

表面活性剂

煤基烷基苯磺酸盐表面活性剂复配体系的性能

包利宁¹, 李健斌¹, 王晓虹¹, 董庆文¹, 李旭^{1*}, 董晋湘^{1,2*}

(1. 太原理工大学 化学与化工学院 化学产品工程山西省重点实验室, 山西 太原 030024; 2. 广东工业大学 轻工化工学院, 广东 广州 510006)

摘要: 将自制的十二烷基苯磺酸钠(SDDBS)、C6二聚烷基苯磺酸钠(SC6DBS)和双己基烷基苯磺酸钠(SDHBS) 3种煤基同分异构型烷基苯磺酸盐分别与异构十三醇聚氧乙烯醚(9)(IC13EO9)进行复配, 得到了3种复配体系 SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9, 采用紫外-可见分光光度计、表面张力仪、动态光散射仪、液滴形状分析仪、立式去污机考察了不同复配比例(质量比, 下同)对3种复配体系的表面活性剂稳定性、表面张力、胶束聚集行为、润湿性能、泡沫性能、乳化性能以及去污性能的影响。结果表明, 烷基苯磺酸盐和 IC13EO9 质量比为 5:5 的复配体系表现出最佳的协同增效作用; SDHBS/IC13EO9 表现出较好的润湿性能(30 s 的水接触角为 53.0°)、泡沫性能(泡沫半衰期为 349.2 s)和乳化性能(乳化时间为 1035 s), 具有与商用十二烷基苯磺酸钠(LAS)/IC13EO9 复配体系相当的去污性能。

关键词: 同分异构型烷基苯磺酸盐; 异构十三醇聚氧乙烯醚; 复配体系; 动态表面张力; 动态光散射; 去污性能; 表面活性剂

中图分类号: TQ423.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214(2025)07-1553-11

Properties of coal-based alkylbenzene sulfonate surfactants compound system

BAO Lining¹, LI Jianbin¹, WANG Xiaohong¹, DONG Qingwen¹, LI Xu^{1*}, DONG Jinxiang^{1,2*}

(1. Shanxi Key Laboratory of Chemical Product Engineering, College of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. School of Chemical Engineering and Light Industry, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: Three kinds of coal-based isomeric alkylbenzene sulfonates, homemade sodium dodecylbenzene sulfonate (SDDBS), sodium C6 dimer alkylbenzene sulfonate (SC6DBS) and sodium dihexylbenzene sulfonate (SDHBS), were compounded with isomeric tridecanol polyoxyethylene ether (9) (IC13EO9) to obtain three compound systems SDDBS/IC13EO9, SC6DBS/IC13EO9 and SDHBS/IC13EO9. The effects of different compounding ratios (mass ratios, the same below) on surfactant stability, surface tension, micellar aggregation, wettability, foam properties, emulsification properties and decontamination performance of the three compound systems were evaluated by ultraviolet-visible spectrophotometer, surface tensiometer, dynamic light scattering instrument, drop shape analyzer, vertical decontamination machine. The results showed that the compound system of alkylbenzene sulfonate and IC13EO9 with a mass ratio of 5:5 displayed the best synergistic effect. The SDHBS/IC13EO9 exhibited good wettability (water contact angle of 53.0° at 30 s), foam properties (foam half-life of 349.2 s) and emulsifying properties (emulsifying time of 1035 s), demonstrating comparable decontamination performance to commercial sodium dodecyl benzene sulfonate (LAS)/IC13EO9 compound system.

Key words: isomeric alkylbenzene sulfonates; isomeric tridecanol polyoxyethylene ether; compound system; dynamic surface tension; dynamic light scattering; decontamination performance; surfactants

收稿日期: 2024-06-29; 定用日期: 2024-08-06; DOI: 10.13550/j.jxhg.20240523

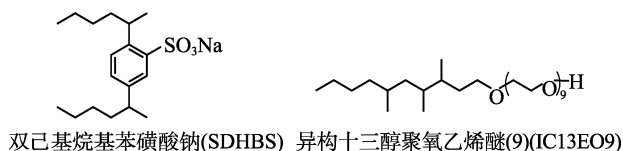
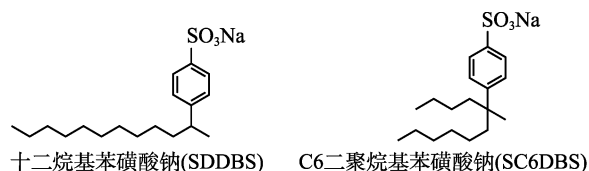
基金项目: 国家自然科学基金项目(22078219, U21A20315, 22378290)

作者简介: 包利宁(1996—), 男, 博士生, E-mail: zgbln1795@163.com。联系人: 李旭(1987—), 男, 博士, 讲师, E-mail: lixu0121@126.com; 董晋湘(1963—), 男, 博士, 教授, E-mail: dongjinxiangwork@hotmail.com。

烷基苯磺酸盐是一类重要的阴离子表面活性剂,其合成工艺成熟,具有性能优良、性价比较高的特点,常被添加到各种重垢清洁剂和洗涤剂中,广泛应用于民用清洗领域^[1-3]。烷基苯磺酸盐的生产是烷基苯经磺化、碱中和来实现的,烷基苯则是苯与长链烯烃(通常来源于石油化工)烷基化获得^[4]。中国的能源资源现状是“富煤贫油少气”,煤炭资源储量丰富,占主导地位。近些年,随着煤化工技术的快速发展,合成气通过费托合成(FTS)技术转化为烯烃的研究取得了许多突破性进展^[5-6]。煤基费托合成的液体产物中含有超过 60%的线型 α -烯烃,其碳数范围分布较广(C6~C25)^[7]。事实上,煤基费托合成的 C12 线型 α -烯烃能直接与苯进行烷基化反应合成十二烷基苯,进一步衍生可得到阴离子表面活性剂——十二烷基苯磺酸钠。然而,碳数较短的线型 α -烯烃,尤其是 C5~C9 的线型 α -烯烃,通常被用作燃料^[8],若能将其化学转化为增值精细化学品则更加有意义。基于此,本课题组在前期工作中,报道了两种提高短链线型 α -烯烃附加值的有效策略。策略(1)是先将短链线型 α -烯烃进行二聚反应以延长碳链获得支链二聚烯烃,随后与苯烷基化反应生成支链烷基苯^[9];策略(2)是直接将短链线型 α -烯烃与苯进行烷基化反应合成双烷基苯^[10]。上述策略合成的烷基苯磺酸盐,是与十二烷基苯磺酸钠属于碳数相同而烷基苯结构不同的同分异构型烷基苯磺酸盐^[4]。

表面活性剂复配体系通常会具有比单一体系更加优良的性能,其研究引起了学术界和工业界的广泛兴趣^[11-13]。阴/非离子表面活性剂复配体系作为常见的表面活性剂复配体系,是清洗剂配方的重要组成部分^[14-16]。尤其是阴离子表面活性剂,是洗涤剂配方中不可或缺的表面活性成分。调控阴离子表面活性剂的亲/疏水端结构,能获得表面活性剂性能更加优异的复配体系^[17-20],提升洗涤剂配方的去污作用。

本文在前期研究工作的基础上,拟以煤基同分异构型烷基苯磺酸盐〔十二烷基苯磺酸钠(SDDBS)、C6二聚烷基苯磺酸钠(SC6DBS)和双己基烷基苯磺酸钠(SDHBS)〕/异构十三醇聚氧乙烯醚(9)(IC13EO9)复配体系为基础(结构式如下所示),探究烷基苯磺酸盐的疏水端结构对复配体系基本性能的影响。对照商用十二烷基苯磺酸钠/异构十三醇聚氧乙烯醚复配体系,考察3种煤基同分异构型烷基苯磺酸盐复配体系的润湿、泡沫、乳化及去污性能。以期为提高煤基 C5~C9 的 α -烯烃附加值,拓展煤炭的资源化利用途径提供参考。



1 实验部分

1.1 试剂与仪器

SDDBS、SC6DBS、SDHBS,自制^[4];商用十二烷基苯磺酸钠(LAS,质量分数>98%),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;IC13EO9,工业品〔异构十三醇质量分数<1%,聚乙二醇(PEG)质量分数<5%〕,沙索(中国)化学有限公司;液体石蜡(密度0.830~0.860 g/mL),上海阿达玛斯试剂有限公司;去离子水,自制。

Lambda 850型紫外-可见分光光度计(UV-Vis),美国PerkinElmer公司;BP100型动态表面张力仪、K100C型静态表面张力仪、DSA100型液滴形状分析仪、DFA100型动态泡沫分析仪,德国KRÜSS公司;Litesizer 500型纳米粒度分析仪,奥地利Anton Paar GmbH公司;DM750P型光学显微镜,德国Leica公司;RHLQ-III型立式去污机,中国日用化学工业研究院有限公司;Ci7600型白度仪,美国Xrite公司。

1.2 方法

首先,分别将4种表面活性剂(SDDBS、SC6DBS、SDHBS和IC13EO9)加入去离子水中配成质量浓度均为10 g/L的表面活性剂溶液。其次,各取5 mL上述配制的SDDBS溶液和IC13EO9溶液于100 mL容量瓶中,并加水稀释到100 mL,获得总质量浓度为1.0 g/L且质量比为5:5的复配表面活性剂SDDBS/IC13EO9。最后,按照第2步,将SDDBS溶液替换成SC6DBS溶液或SDHBS溶液,分别获得复配表面活性剂SC6DBS/IC13EO9和SDHBS/IC13EO9。

1.3 表征和测试

1.3.1 稳定性测试

按照文献[21]方法,将1 g复配表面活性剂加入到99 g水中配成质量分数1.00%的复配表面活性剂水溶液,超声充分溶解后于25 °C环境静置2 h。然后,将其转移至干净玻璃比色皿,使用UV-Vis测试溶液在 $\lambda=500$ nm处的透过率,以此作为评价复配体系溶液稳定性的指标。

1.3.2 动态表面张力测试

首先,将 1 g 复配表面活性剂加入到 1 L 水中配成质量浓度为 1.00 g/L 的复配表面活性剂水溶液(下同)。然后,通过最大泡压法^[12]在动态表面张力仪上测试其在(25.0±0.1) °C 下的动态表面张力。测量的有效表面年龄为 0.01~100 s(或 0.01~200 s)。最后,采用 Rosen 模型^[22],根据公式(1)~(6),计算 3 种复配体系表面活性剂分子在气/液上的吸附扩散参数 [n 、 t_m (s)、 t_i (s)、 $R_{1/2}$ (mN·s/m)]^[23-24]。

$$\frac{\gamma_0 - \gamma_t}{\gamma_t - \gamma_m} = \left(\frac{t}{t^*}\right)^n \quad (1)$$

$$\frac{\gamma_0 - \gamma_t}{\gamma_t - \gamma_m} = K \quad (2)$$

$$\lg K = n(\lg t - \lg t^*) \quad (3)$$

$$\lg t_m = \lg t^* + \frac{1}{n} \quad (4)$$

$$\lg t_i = \lg t^* - \frac{1}{n} \quad (5)$$

$$R_{1/2} = \frac{\gamma_0 - \gamma_m}{2t^*} \quad (6)$$

式中: γ_0 为纯水 25 °C 时空气/水界面的表面张力, 72.00 mN/m; γ_t 为在时间 t 时表面活性剂溶液的表面张力, mN/m; γ_m 为中间平衡时的表面张力, mN/m; t^* 为 γ_t 到达 γ_0 和 γ_m 中间值所需要的时间, s; K 为过渡变量; n 是一个与表面活性剂分子结构有关的无量纲常数,其数值与表面活性剂的吸附能和脱附能之间的差异有关^[25]; t_m 为介平衡区开始的时间, s; t_i 为引导区开始至结束的时间^[26], s; $R_{1/2}$ 为表面张力快速下降区 t^* 处的下降速率, mN·s/m,其值越大,表面张力的降低越快,动态表面活性越高。

1.3.3 静态表面张力测试

首先,配制质量浓度为 1.00 g/L 的复配表面活性剂水溶液;然后通过 Wilhelmy 铂金板法^[27]在静态表面张力仪上测试其在(25.0±0.1) °C 下的静态表面张力。以表面张力(γ)对浓度的对数($\lg c$)生成静态表面张力曲线。从 γ - $\lg c$ 曲线得到相应的临界胶束浓度(CMC, mol/L)和平衡表面张力(γ_{CMC} , mN/m)。根据 Gibbs 吸附方程^[28-30] [公式(7)~(12)]计算表面活性剂分子在气/液界面的吸附参数(Γ_{max} 、 A_{min} 、 pc_{20} 、 ΔG_{ads}^0)和在本体溶液中胶束化参数 ΔG_{mic}^0 。

$$\Gamma_{max} = -\frac{1}{2.303nRT} \left(\frac{d\gamma}{d \lg c} \right)_T \quad (7)$$

$$A_{min} = \frac{10^{16}}{N_A \Gamma_{max}} \quad (8)$$

$$\Pi_{CMC} = \gamma_0 - \gamma_{CMC} \quad (9)$$

$$pc_{20} = -\lg c_{20} \quad (10)$$

$$\Delta G_{mic}^0 = RT \ln \left(\frac{CMC}{55.5} \right) \quad (11)$$

$$\Delta G_{ads}^0 = \Delta G_{mic}^0 - \frac{\Pi_{CMC}}{\Gamma_{max}} \quad (12)$$

式中: Γ_{max} 为表面活性剂分子在气/液界面的饱和吸附量, mol/m²; A_{min} 为气/液界面单个表面活性剂分子所占的最小面积, nm²; pc_{20} 为表面活性剂的效率; Π_{CMC} 为达到临界胶束浓度时的表面压, mN/m; ΔG_{mic}^0 和 ΔG_{ads}^0 分别为表面活性剂分子在水溶液中的胶束化吉布斯自由能和在气/液界面上的吸附吉布斯自由能, kJ/mol; R 为理想气体常数, 8.3145 J/(mol·K); T 为热力学温度, K; γ 为表面张力, mN/m; n 为离子种类数^[12], 取值 3; c 为表面活性剂溶液的浓度, mol/L; N_A 为阿伏加德罗常数, 6.02×10^{23} mol⁻¹; CMC 为临界胶束浓度, mol/L; γ_0 为纯水的表面张力, 72.00 mN/m; γ_{CMC} 为平衡表面张力, mN/m; c_{20} 为表面张力为 20.00 mN/m 时的表面活性剂溶液浓度, mol/L。

1.3.4 动态光散射测试

首先,配制质量浓度为 1.00 g/L 的复配表面活性剂水溶液,然后使用孔径为 0.45 μm 的有机滤膜过滤,最后采用配备 He-Ne 激光器的纳米粒度分析仪测定表面活性剂聚集体在(25.0±0.1) °C 下的粒径分布。

1.3.5 润湿性能测试

首先,配制质量浓度为 1.00 g/L 的复配表面活性剂水溶液,选用石蜡膜作为疏水基底材料,然后采用液滴形状分析仪测试其在(25.0±0.1) °C 下的接触角,记录表面活性剂溶液在基底上的接触角大小和液滴轮廓,以此来评价表面活性剂复配体系溶液的润湿性能。所有实验重复 3 次,取算数平均值。

1.3.6 泡沫性能测试

首先,配制质量浓度为 1.00 g/L 的复配表面活性剂水溶液,然后采用动态泡沫分析仪研究其在(25.0±0.1) °C 下的泡沫性能。将表面活性剂溶液加入装有烧结玻璃过滤器(孔径 40~100 μm)的圆柱形玻璃容器(长度 250 mm,直径 40 mm)中,以 0.20 L/min 的气速鼓泡 5 s,测量过程总运行时间为 1200 s。所有实验重复 3 次,取算数平均值。

1.3.7 乳化性能测试

首先,配制质量浓度为 1.00 g/L 的复配表面活性剂水溶液,然后通过分水时间法^[31]测试其乳化性能。取 40 mL 待测表面活性剂溶液和 40 mL 液体石蜡于 100 mL 烧杯中,使用高速均质机在 10000 r/min 下剪切 12 s 使其乳化,随后将乳状液转移至 100 mL 具塞量筒中,记录分离出 10 mL 水的所需时间,实验重复 3 次,取平均分离时间,作为评价表面活性剂溶液乳化能力的指标。采用光学显微镜观察高速剪切后乳状液的液滴形态,并利用 Image-J 软件对

收集的液滴形态图进行乳液粒径分布分析。

1.3.8 去污性能测试

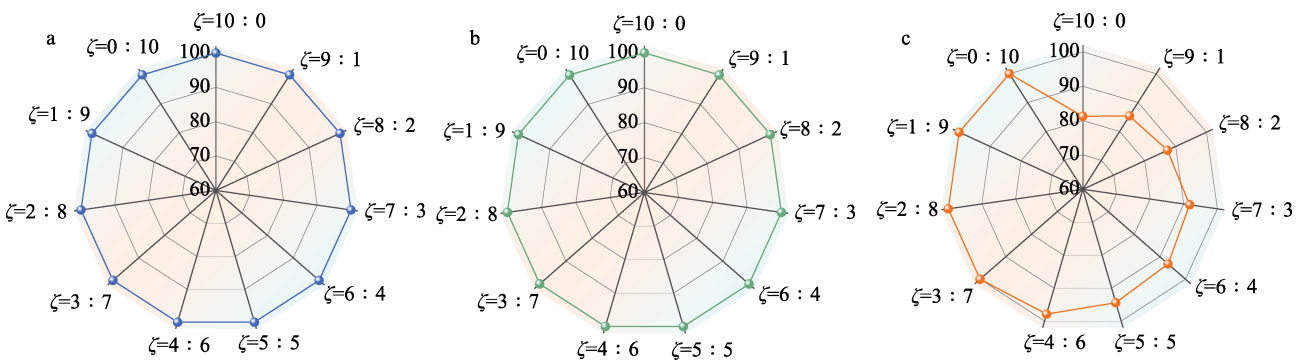
首先, 配制质量浓度为 2.00 g/L 的复配表面活性剂水溶液, 参考 GB/T 13174—2008《衣料用洗涤剂去污力及循环洗涤性能的测定》方法, 采用立式去污机评价表面活性剂溶液对污布(炭黑污布 JB-01、蛋白污布 JB-02 和皮脂污布 JB-03)的去污性能。洗涤时间为 20 min, 搅拌转速为 120 r/min, 洗涤温度为(30.0±0.1) °C。测定洗涤前后污布的白度值, 以两者的差值作为评价表面活性剂去污性能的指标。

2 结果与讨论

2.1 复配体系的稳定性

图 1 为不同复配比例(均为质量比, 下同)的

SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9、SDHBS/IC13EO9 体系的稳定性测试结果。从图 1 可以看出, 3 种复配体系的透过率高低顺序为: SDDBS/IC13EO9≈SC6DBS/IC13EO9>SDHBS/IC13EO9, 这是因为, 同分异构型烷基苯磺酸盐的疏水端结构差异导致相应表面活性剂分子形成胶束的难易程度不同^[4]。其中, SDHBS 拥有较短的有效疏水碳链长度和对称的疏水烷基苯结构, 因形成胶束的能力相对最弱, 所以与 IC13EO9 所组成的复配体系整体透过率相对较小。此外, 随着复配体系中 IC13EO9 添加占比的增加, 其透过率逐渐升高, 尤其是 SDHBS/IC13EO9。尽管因同分异构型烷基苯磺酸盐的疏水端结构差异造成了复配体系透过率的变化, 但 3 种复配体系的整体透过率均高于 80%, 表现出良好的复配稳定性。



ζ 表示烷基苯磺酸盐(SDDBS、SC6DBS、SDHBS)与 IC13EO9 的复配比例; 60~100 均为透过率(%)

图 1 SDDBS/IC13EO9 (a)、SC6DBS/IC13EO9 (b) 和 SDHBS/IC13EO9 (c) 的稳定性

Fig. 1 Stability of SDDBS/IC13EO9 (a), SC6DBS/IC13EO9 (b) and SDHBS/IC13EO9 (c)

2.2 复配体系的动态表面张力

图 2 为 SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的动态表面张力曲线。

动态表面张力是用于评价表面活性剂分子在气/液界面处吸附扩散快慢的依据, 是表面张力随时间的变化曲线。

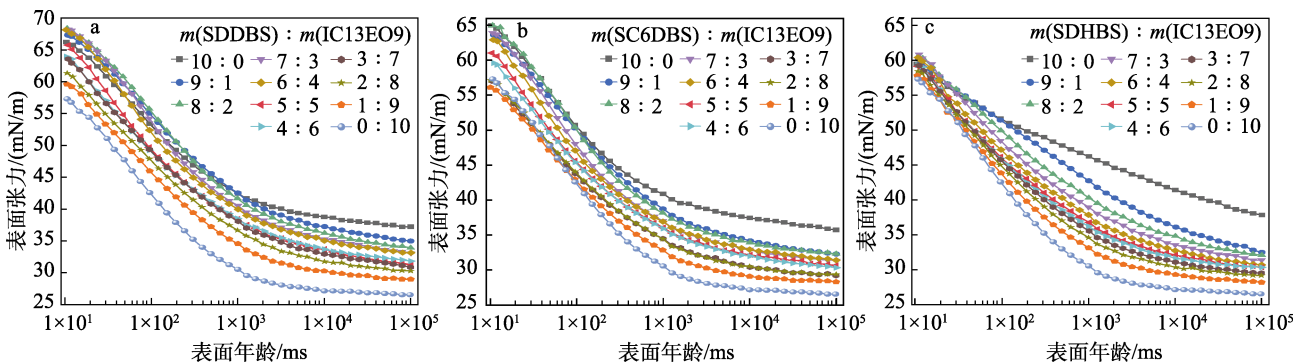


图 2 SDDBS/IC13EO9 (a)、SC6DBS/IC13EO9 (b) 和 SDHBS/IC13EO9 (c) 的动态表面张力曲线

Fig. 2 Dynamic surface tension curves of SDDBS/IC13EO9 (a), SC6DBS/IC13EO9 (b) and SDHBS/IC13EO9 (c)

从图 2a 可以看出, 随着 SDDBS/IC13EO9 中 IC13EO9 添加占比的增加, 10 ms 的表面张力呈现先增加后减小的趋势, 这意味着 SDDBS/IC13EO9 体系随复配比例的变化而体现出先拮抗后协同的效果。其原因是, 当复配体系中具有多支链疏水端结

构的表面活性剂分子 IC13EO9 的添加占比逐渐增加时, 气/液界面上的表面活性剂分子排布变得松散, 这使得表面张力逐渐增大; 尽管如此, 因 IC13EO9 分子具有比 SDDBS 更强的降低表面张力的能力, 当复配比例超过一定值后, 大量的 IC13EO9 分子

排布到气/液界面, 从而致使复配体系的表面张力开始逐渐减小。因此, 体现出先拮抗后协同的复配效果。特别地, 对于 IC13EO9 与 SDDBS 的复配比例高于 5 : 5 的复配体系, 其 10 ms 和 100 s 的表面张力均低于单一的 SDDBS 表面活性剂水溶液, 因此, 5 : 5 的复配比例是体现协同效应的最小比例。

从图 2b 和 c 可以看出, SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 复配比例的改变并不会引起复配体系明显的拮抗作用, 而是表现出良好的协同效果。这是因为, 表面活性剂分子 SC6DBS、SDHBS 和 IC13EO9 的疏水端结构均为支链结构, 随着多支链疏水结构的表面活性剂分子 IC13EO9 添加占比的增加, 其复配体系降低表面张力的效果逐渐增强。因此, 在后续实验中, 对于 3 种复配体系, 优选复配比例为 5 : 5 的表面活性剂复配体系进行深入研究。

图 3a 为复配比例 5 : 5 的 3 种复配体系在 1.00 g/L 质量浓度下的动态表面张力曲线, 表 1 为其参数数据。

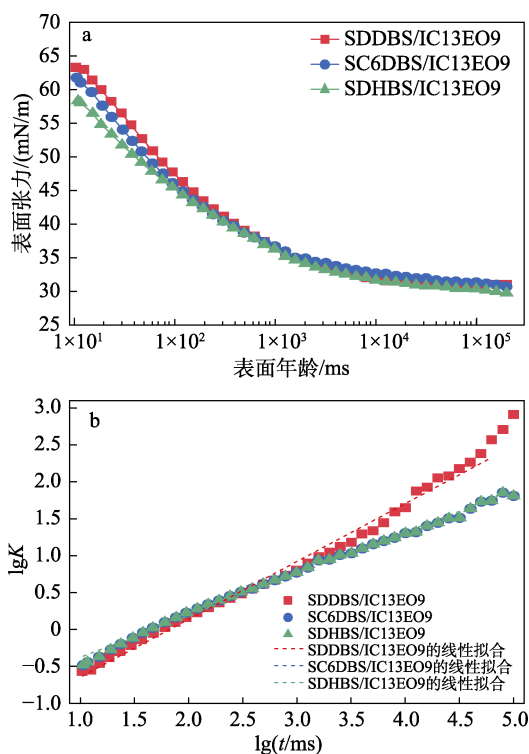


图 3 复配比例 5 : 5 的 SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的动态表面张力曲线 (a) 和 $\lg K$ - $\lg t$ 曲线 (b)

Fig. 3 Dynamic surface tension curves (a) and $\lg K$ - $\lg t$ plots (b) of SDDBS/IC13EO9, SC6DBS/IC13EO9 and SDHBS/IC13EO9 with a compound ratio of 5 : 5

从图 3a 可以看出, 3 种复配体系在 10 ms 时的表面张力大小顺序为: SDDBS/IC13EO9 > SC6DBS/IC13EO9 > SDHBS/IC13EO9。其中, SC6DBS/IC13EO9

和 SDHBS/IC13EO9 具有较低的表面张力。这是因为, 一方面, 表面活性剂分子 SC6DBS 和 SDHBS 的疏水端结构均为支链类型, 使复配体系中的 SC6DBS 和 SDHBS 分子都能够快速迁移至气/液界面, 从而迅速降低表面张力; 另一方面, SDDBS/IC13EO9 中的 SDDBS 分子具有较长的烷基疏水尾链, 其降低表面张力的能力略逊于表面活性剂分子 SC6DBS 和 SDHBS。采用 Rosen 模型, 以图 3a 中的动态表面张力数据为基础, 计算得到对应的 $\lg K$ 和 $\lg t$ 绘制出图 3b, 由图 3b 中线性拟合线的斜率和截距分别得到 n 和 t^* , 其他动态参数由公式 (4) ~ (6) 计算得到, 汇总于表 1 中。

表 1 复配比例 5 : 5 的 SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的动态表面张力参数

Table 1 Dynamic surface tension parameters of SDDBS/IC13EO9, SC6DBS/IC13EO9 and SDHBS/IC13EO9 with a compound ratio of 5 : 5

动态表面张力参数	复配体系		
	SDDBS/IC13EO9	SC6DBS/IC13EO9	SDHBS/IC13EO9
γ_m /(mN/m)	31.01	30.72	29.74
$\gamma_0 - \gamma_m$ /(mN/m)	40.99	41.28	42.26
n	0.783	0.566	0.564
t^*/s	0.066	0.046	0.047
t_m/s	1.258	2.709	2.764
t_i/s	0.004	0.001	0.001
$R_{1/2}$ /(mN·s/m)	308.44	445.28	453.38

从表 1 可以看出, 3 种复配体系的 n 值大小顺序为: SDDBS/IC13EO9 > SC6DBS/IC13EO9 > SDHBS/IC13EO9, 这是因为, 同分异构型烷基苯磺酸盐阴离子表面活性剂的疏水端尾链结构支化度越高, 其 n 值越小。同时, 3 种复配体系达到稳定后的表面张力 (γ_m) 大小顺序为: SDDBS/IC13EO9 > SC6DBS/IC13EO9 > SDHBS/IC13EO9, 表明复配体系 SDHBS/IC13EO9 降低表面张力能力相对较强。

从表 1 还可以看出, SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的 t_i 均最小, 其值为 0.001 s, 而 t_i 越小, 表面活性剂分子越容易从溶液的体相中扩散到表面, 动态表面张力越容易结束诱导区。此外, 3 种复配体系 $R_{1/2}$ 值的大小排序为: SDHBS/IC13EO9 > SC6DBS/IC13EO9 > SDDBS/IC13EO9, $R_{1/2}$ 值的增加表明表面张力的下降速率增加, 因此, SDHBS/IC13EO9 的表面张力下降速率最大。这一结果与复配体系中 3 种烷基苯磺酸盐表面活性剂的亲水性顺序相关, 亲水性的增加促进了表面活性剂分子在体相溶液中的溶解, 从而容易降低新界面的表面张力。

2.3 复配体系的静态表面张力

图 4 为复配比例 5 : 5 的 SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的静态表面张力曲线, 表 2 为其参数数据。

静态表面张力是评价表面活性剂分子降低水表面张力的能力与效率的重要指标。从图 4 可以看出, 3 种复配体系的 CMC 变化大小顺序为: SDDBS/IC13EO9 (0.11 mmol/L) < SC6DBS/IC13EO9 (0.14 mmol/L) < SDHBS/IC13EO9 (0.17 mmol/L), 而 pC_{20} 的变化大小顺序为: SDDBS/IC13EO9 (5.38) > SC6DBS/IC13EO9 (5.28) > SDHBS/IC13EO9 (5.24), 呈现这一规律的原因是, 复配体系中烷基苯磺酸盐疏水端结构的有效尾链长度影响了胶束的形成及界面吸附行为。3 种烷基苯磺酸盐表面活性剂疏水端结构的有效尾链长度大小顺序为: SDDBS > SC6DBS > SDHBS, 而较长的

烷基疏水尾链会增强表面活性剂的疏水性, 有利于表面活性剂分子聚集为胶团, 其 CMC 值随之降低^[18]。

从表 2 还可以看出, 3 种表面活性剂复配体系的 A_{min} 变化大小顺序为: SDDBS/IC13EO9 > SC6DBS/IC13EO9 > SDHBS/IC13EO9, 这与 γ_{CMC} 值的变化一致。表明相对于其他两种复配体系, SDHBS/IC13EO9 的表面活性剂分子在气/液界面的排列较为紧密, 这可能是由于, SDHBS/IC13EO9 的表面活性剂分子具有多支链的疏水结构, 使其易于吸附到气/液界面。此外, 表面活性剂复配体系的 ΔG_{mic}^0 和 ΔG_{ads}^0 均为负值, 这表明复配体系的表面活性剂分子在水溶液中形成胶束和在气/液界面的吸附均是自发进行的。 ΔG_{ads}^0 的绝对值 > ΔG_{mic}^0 的绝对值, 这表明复配体系的表面活性剂分子具有很强的吸附能力, 优先吸附到气/液界面上^[32]。

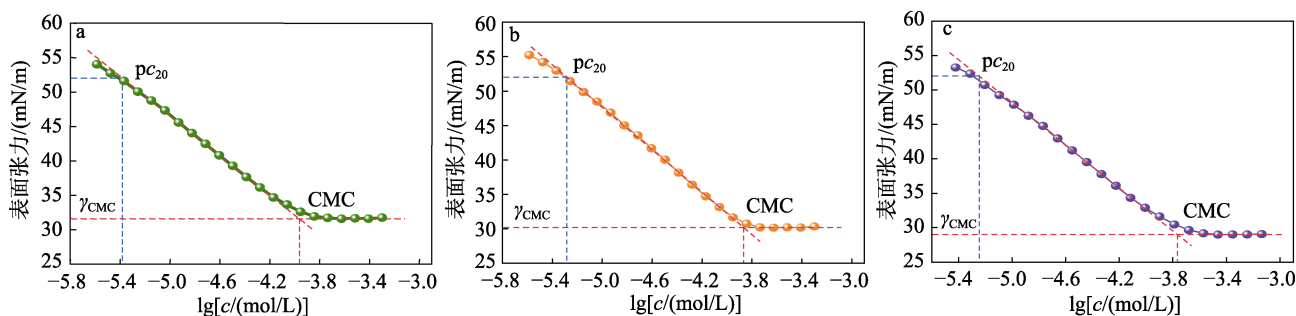


图 4 复配比例为 5 : 5 的 SDDBS/IC13EO9 (a)、SC6DBS/IC13EO9 (b) 和 SDHBS/IC13EO9 (c) 的静态表面张力曲线
Fig. 4 Static surface tension curves of SDDBS/IC13EO9 (a), SC6DBS/IC13EO9 (b) and SDHBS/IC13EO9 (c) with a compound ratio of 5 : 5

表 2 复配比例 5 : 5 的 SDDBS/IC13EO9, SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的静态表面活性参数

Table 2 Surface activity parameters of SDDBS/IC13EO9, SC6DBS/IC13EO9 and SDHBS/IC13EO9 with a compound ratio of 5 : 5

复配体系	表面活性参数						
	CMC/(mmol/L)	pC_{20}	$\gamma_{CMC}/(mN/m)$	$\Gamma_{max}/(\mu mol/m^2)$	A_{min}/nm^2	$\Delta G_{mic}^0/(kJ/mol)$	$\Delta G_{ads}^0/(kJ/mol)$
SDDBS/IC13EO9	0.11	5.38	31.58	0.84	1.98	-32.55	-80.66
SC6DBS/IC13EO9	0.14	5.28	30.20	0.90	1.85	-31.95	-78.56
SDHBS/IC13EO9	0.17	5.24	29.00	0.91	1.83	-31.47	-78.90

2.4 复配体系的动态光散射

图 5 为复配比例 5 : 5 的 SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的聚集体在水中的粒径分布曲线。

从图 5 可以看出, 3 种复配体系均有多种聚集体^[27]。在纳米数量级下, 3 种复配体系的表观等效水动力直径 (DH) 大小顺序为: SDHBS/IC13EO9 > SC6DBS/IC13EO9 > SDDBS/IC13EO9; 而在百纳米数量级下, DH 排序也体现出相同的趋势, 表明 SDDBS/IC13EO9 的聚集体尺寸更小, 这是因为,

SDDBS 较长的烷基疏水尾链, 增强了表面活性剂分子间的疏水相互作用, 使其易于形成聚集体。正是由于同分异构型烷基苯磺酸盐的疏水端结构差异, SDDBS/IC13EO9 和 SC6DBS/IC13EO9 还形成了数千纳米的聚集体, 其 DH 分别为 1196.04 和 1522.74 nm。

2.5 复配体系的润湿性能

图 6 为复配比例 5 : 5 的 LAS/IC13EO9、SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的水接触角。

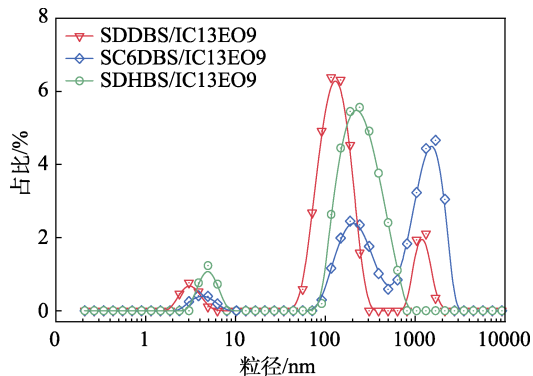


图 5 复配比例 5 : 5 的 SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的聚集体在水中的粒径分布曲线
Fig. 5 Particle size distribution curves of aggregates of SDDBS/IC13EO9, SC6DBS/IC13EO9 and SDHBS/IC13EO9 with a compound ratio of 5 : 5 in water

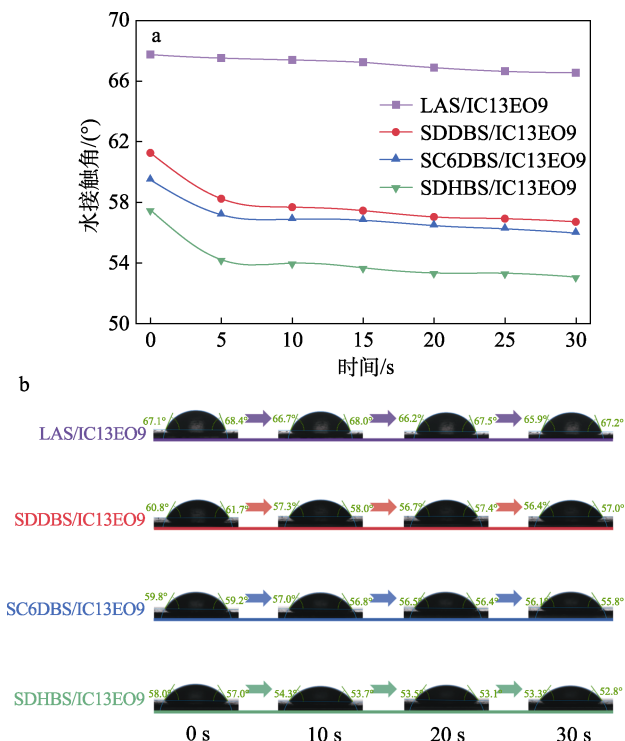


图 6 复配比例 5 : 5 的 LAS/IC13EO9、SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的动态水接触角 (a) 和液滴光学图像 (b)
Fig. 6 Dynamic water contact angle (a) and droplet optical images (b) of LAS/IC13EO9, SDDBS/IC13EO9, SC6DBS/IC13EO9 and SDHBS/IC13EO9 with a compound ratio of 5 : 5

在硬表面清洗过程中, 表面活性剂复配体系水溶液对硬表面的润湿能力是需要考察的重要因素之一^[33]。润湿性能通常使用表面活性剂水溶液的接触角来评价^[34]。从图 6a 可以看出, SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的水接触角均低于 LAS/IC13EO9。从图 6b 可以看出, 30 s 的水接触角大小顺序为: LAS/IC13EO9 (66.5°) > SDDBS/IC13EO9 (56.7°) > SC6DBS/IC13EO9 (55.9°) > SDHBS/IC13EO9 (53.0°), 表明在当前条件下, 与

对照复配体系 LAS/IC13EO9 相比, SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 均具有较好的润湿性, 其中, SDHBS/IC13EO9 的润湿性更加良好。相关研究表明, 表面张力直接影响溶液与基底表面的接触角^[35]。由于表面张力的作用, 液体表面总是有收缩形成一个球体的趋势, 以保证溶液与基底表面的接触面积最小。根据静态表面张力测试结果 (表 2), 3 种复配体系的平衡表面张力 (γ_{CMC}) 大小顺序为: SDDBS/IC13EO9 > SC6DBS/IC13EO9 > SDHBS/IC13EO9, 这一趋势与它们的水接触角大小顺序一致。这是因为, 较低的平衡表面张力, 确保了较小的液体表面收缩趋势, 使溶液与基底表面的接触面积增大, 从而使水接触角变小。

2.6 复配体系的泡沫性能

图 7 为复配比例 5 : 5 的 LAS/IC13EO9、SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的泡沫曲线和泡沫稳定性测试结果。

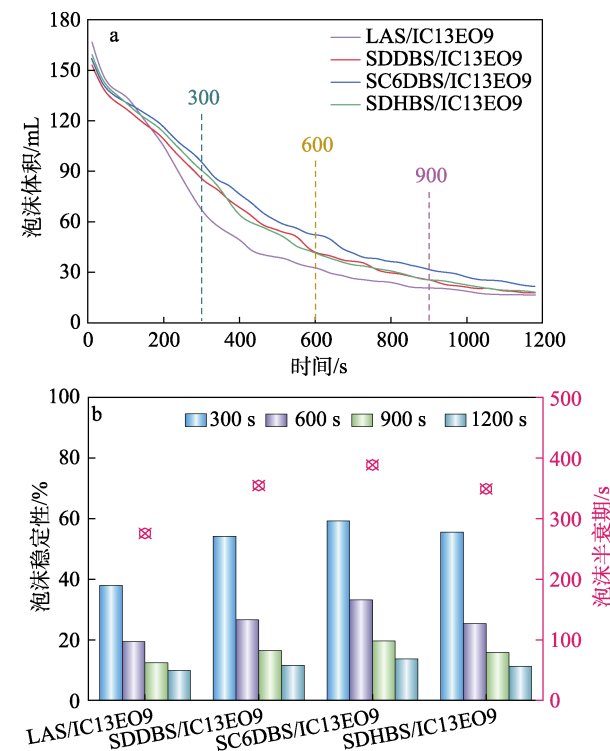


图 7 复配比例 5 : 5 的 LAS/IC13EO9、SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的泡沫体积随时间变化曲线 (a) 和泡沫稳定性 (b)
Fig. 7 Change curves of foam volume versus time (a) and foam stability (b) of LAS/IC13EO9, SDDBS/IC13EO9, SC6DBS/IC13EO9 and SDHBS/IC13EO9 with a compound ratio of 5 : 5

从图 7a 可以看出, 这些复配体系都有相似的泡沫曲线, 其初始泡沫体积基本相当, 1200 s 的泡沫体积均较低 (<40 mL)。泡沫稳定性是指表面活性剂产生泡沫后泡沫的持久性或寿命, 可以通过泡沫半衰

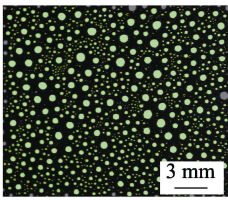
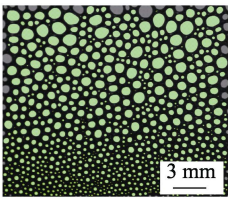
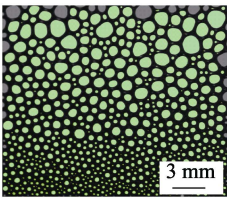
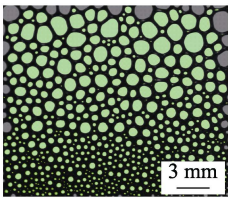
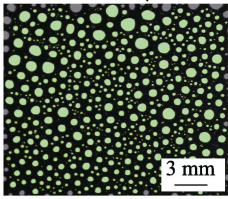
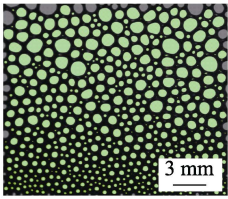
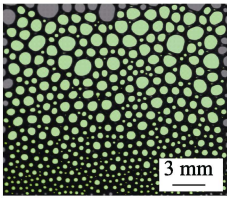
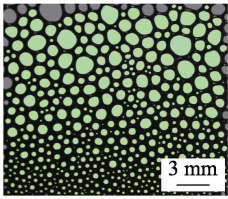
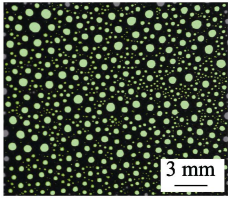
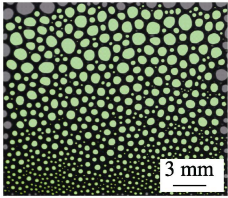
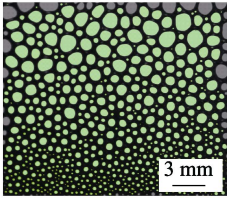
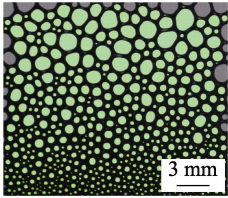
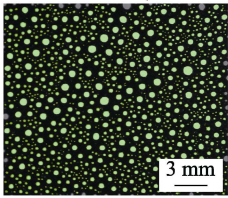
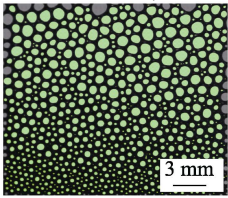
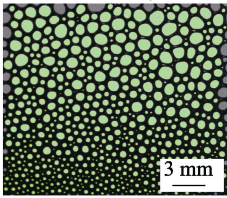
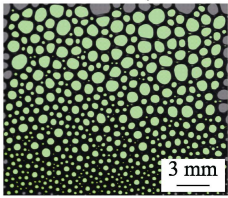
期 (泡沫高度降低到初始泡沫高度一半的时间^[36]) 以及不同时刻剩余泡沫体积的百分比来衡量。从图 7b 可以看出, SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的泡沫半衰期分别为 354.7、388.7、349.2 s; 而 LAS/IC13EO9 的泡沫半衰期为 275.7 s。虽然本文的 3 种复配体系消泡性能较弱于对照复配体系, 但差别并不明显。对于所有的烷基苯磺酸盐

复配体系, 5 min 时的泡沫体积较初始泡沫体积下降近一半, 其泡沫稳定性分别为 54.2% (SDDBS/IC13EO9)、59.3% (SC6DBS/IC13EO9)、55.6% (SDHBS/IC13EO9), 均表现出良好的消泡性能。

表 3 为复配比例 5 : 5 的 LAS/IC13EO9、SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 在不同时刻的泡沫结构微观形态。

表 3 复配比例 5 : 5 的 LAS/IC13EO9、SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 在不同时间的泡沫结构微观形态

Table 3 Foam microstructure morphology of LAS/IC13EO9, SDDBS/IC13EO9, SC6DBS/IC13EO9 and SDHBS/IC13EO9 with a compound ratio of 5 : 5 at various times

复配体系	不同时间的泡沫结构微观形态			
	30 s	300 s	600 s	900 s
LAS/IC13EO9	 BC=37.32 mm ⁻² MBA=26796 μm ²	 BC=16.22 mm ⁻² MBA=61679 μm ²	 BC=12.64 mm ⁻² MBA=79109 μm ²	 BC=10.56 mm ⁻² MBA=94721 μm ²
SDDBS/IC13EO9	 BC=18.41 mm ⁻² MBA=54295 μm ²	 BC=10.33 mm ⁻² MBA=96787 μm ²	 BC=9.62 mm ⁻² MBA=103914 μm ²	 BC=9.41 mm ⁻² MBA=106270 μm ²
SC6DBS/IC13EO9	 BC=29.14 mm ⁻² MBA=34322 μm ²	 BC=13.61 mm ⁻² MBA=73458 μm ²	 BC=12.00 mm ⁻² MBA=83311 μm ²	 BC=10.28 mm ⁻² MBA=97243 μm ²
SDHBS/IC13EO9	 BC=37.66 mm ⁻² MBA=26552 μm ²	 BC=14.96 mm ⁻² MBA=66858 μm ²	 BC=11.97 mm ⁻² MBA=83552 μm ²	 BC=10.25 mm ⁻² MBA=97536 μm ²

注: BC 表示每 mm² 的气泡个数; \overline{MBA} 表示平均气泡面积。

从表 3 可以看出, SDHBS/IC13EO9 在 30 s 时的泡沫结构微观形态相对更加密集 (BC=37.66 mm⁻²), 且平均气泡面积 (\overline{MBA}) 最小 (26552 μm²); 然而, 在 900 s 时, SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的泡沫结构微观形态及分布基本无明显差别, 其 BC 分别为 9.41、10.28 和 10.25 mm⁻²,

\overline{MBA} 分别为 106270、97243 和 97536 μm²。

此外, 通过不同时间的泡沫结构微观形态还可以看出, SDHBS/IC13EO9 与对照复配体系 LAS/IC13EO9 的泡沫形态和排布基本相当。

表 4 为基于测试过程中泡沫结构微观形态分析得到的相关泡沫结构参数。

表 4 复配比例 5 : 5 的 LAS/IC13EO9、SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 在泡沫结构测试中的重要参数

Table 4 Important parameters of LAS/IC13EO9, SDDBS/IC13EO9, SC6DBS/IC13EO9 and SDHBS/IC13EO9 with a compound ratio of 5 : 5 in foam structure test

复配体系	泡沫结构参数							
	$BC_{initial}/mm^{-2}$	$\overline{MBA}_{initial}/\mu m^2$	$R_{avg\ initial}/\mu m$	$R_{32\ initial}/\mu m$	BC_{final}/mm^{-2}	$\overline{MBA}_{final}/\mu m^2$	$R_{avg\ final}/\mu m$	$R_{32\ final}/\mu m$
LAS/IC13EO9	40.85	24478	73	138	10.63	94121	141	284
SDDBS/IC13EO9	20.11	49735	102	201	8.57	116739	157	320
SC6DBS/IC13EO9	32.43	30840	82	154	9.25	108106	151	308
SDHBS/IC13EO9	41.31	24208	75	129	8.63	115825	161	292

注: $BC_{initial}$ 表示每 mm^2 的初始气泡个数; $\overline{MBA}_{initial}$ 表示初始平均气泡面积; $R_{avg\ initial}$ 表示初始平均气泡半径; $R_{32\ initial}$ 表示初始索特平均半径; BC_{final} 表示每 mm^2 的最终气泡个数; \overline{MBA}_{final} 表示最终平均气泡面积; $R_{avg\ final}$ 表示最终平均气泡半径; $R_{32\ final}$ 表示最终索特平均半径。

从表 4 可以看出, 3 种复配体系的初始平均气泡半径 ($R_{avg\ initial}$) 大小排序为: SDDBS/IC13EO9>SC6DBS/IC13EO9>SDHBS/IC13EO9, 最终平均气泡半径 ($R_{avg\ final}$) 大小排序为: SDHBS/IC13EO9>SDDBS/IC13EO9>SC6DBS/IC13EO9。另外, SDHBS/IC13EO9 与对照复配体系 LAS/IC13EO9 具有相当的消泡性能。

2.7 复配体系的乳化性能

表 5 为复配比例 5 : 5 的 LAS/IC13EO9、SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的乳化时间。

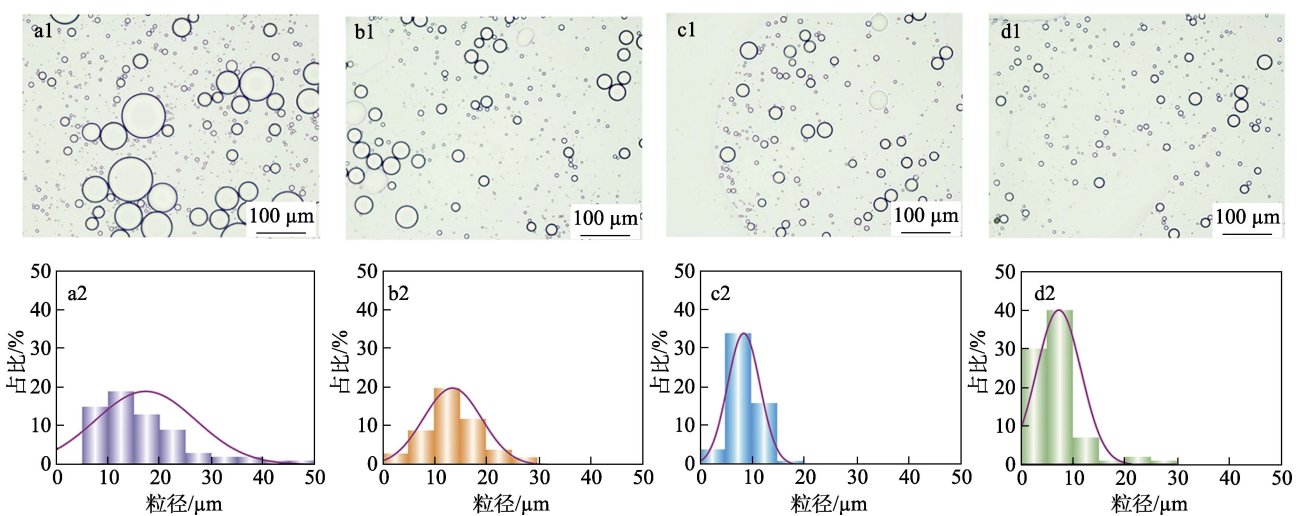
表面活性剂的乳化性能在清洁剂调配等领域至关重要^[37]。从表 5 可以看出, SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的乳化时间均高于对照复配体系 LAS/IC13EO9 (672 s), 其大小排序为: SDHBS/IC13EO9 (1035 s) > SC6DBS/

IC13EO9 (792 s) > SDDBS/IC13EO9 (701 s), 表明 SDHBS/IC13EO9 具有较好的乳化能力。这是因为, SDHBS/IC13EO9 中的表面活性剂分子具有多支链的疏水端结构, 在油/水界面处的排列比较密集, 不但增强了疏水端与油相间的相互作用, 而且还提高了界面膜强度, 从而使乳化时间较长^[38-39]。

图 8 为高速剪切后所形成乳状液的微观形态和液滴粒径分布图。

表 5 复配比例 5 : 5 的 LAS/IC13EO9、SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的乳化时间
Table 5 Emulsification time of LAS/IC13EO9, SDDBS/IC13EO9, SC6DBS/IC13EO9 and SDHBS/IC13EO9 with a compound ratio of 5 : 5

复配体系	LAS/IC13EO9	SDDBS/IC13EO9	SC6DBS/IC13EO9	SDHBS/IC13EO9
乳化时间/s	672	701	792	1035



a1~d1—乳液光学显微图像; a2~d2—乳液粒径分布曲线

图 8 复配比例 5 : 5 的 LAS/IC13EO9 (a1、a2)、SDDBS/IC13EO9 (b1、b2)、SC6DBS/IC13EO9 (c1、c2) 和 SDHBS/IC13EO9 (d1、d2) 的乳液光学显微图像和乳液粒径分布曲线

Fig. 8 Emulsion optical microscopy images and emulsion particle size distribution curves of LAS/IC13EO9 (a1, a2), SDDBS/IC13EO9 (b1, b2), SC6DBS/IC13EO9 (c1, c2) and SDHBS/IC13EO9 (d1, d2) with a compound ratio of 5 : 5

从图 8 可以看出, LAS/IC13EO9、SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 乳液液滴的平均粒径分别为(17.26±9.71)、(13.56±5.62)、(8.58±3.13)、(7.31±4.28) μm 。可以看出, SDHBS/IC13EO9 所形成的乳液液滴尺寸最小。

2.8 复配体系的去污性能

图 9 为复配比例 5 : 5 的 LAS/IC13EO9、SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的去污性能。

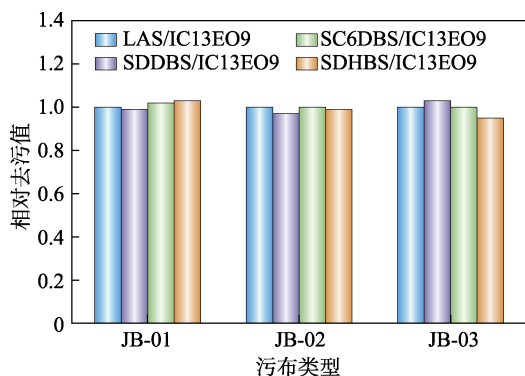


图 9 复配比例 5 : 5 的 LAS/IC13EO9、SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的去污性能
Fig. 9 Detergency performance of LAS/IC13EO9, SDDBS/IC13EO9, SC6DBS/IC13EO9 and SDHBS/IC13EO9 with a compound ratio of 5 : 5

表面活性剂的去污性能是其在实际应用中作为表面活性成分用于清洗污垢的重要应用性能, 反映了表面活性剂分子与织物表面的污渍相互作用, 并在外力的作用下剥离去除的能力。从图 9 可以看出, 对于 3 种不同的污布 (JB-01、JB-02 和 JB-03), LAS/IC13EO9、SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的去污性能相当。其中, 对于炭黑污布 (JB-01), LAS/IC13EO9、SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 的相对去污值分别为 1.00、0.99、1.02 和 1.03。

3 结论

本文以煤基同分异构型烷基苯磺酸盐 (SDDBS、SC6DBS、SDHBS) / 异构十三醇聚氧乙烯醚 (9) 复配体系为基础, 探究了烷基苯磺酸盐表面活性剂的疏水端结构对复配体系性能的影响。

(1) 随着烷基苯磺酸盐疏水端尾链结构的支链化, 亲水基从碳链端点移动至碳链中间, 导致复配体系形成胶束的能力逐渐降低。其 CMC 大小顺序为: SDHBS/IC13EO9 (0.17 mmol/L) > SC6DBS/IC13EO9 (0.14 mmol/L) > SDDBS/IC13EO9 (0.11 mmol/L)。而 γ_{CMC} 大小顺序相反。

(2) 与 SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9

相比, SDHBS/IC13EO9 具有较好的润湿性能、泡沫性能以及乳化性能。

(3) SDDBS/IC13EO9、SC6DBS/IC13EO9 和 SDHBS/IC13EO9 与对照复配体系 (LAS/IC13EO9) 具有相当的去污性能。

3 种煤基同分异构型烷基苯磺酸盐复配体系适用于 LAS 相关的清洗剂配方, 这对于提高煤基 C5~C9 的 α -烯烃的附加值, 拓展煤炭的资源化利用途径具有重要意义。

参考文献:

- [1] SUMMERTON E, ZIMBITAS G, BRITTON M, *et al.* Low temperature stability of surfactant systems[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 60: 23-30.
- [2] LI X, LI J Q, WANG X H, *et al.* Novel branched-chain sulfonate surfactants based on α -olefins from Fischer-Tropsch synthesis via reaction-separation-utilization integrated process[J]. Fuel, 2023, 339: 126961.
- [3] XU Y M (徐一鸣), YUAN H (袁华), LIU S L (刘素丽), *et al.* Study on the continuous synthesis process of industrial mixed linear alkyl benzene sulfonates in a microchannel reactor[J]. CIESC Journal (化工学报), 2022, 73(3): 1184-1193.
- [4] BAO L N, YANG Y R, LI J B, *et al.* Synthesis and structure-property relationship of coal-based isomeric alkylbenzene sulfonate surfactants[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 696: 134350.
- [5] XU Y F, LI X Y, GAO J H, *et al.* A hydrophobic FeMn@Si catalyst increases olefins from syngas by suppressing C1 by-products[J]. Science, 2021, 371(6529): 610-613.
- [6] BAI B, GUO C X, JIAO F, *et al.* Tuning the crystal phase to form MnGaO_x-spinel for highly efficient syngas to light olefins[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2023, 62: e202217701.
- [7] LI H, ZHANG Z S, SUN G L, *et al.* Performance and mechanism of the separation of C8 α -olefin from F-T synthesis products using novel Ag-DES[J]. AIChE Journal, 2021, 67(8): e17252.
- [8] GU B, KHODAKOV A Y, ORDOMSKY V V. Selectivity shift from paraffins to α -olefins in low temperature Fischer-Tropsch synthesis in the presence of carboxylic acids[J]. Chemical Communications, 2018, 54(19): 2345-2348.
- [9] TAN F, LI X, DONG J. Synthesis of alkylbenzenes via the alkylation of benzene using α -olefin dimers and the surfactant properties of their sulfonates[J]. Tenside Surfactants Detergents, 2022, 59(1): 39-50.
- [10] KONG S S, LI L, CHEN C, *et al.* Synthesis of alkylbenzene from medium-chain olefins catalyzed by an acidic ionic liquid and the surface properties of their sulfonate[J]. Tenside Surfactants Detergents, 2020, 57(2): 129-137.
- [11] QIU J (裘蓁), HE X J (何秀娟), LI Y C (李应成), *et al.* Synergistic enhancement in foaming performance of alkyl disulfonate/amine oxide compound system[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2024, 41(6): 1284-1291.
- [12] LI C H, TAI X M, GUO L X, *et al.* Mixtures of anionic surfactants with single/triple polyoxyethylene chains and Gemini quaternary ammonium surfactant: Interaction and surface activity studies[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 343: 117117.
- [13] BAI X Y, KONG S Q, ZHANG J W, *et al.* Molecular mechanism study of nonionic surfactant enhanced anionic surfactant to improve the wetting ability of anthracite dust[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 686: 133455.
- [14] PANUMONWATEE G, CHAROENSAENG A, ARPORNONG N. Application of hydrophilic-lipophilic deviation equations to the formulation of a mixed-surfactant washing agent for crude rice bran

- oil removal from spent bleaching earth[J]. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2021, 24(6): 949-962.
- [15] LI J H, BAI L, YANG X Q, *et al.* Study on the properties of branched-chain alkyl glycoside nonionic surfactant and anionic surfactant in a mixed system[J]. *Tenside Surfactants Detergents*, 2024, 61(2): 115-124.
- [16] WANG X P (王晓朋). Performance of sodium monoalkylated diphenyl oxide disulfonates and mixed system[D]. Taiyuan: China Research Institute of Daily Chemical Industry (中国日用化学工业研究院), 2019.
- [17] ABDELAZIZ S A, AHMED E M, SADEK M. Synthesis of homologous series of surfactants from renewable resources, structure-properties relationship, surface active performance, evaluation of their antimicrobial and anticancer potentialities[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 13201.
- [18] KONG L L, GANG H Z, WANG Z J, *et al.* Micellization in binary biosurfactant/synthetic surfactant systems: Effects of temperature and hydrophobic group structure of alkyl benzenesulfonate[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 551: 174-184.
- [19] YANG J E, HUANG H J, ZHENG J G, *et al.* Effect of head group of surfactant on the self-assembly structures and aggregation transitions in a mixture of cationic surfactant and anionic surfactant-like ionic liquid[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, 308: 112995.
- [20] SHENG R, QUAN X F, REN Z H, *et al.* Molecular interaction between sodium dodecylbenzene sulfonate and octylphenol polyoxyethylene ether and effect of hydrophilic chain[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 626: 127048.
- [21] DONG Q W, LI X, DONG J X. Synthesis and properties of ethoxylated vicinal diol nonionic surfactants with double hydrophilic head groups[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 634: 127971.
- [22] HUA X Y, ROSEN M. Dynamic surface tension of aqueous surfactant solutions: I. Basic parameters[J]. *Journal of Colloid Interface Science*, 1988, 124(2): 652-659.
- [23] FENG N, ZHAO T, ZHAO Y H, *et al.* Adsorption and aggregation behavior of aliphatic alcohol polyoxyethylene ether phosphate with different ethylene oxide addition numbers[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 586: 124215.
- [24] CHEN P, ZHANG X D, ZHANG P, *et al.* Synthesis of d-gluconic acetal surfactants and their foaming behaviors[J]. *Langmuir*, 2022, 38(48): 14725-14732.
- [25] GAO T, ROSEN M J. Dynamic surface tension of aqueous surfactant solutions: 7. Physical significance of dynamic parameters and the induction period[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1995, 172(1): 242-248.
- [26] ZHANG Q H, LI Y L, SONG Y B, *et al.* Adsorption behavior of branched polyoxyethylene ether carboxylate surfactants[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 538: 361-370.
- [27] WANG Q, SONG Z Y, HAN F, *et al.* Synthesis and properties of pH-dependent *N*-acylglutamate/aspartate surfactants[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 640: 128474.
- [28] ROSEN M J, KUNJAPPU J T. *Surfactants and interfacial phenomena* [M]. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 2012.
- [29] BAI X Y, YAN G C, KONG S Q, *et al.* Suppression of anthracite dust by a composite of oppositely-charged ionic surfactants with ultra-high surface activity: Theoretical calculation and experiments[J]. *Fuel*, 2023, 344: 128075.
- [30] LIU J Y (刘建益), QIAN F (钱飞), FANG Y J (方银军), *et al.* Synthesis and properties of sodium nonylcyclohexanol ethoxylates sulfate[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2024, 41(1): 121-126.
- [31] ZHANG W D, ZHANG W, CHENG Z P, *et al.* Synthesis and aggregation behaviors of nonlinear multiresponsive, multihydrophilic block copolymers[J]. *Macromolecules*, 2011, 44(9): 3366-3373.
- [32] FAN J M, ZHANG J, YANG X Q, *et al.* Synthesis and properties of sodium fatty acyl lactylates[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 653: 129946.
- [33] BAO L N, YANG Y R, LI X, *et al.* Molecular design and experimental study on the alkylation of benzene with C6 olefin dimer with Lewis acidic monoamine ionic liquids and its sulfonate surfactant properties[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, 393: 123564.
- [34] PENG M Y, SHA M, ZHANG D, *et al.* Surface activity, wettability, and aggregation behavior of ecofriendly fluorocarbon surfactant based on double perfluorinated branched short chains[J]. *Langmuir*, 2024, 40(23): 12216-12225.
- [35] NI G H, SUN Q, XUN M, *et al.* Effect of NaCl-SDS compound solution on the wettability and functional groups of coal[J]. *Fuel*, 2019, 257: 116077.
- [36] KUMAR S, MANDAL A. Investigation on stabilization of CO₂ foam by ionic and nonionic surfactants in presence of different additives for application in enhanced oil recovery[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 420: 9-20.
- [37] RAKOWSKA J, RADWAN K, PORYCKA B, *et al.* Experimental study on surface activity of surfactants on their ability to cleaning oil contaminations[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 144: 437-447.
- [38] SHARIPOVA A, AIDAROVA S, CERNOCH P, *et al.* Effect of surfactant hydrophobicity on the interfacial properties of polyallylamine hydrochloride/sodium alkylsulphate at water/hexane interface[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, 438: 141-147.
- [39] ZHANG Q H, LI Y L, SONG Y B, *et al.* Properties of branched alcohol polyoxyethylene ether carboxylates[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, 258: 34-39.