酸钠 的合成及性能

金礼俊^{1,2}, 唐善法^{1,2*}, 崔琰奇^{1,2}, 郑雅慧^{1,2}

(1. 长江大学 石油工程学院, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 非常规油气湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430100)

摘要: 以对苯二胺、棕榈酰氯、2-氯乙基磺酸钠为主要原料, 经取代和酰化等反应合成了一种磺酸盐型双子表面活性剂——*N,N'*-双棕榈酰基对苯二胺二乙基磺酸钠 (DS16-P-16), 用 FTIR、¹HNMR 对中间体和目标产物进行了结构表征, 并测定了其水溶性、表&界面活性、泡沫性能和乳化性能。结果表明: 在 25 °C 时, DS16-P-16 的临界胶束浓度 (CMC 为 5.01×10^{-4} mol/L) 是传统表面活性剂十二烷基硫酸钠 (SDS) 的 6.26%, pC_{20} (水的表面张力降低 20 mN/m 时所需溶液浓度的负对数) 为 3.61, 表现出更好的降低水表面张力的效率; 随着温度和溶液浓度的增大, DS16-P-16 溶液与吉林油田原油的界面张力逐渐降低, 且均低于 1×10^{-2} mN/m, 在 45 °C 下, 质量分数为 0.5% 的该溶液可将油水界面张力降低至 1.46×10^{-2} mN/m; 在质量分数为 0.1% 时, DS16-P-16 溶液的初始起泡高度为 28 cm, 稳泡率可达 93%, 乳状液稳定时间为 437 s。相同条件下, 质量分数为 0.1% 的十二烷基硫酸钠的初始起泡高度为 15 cm, 稳泡率为 60%, 乳化时间为 128 s。

关键词: 表面活性剂; 表面张力; 泡沫性能; 界面张力; 乳化性

中图分类号: TQ630 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214(2019)03-0437-06

Synthesis and Properties of *N,N'*-Dipalmitoyl *p*-phenylenediamine Diethyl Sulfonate

JIN Li-jun^{1,2}, TANG Shan-fa^{1,2*}, CUI Yan-qi^{1,2}, ZHENG Ya-hui^{1,2}

(1. College of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China; 2. Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China)

Abstract: A sulfonate Gemini surfactant, *N,N'*-dipalmitoyl *p*-phenylenediamine diethyl sulfonate (DS16-P-16) was synthesized by substitution and acylation reaction using *p*-phenylenediamine, palmitoyl chloride and sodium 2-chloroethyl sulfonate as main raw materials. The intermediate and target product were identified by FTIR and ¹HNMR. The water solubility, surface/interfacial activity, foaming properties and emulsifying properties of DS16-P-16 were investigated. The results showed that the critical micelle concentration (CMC) of DS16-P-16 was 5.01×10^{-4} mol/L at 25 °C, which was 6.26% of traditional surfactant sodium dodecyl sulfate (SDS), pC_{20} (the negative logarithm of the concentration of DS16-P-16 solution required to reduce the surface tension of water by 20 mN/m) was 3.61, indicated that DS16-P-16 had a better ability to reduce water surface tension. With the increase of experimental temperature and solution concentration, the interfacial tension between DS16-P-16 solution and crude oil in Jilin oilfield gradually decreased, both were lower than 10^{-2} mN/m. At 45 °C, 0.5% (mass fraction) DS16-P-16 solution could reduce the oil-water interfacial tension to 1.46×10^{-2} mN/m. The initial foaming height of 0.1% DS16-P-16 solution was 28 cm, the foam stabilization rate reached 93%, and the stable time of emulsion was 437 s. Under the same conditions, the initial foaming height of 0.1% SDS solution was only 15 cm, the foam stabilization rate was 60% and the emulsification time was 128 s.

收稿日期: 2018-09-18; 定用日期: 2019-01-22; DOI: 10.13550/j.jxhg.20180695

基金项目: 国家自然科学基金 (51774049, 51474035)

作者简介: 金礼俊 (1993—), 男, 硕士生。联系人: 唐善法 (1965—), 男, 教授, E-mail: tangsf@126.com。

Key words: surfactant; surface tension; foaming properties; interfacial tension; emulsibility

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51774049, 51474035)

双子表面活性剂因其独特的分子结构而表现出特殊的性能^[1-2],具有比传统表面活性剂更高的表面活性和独特的理化性质,是当前胶体与界面化学的研究热点^[3-4]。阴离子双子表面活性剂作为其重要组成部分,具有成胶束能力强、较好的润湿性、水溶性等优异性能,使其在三次采油领域有较大的应用前景^[5-7]。考虑到对环境的影响,绿色表面活性剂已逐渐成为当今表面活性剂的发展趋势。研究表明,分子中引入酰胺基和磺酸基可以增强表面活性剂分子在环境中的生物降解性^[8]。

目前国内对酰胺型阴离子双子表面活性剂产品的认识不足,品种还比较单一,已报道合成的酰胺型双子表面活性剂主要集中在季铵盐型双子表面活性剂的研究,对阴离子型双子表面活性剂的研究较少,尤其是酰胺基磺酸盐型双子表面活性剂的研究更为少见^[9-10]。秦文龙^[11]等以二聚酸、*N*-甲基牛磺酸钠为主要原料合成了一种以柔性链为连接链的酰胺基磺酸盐型双子表面活性剂,发现该绿色表面活性剂有高的表面活性和优良的泡沫性能。然而,以对苯二胺为连接链的酰胺基磺酸盐型双子表面活性剂的合成及性能研究至今尚未有文献作相关报道(经查新确认,《科技查新报告》编号 2019-006LQ)。

本文以对苯二胺、棕榈酰氯、2-氯乙基磺酸钠等为原料,经取代、酰化反应制备了一种以刚性链为连接链的酰胺基磺酸盐型双子表面活性剂 DS16-P-16,并对目标产物进行结构表征与性能测定,以期该类表面活性剂的实际应用提供理论依据。

1 实验部分

1.1 试剂及仪器

对苯二胺,质量分数为 98%,天津市河东区红岩试剂厂;棕榈酰氯,质量分数为 98%,中国医药上海化学试剂公司;2-氯乙基磺酸钠,质量分数为 98%,济南润鑫鹏浩化工有限公司;氢氧化钠、丙酮、无水乙醇,AR,上海国药化学试剂有限公司;十二烷基硫酸钠(SDS),AR,成都科龙化工试剂厂;石蜡油,工业级,上海抚生实业有限公司;界面张力检测所用油样为吉林油田地面原油。

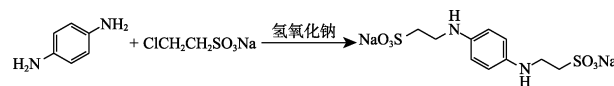
Vector-33 型红外光谱仪,德国布鲁克仪器公司;Avance300 型核磁共振波谱仪,瑞士 Bruker 公司;QBZY 型全自动表面张力仪,上海方瑞仪器有限公司;Texas-500 型旋滴界面张力仪,德国 Kruss 公司;DZTW 型电热恒温水浴锅,上海医疗器械厂。

1.2 合成

2-氯乙基磺酸钠与对苯二胺反应合成中间体对苯二胺 *N,N'*-二乙基磺酸钠,然后再与棕榈酰氯反应合成目标产物 *N,N'*-双棕榈酰基对苯二胺二乙基磺酸钠。

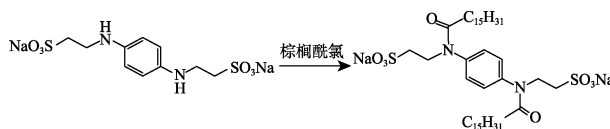
1.2.1 中间体对苯二胺 *N,N'*-二乙基磺酸钠的合成

将 20 g (0.185 mol) 对苯二胺和 61.66 g (0.37 mol) 2-氯乙基磺酸钠溶于水后加至三口烧瓶中,称取 14.8 g (0.37 mol) 氢氧化钠加入三口烧瓶,磁力搅拌并升温至 90 °C 回流,恒温水浴保温 10 h 后反应完毕,加入无水乙醇,将析出固体烘干即为棕色固体粉末对苯二胺 *N,N'*-二乙基磺酸钠。反应路线如下所示:



1.2.2 目标产物 *N,N'*-双棕榈酰基对苯二胺二乙基磺酸钠的合成

称取 10 g (0.027 mol) 中间体对苯二胺 *N,N'*-二乙基磺酸钠溶于水后加入三口烧瓶中,加入 2.7 g (0.068 mol) 氢氧化钠和 20 mL 丙酮,将三口烧瓶置于冰水混合物中,在机械搅拌下缓慢滴加 14.82 g (0.054 mol) 棕榈酰氯,并保持反应体系的 pH 为 8~10。滴加完酰氯后升温至 40 °C 反应 10 h。将产物旋干后用热的无水乙醇洗涤并抽滤,然后将所得固体放在真空干燥箱中干燥 24 h,得到棕黄色固体粉末 *N,N'*-双棕榈酰基对苯二胺二乙基磺酸钠,总收率 73.9%。利用两相滴定法^[12],以海明 1622 作为滴定剂,亚甲基蓝和百里酚蓝作为混合指示剂,对目标产物的有效物含量进行测定,经滴定该产物纯度为 97.6% (质量分数)。反应路线如下所示:



1.3 结构表征

将中间体对苯二胺 *N,N'*-二乙基磺酸钠与目标产物 DS16-P-16 分别以 KBr 压片制样,用红外光谱仪扫描得红外光谱;用核磁共振波谱仪分别检测对苯二胺 *N,N'*-二乙基磺酸钠和 DS16-P-16 的结构。

1.4 克拉夫特点 (Krafft) 测试

配制质量分数为 0.1% 的 DS16-P-16 水溶液,升

温使样品溶解至澄清透明, 室温下静置 30 min, 放入冰箱 (4 °C) 24 h, 观察溶液状态的变化。

1.5 DS16-P-16 的表界面活性检测

1.5.1 DS16-P-16 表面活性测定

用蒸馏水配制浓度分别为 1×10^{-1} 、 5×10^{-2} 、 1×10^{-2} 、 5×10^{-3} 、 1×10^{-3} 、 5×10^{-4} 、 1×10^{-4} 、 5×10^{-5} 、 1×10^{-5} mol/L 的 DS16-P-16 溶液, 在 25 °C 下使用全自动表面张力仪分别测定不同浓度 (c , mol/L) DS16-P-16 溶液的表面张力 (γ , mN/m), 绘制 γ -lg c 曲线。

1.5.2 DS16-P-16 界面活性测定

采用旋滴界面张力仪测定原油与不同质量浓度 DS16-P-16 溶液在不同温度下的油/水界面张力, 实验时转速为 5100 r/min, 测量范围 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2}$ mN/m, 测试温度为 30~50 °C。

1.6 DS16-P-16 泡沫性能测定

在 25 °C 下用蒸馏水配制质量分数为 0.1% 的 DS16-P-16 水溶液, 量取 10 mL 至 50 mL 具塞量筒中, 在恒温水浴锅中恒温 5 min 后上下剧烈振荡 20 次, 放回水浴锅并立即按下秒表计时器, 记录初始泡沫高度 (H_1 , cm) 和 5 min 后泡沫高度 (H_2 , cm), 稳泡性计算公式如下:

$$\text{稳泡性}/\% = H_2/H_1 \times 100$$

1.7 DS16-P-16 乳化性能测试

在 25 °C 下配制质量分数为 0.1% 的表面活性剂水溶液, 量取 20 mL 溶液置于 50 mL 具塞量筒中, 再加入 20 mL 石蜡油, 反复振荡 20 次, 记录分出 5 mL 水相的时间 (s)。

2 结果与讨论

2.1 结构表征

中间体对苯二胺 *N,N'*-二乙基磺酸钠的红外光谱如图 1 所示。

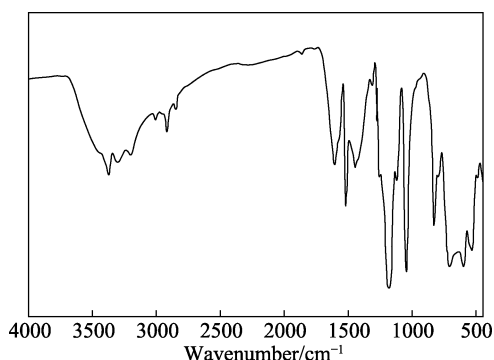


图 1 中间体对苯二胺 *N,N'*-二乙基磺酸钠的红外光谱
Fig. 1 FTIR spectrum of the intermediate *p*-phenylenediamine *N,N'*-diethylsulfonate

图 1 中, 3375.47 cm^{-1} 为 N—H 的伸缩振动特征

吸收峰; 1442.75 cm^{-1} 为 N—C 的弯曲振动特征吸收峰; 2918.82 cm^{-1} 为亚甲基—CH₂—的伸缩振动吸收峰; 742 cm^{-1} 为亚甲基—CH₂—的面内弯曲振动吸收峰; 1202 cm^{-1} 为磺酸基中—S=O 的反对称伸缩振动吸收峰; 1176.19 、 1042.75 、 603.14 和 535.09 cm^{-1} 为磺酸根离子的特征吸收峰; 3301.73 、 1601.15 和 1512.90 cm^{-1} 为苯环的特征峰; 797.18 cm^{-1} 为苯环的取代物特征峰。FTIR 图谱证明了磺酸盐中间体中 N—H 键、N—C 键、磺酸基—SO₃、亚甲基、苯环、苯环取代物的存在。

由于中间体的分子结构是完全对称的, 故只讨论其结构的一半。中间体的 ¹HNMR 数据 (600 MHz, D₂O), δ : 7.74~7.76 (m, 4H, —C₆H₄—), 2.23 (m, 4H, —CH₂—CH₂—SO₃Na), 1.65 (d, 1H, —NH—)。由 ¹HNMR 数据可知, 各种类型氢原子的化学位移与理论值相吻合, 证明所合成的化合物为中间体对苯二胺 *N,N'*-二乙基磺酸钠。综合红外光谱和核磁氢谱表征结果, 证明所合成产物为中间体对苯二胺 *N,N'*-二乙基磺酸钠。

目标产物 DS16-P-16 的红外光谱如图 2 所示。

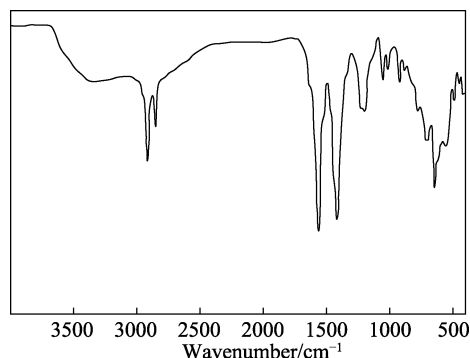


图 2 双子表面活性剂 DS16-P-16 的红外光谱
Fig. 2 FTIR spectrum of Gemini surfactant DS16-P-16

图 2 中, 2916.51 、 2849.64 cm^{-1} 分别为饱和碳链—CH₃和—CH₂—的特征吸收峰、对称伸缩振动和面内弯曲振动吸收峰; 1198.00 、 1055.40 、 643.38 cm^{-1} 为磺酸基的特征吸收峰; 1415.30 cm^{-1} 是羰基—C=O 的对称伸缩振动; 1560.29 cm^{-1} 是酰胺基—CO—N—的伸缩振动吸收峰; 3366.22 、 1560.29 cm^{-1} 为苯环的特征峰; 778.88 cm^{-1} 为苯环的取代物特征峰。对比图 1 中间体的红外图谱, 目标产物的红外光谱图中在 N—C 键和磺酸基—SO₃ 的基础上多了饱和碳链—CH₃、羰基—C=O、酰胺基—CO—N, 与目标产物结构一致。

由于最终产物的分子结构是完全对称的, 故只讨论其结构的一半。最终产物的 ¹HNMR 数据 (600 MHz, D₂O), δ : 6.59~6.67 (m, 4H, —C₆H₄

—), 2.30~2.34 (m, 4H, —CH₂—CH₂—SO₃Na), 0.87~0.91 [d, 28H, —(CH₂)₁₄—], 1.27 (d, 3H, —CH₃), 根据 ¹HNMR 数据可以看出, 不同官能团中氢原子的化学位移与理论值相吻合, 证明所合成的化合物为目标产物。综合红外光谱和核磁氢谱表征结果, 证明所合成产物为目标化合物 DS16-P-16。

2.2 DS16-P-16 的克拉夫特点研究

Krafft 点是离子型表面活性剂的重要特征之一, 它可以反映离子型表面活性剂在水中溶解性与温度的关系。经检测该表面活性剂溶液在 4 °C 的冰箱中放置 24 h 仍澄清透明, 这说明 DS16-P-16 的克拉夫特点小于 4 °C, 表明其具有良好的水溶性。这是由于分子结构中引入了酰胺键, 酰胺键属于亲水性基团, 增强了表面活性剂在水中的溶解性^[13]。

2.3 DS16-P-16 的表/界面活性研究

2.3.1 表面活性

考察了双子表面活性剂 DS16-P-16 水溶液在 25 °C 下表面张力与浓度的关系, 结果见图 3。

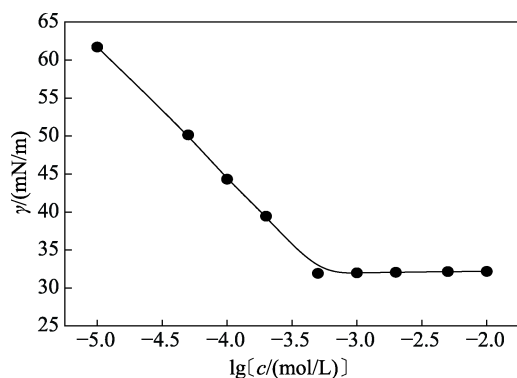


图 3 双子表面活性剂 S16-P-16 的 γ -lgc 曲线
Fig. 3 γ -lgc curve of Gemini surfactant DS16-P-16

由图 3 可知, 随着 DS16-P-16 浓度的增加, 溶液的表面张力逐渐下降; 当浓度增加到一定值后, 表面张力的变化趋于平稳。由图中曲线的转折点可以得到 DS16-P-16 的临界胶束浓度 (CMC) 为 5.01×10^{-4} mol/L, γ_{CMC} (超过临界胶束时的表面张力) 为 31.9 mN/m。并将其与传统的表面活性剂十二烷基硫酸钠 (SDS) 的表面活性做对比, 结果见表 1。其中, pC_{20} 为水的表面张力降低 20 mN/m 时所需 DS16-P-16 溶液浓度的负对数^[14]。

表 1 两种表面活性剂的 cmc 值和临界表面张力
Table 1 CMC values and critical surface tension of two surfactants

	DS16-P-16	SDS ^[11]
CMC/(mol/L)	5.01×10^{-4}	8×10^{-3}
$\gamma_{\text{CMC}}/(\text{mN/m})$	31.9	38.0
pC_{20}	3.61	2.51

由表 1 可知, 与传统表面活性剂相比, 阴离子型双子表面活性剂 DS16-P-16 的临界胶束浓度降低了 1 个数量级, γ_{CMC} 降低了 6.1 mN/m, pC_{20} 也高于传统表面活性剂, 显示出高的表面活性。这主要是因为双子表面活性剂中, 两个离子头基是靠联接基团通过化学键连接的, 由此造成两个表面活性剂离子头基的紧密连接, 使其碳氢链更容易产生强相互作用, 这样不仅增强了碳氢链的疏水缔合力, 而且离子头基间的排斥倾向受制于化学键力而被大大削弱。这是双子表面活性剂较传统表面活性剂具有更高表面活性的根本原因^[15]。并且 DS16-P-16 的 γ_{CMC} 低于 SDS, 是因为对于刚性联接基团双子表面活性剂来说, 柔性的疏水碳链增加了表面活性剂水溶液表面饱和和吸附时最外层原子或原子团在水表面的排列紧密度, 从而使得 γ_{CMC} 降低^[16]。

2.3.2 界面活性

将合成的双子表面活性剂配制成质量分数分别为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5% 的溶液, 利用旋滴界面张力仪, 测定不同质量分数表面活性剂溶液与原油在不同温度下的油/水界面张力^[17], 数据见表 2。

表 2 不同质量分数及不同温度下 DS16-P-16 溶液与原油间的界面张力

Table 2 Interfacial tensions between DS16-P-16 solutions with different mass fraction and crude oil at different temperature, respectively

w(DS16-P-16)/%	界面张力/(mN/m)	
	30 °C	45 °C
0.1	8.18×10^{-2}	7.43×10^{-2}
0.2	5.82×10^{-2}	5.34×10^{-2}
0.3	4.77×10^{-2}	3.87×10^{-2}
0.4	3.66×10^{-2}	2.85×10^{-2}
0.5	2.18×10^{-2}	1.46×10^{-2}

由表 2 可知, DS16-P-16 与原油的油/水界面张力随着质量浓度和温度的增加逐渐下降, 且都达到了低界面张力数量级 (1×10^{-2} mN/m), 由此可知 DS16-P-16 具有有效降低油水界面张力的特性。这是因为刚性联接基长度大于两个离子头基间的平衡距离, 联接基团处于完全伸长状态的同时也增大了表面活性剂的疏水区体积, 致使表面活性剂分子在油/水界面的排列更紧密, 降低界面张力的能力增强^[18]。

2.4 DS16-P-16 的起泡性与稳泡性

测定合成表面活性剂的起泡性和稳泡性, 并在相同条件下测定了传统表面活性剂 SDS 质量分数为 0.1% 时的泡沫高度和稳泡性, 结果见表 3。

初始泡沫高度是反映表面活性剂起泡能力的指标, 与表面张力密切相关, 泡沫稳定性与泡沫强度

有关。由表3可知,在质量分数0.1%时,该磺酸盐型双子表面活性剂的起泡性和稳泡性都优于传统的单基表面活性剂,这是由于联接基削弱了两个离子头基间的静电排斥作用,增强了疏水碳链之间内聚力,刚性联接链使分子在空气/液体界面处排列更加紧密更加规整,单个表面活性剂分子在界面上的吸附面积更小,分子间相互作用增强;同时酰胺键的引入,形成分子间氢键,能更有效地降低水的表面张力,提高界面膜的弹性,界面膜黏度也会随之增大,因而发泡能力和稳泡性皆强于传统表面活性剂^[19]。

表3 两种表面活性剂的泡沫高度和稳定性
Table 3 Foam height and stability of two surfactants

表面活性剂	泡沫高度/cm		稳泡性/%
	初始	5 min 后	
DS16-P-16	28	26	93
SDS	15	9	60

2.5 DS16-P-16的乳化性

在相同条件下测定质量分数为0.1%的十二烷基硫酸钠(SDS)的乳化能力,分出水的时间越长,乳化能力越好,两种表面活性剂乳化能力测试结果见表4。

表4 两种表面活性剂的性能参数
Table 4 Performance parameters of two surfactants

表面活性剂	乳状液类型	分离时间/s
DS16-P-16	水包油(O/W)型	437
SDS	水包油(O/W)型	128

由表4可知,所合成表面活性剂具有很好的乳化能力。研究发现,普通乳状液的液珠聚集成更大的液珠并最终导致乳状液破裂的速率取决于许多因素,其中,界面膜强度是影响普通乳状液稳定性的主要因素之一,表面活性剂也通过降低体系的界面张力来稳定乳状液^[20]。显然,所合成表面活性剂一方面通过刚性联接基减弱离子头基间的排斥倾向,增强了分子在界面处的吸附排列,另一方面通过疏水碳链一侧的酰胺键形成强的分子间氢键,这两者起着增加界面膜稳定性的作用;此外,该表面活性剂还有很好的降低油水两相界面张力的作用,所以在质量分数0.1%下,DS16-P-16具有比常规表面活性剂更优异的乳化能力。

3 结论

(1)以对苯二胺、氯乙基磺酸钠、棕榈酰氯等为原料,经两步反应合成了一种以刚性链为联接链的酰胺基磺酸盐型双子表面活性剂DS16-P-16,总

收率为73.9%,纯度为97.6%,FTIR和¹HNMR证实了最终产物及其中间体的分子结构。

(2)DS16-P-16的临界胶束浓度CMC为 5.01×10^{-4} mol/L,是传统表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)CMC的6.26%, γ_{CMC} 为31.9 mN/m,比SDS低6.1 mN/m, pC_{20} 为3.61,比SDS高出1.1,与SDS相比,具有更高的表面活性和突出的降低水表面张力的效率。

(3)DS16-P-16在较低温度下可将其与原油间的油/水界面张力降低到低界面张力 1×10^{-2} mN/m数量级,质量分数0.5%该溶液在45℃下可将油水界面张力降低至 1.46×10^{-2} mN/m。

(4)泡沫性能结果表明,在质量分数为0.1%时,与SDS(初始起泡高度15 cm,稳泡性60%)相比,合成表面活性剂具有很好的起泡能力和稳泡能力,初始起泡高度为28 cm,稳泡性可达93%。

(5)乳化性能测试表明,在质量分数为0.1%时,与SDS(128 s)相比,合成表面活性剂具有很好的乳化能力,分出5 mL水的时间是437 s。

本文所合成表面活性剂是一种具有良好水溶性、高表面活性、低界面张力、好的泡沫性能和乳化能力的阴离子型双子表面活性剂,在油田化学品方面有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Zhao Jianxi (赵剑曦). A new generation of surfactants: Geminis[J]. Progress in Chemistry (化学进展), 1999, (4): 348-357.
- [2] Wang Yunfei (王云斐), Liu Yun (刘云). Progress in the synthesis of gemini surfactants[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2004, 21(2): 98-103.
- [3] Tsubone K, Arakawa Y, Rosen M J. Structural effects on surface and micellar properties of alkanediyl- α,ω -bis(sodium *N*-acyl- β -alaninate) gemini surfactants[J]. J Colloid Interface Sci, 2003, 262(2): 516-524.
- [4] Kabir U D, Shafi M, Bhat P A, et al. Solubilization capabilities of mixtures of cationic Gemini surfactant with conventional cationic, nonionic and anionic surfactants towards polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167(1): 575-581.
- [5] Zana R, Xia J. Gemini surfactants: synthesis, interfacial and solution-phase behavior, and applications[M]. Marcel Dekker, 2004: 348.
- [6] Murguia M C, Cristaldi M D, Porto A, et al. Synthesis, surface-active properties, and antimicrobial activities of new neutral and cationic trimeric surfactants[J]. Journal of Surfactants & Detergents, 2008, 11(1): 41-48.
- [7] Asefi D, Mahmoodi N M, Arami M. Effect of nonionic co-surfactants on corrosion inhibition effect of cationic gemini surfactant[J]. Colloids & Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects, 2010, 355(1): 183-186.
- [8] Ye Zhiwen (叶志文), Lv Chunxu (吕春绪), Qian Hua (钱华). Synthesis and characterization of new quaternary ammonium gemini surfactants[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2005, (S1): 137-139.