

表面活性剂

温度对 *N*-月桂酰肌氨酸与三乙醇胺反应 产物结构及性能的影响

杭智军^{1,2,3}, 王玉超^{1,2,3}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 矿用油品分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室, 北京 100013)

摘要: 针对 *N*-月桂酰肌氨酸与三乙醇胺的反应过程中产物结构不明确、性能不稳定等问题, 考察了反应温度对 *N*-月桂酰肌氨酸与三乙醇胺反应产物结构的影响, 通过红外光谱、核磁共振氢谱及质谱对其结构进行了分析确认。结果表明: 低温 (75 °C) 条件下, 更容易获得阴离子型表面活性剂 (产物 A), 高温 (130 °C) 条件下, 更容易获得非离子型表面活性剂 (产物 B)。对两种产物的泡沫性能及抗硬水能力进行了对比, 结果显示, 当质量分数小于 0.8% 时, 产物 A 的表面张力大于产物 B 的表面张力, 且在质量分数为 0.15% 时, 表面张力均达到最小, 此时产物 A 与产物 B 的泡沫半衰期分别为 22.56 和 28.26 min。当质量分数为 1.0% 时, 产物 B 的抗硬水能力比产物 A 的提升了 30.5%, 更有利于乳液稳定。

关键词: *N*-月桂酰肌氨酸; 三乙醇胺; 反应温度; 表面活性剂

中图分类号: TQ423 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214(2020)05-0962-06

Effect of temperature on structure and properties of the reaction product of *N*-lauroyl sarcosine and triethanolamine

HANG Zhijun^{1,2,3}, WANG Yuchao^{1,2,3}

(1. Mine Oil Products Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of High Efficient Mining and Clean Utilization of Coal Resources, Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

Abstract: In the reaction process of *N*-lauroyl sarcosine and triethanolamine, the structure of the product is not clear and the performances are unstable. Aiming at these problems, the effects of reaction temperature on the structure of *N*-lauroyl sarcosine triethanolamine reactants were studied. The structure was confirmed by Fourier transform infrared spectroscopy, HNMR and mass spectrometry. The results showed that the anionic surfactant (product A) was more easily obtained at low temperature (75 °C), and the nonionic surfactant (product B) was more easily obtained at high temperature (130 °C). The foam properties and hard water resistance of the two products were compared. It was found that when the mass fraction was less than 0.8%, the surface tension of product A was greater than that of product B. While the mass fraction was 0.15%, the surface tension of product A and product B was the smallest, and their corresponding foam half-lives were 22.56 min and 28.26 min, respectively. When the mass fraction was 1.0%, the ability of product B to resist hard water was 30.5% higher than that of product A, which was more conducive to the stability of emulsion.

Key words: *N*-lauroyl sarcosine; triethanolamine; reaction temperature; surfactants

浓缩液是继乳化油之后,发展起来的热力学稳定体系,主要由各种水性功能添加剂组成,具有优异的润滑、稳定及防锈等功能,经过10多年的推广,浓缩液已成为煤矿液压支架的主要传动介质。作为液压支架的“血液”,浓缩液不仅需要具有良好的乳化性,同时要具有良好的防锈性,因此,表面活性剂等添加剂的选择是浓缩液性能发挥的关键环节。

三乙醇胺由于氮原子上含有孤电子对而呈碱性,可以与有机、无机酸反应生成阴离子型表面活性剂;同时,由于三乙醇胺分子中含有羟基,可以与有机酸反应生成酯型非离子表面活性剂,故反应物配比不同,反应条件不同,所得产物结构有所不同。所以,常用三乙醇胺与各类酸反应,生成性能优异的表面活性剂、润滑剂和防锈剂,用于液压传动介质及金属加工液中,实现水基体系的乳化、润滑及防锈等功效。

随着添加剂工业发展的不断升级,绿色发展理念的不断提高和人们环保意识的不断增强,不仅关注地面的环境污染,煤矿井下的环境问题同样受到广泛的关注。因此,对液压支架用浓缩液的核心添加剂提出了新的要求,高效绿色、一剂多用的复合添加剂成为研究的重点。氨基酸系列表面活性剂具有良好的生物降解性、较好的配伍性及抗菌性等特点,已广泛应用于沐浴露、洗面奶、洗涤剂 and 牙膏等日用化学品中,同样可用于金属加工和液压传动介质等行业中^[1-4]。*N*-月桂酰肌氨酸盐作为常见的氨基酸类表面活性剂,由电负性较大的O、N原子为中心的极性基团和以C、H原子组成的非极性基团构成。在溶液中,极性基团能够和金属离子发生螯合吸附,在金属表面形成单分子层的螯合膜,从而改变了金属的双电层结构,提高了金属离子化过程的活化能;而非极性基团则定向排列于金属表面,形成一层疏水膜,覆盖在金属表面,使其得到保护,从而具有缓蚀效果。因此,*N*-月桂酰肌氨酸盐不仅具有氨基酸类表面活性剂的乳化等基本特性,同时还是一种良好的缓蚀剂^[5-7],作为浓缩液的添加剂,可以同时实现乳化与防锈功能。

目前,已有较多文献对*N*-月桂酰肌氨酸钠的合成方法及性能作了较详细的阐述^[8-11],而对*N*-月桂酰肌氨酸与三乙醇胺反应产物结构及性能的介绍报道甚少。虽然目前*N*-月桂酰肌氨酸与三乙醇胺按一定比例经过简单的升温反应后,在金属加工和液压传动介质等行业已进行了应用,但由于对产物结构认识不够深入,往往出现产品性能不稳定,波动性较大等问题,影响其实际应用效果。本文主要研究反应温度对*N*-月桂酰肌氨酸与三乙醇胺反应产物结构及性能的影响,以期为*N*-月桂酰肌氨酸与

三乙醇胺反应的理论研究及实际应用提供参考。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

三乙醇胺,无色液体,AR,西陇化工股份有限公司;*N*-月桂酰肌氨酸,白色固体,质量分数99%,广州天赐高新材料股份有限公司;1-丁基磺酸-3-甲基咪唑硫酸氢盐、氯化钠等其他试剂均为分析纯,上海泰坦科技股份有限公司;100 mg/L的人工硬水参照煤炭行业标准MT 76—2011^[12]自行配制。称取1.23 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.86 g $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和0.33 g NaCl溶于1.00 L去离子水中,静置过夜,第二天再稀释10倍,即得100 mg/L人工硬水;去离子水,自制。

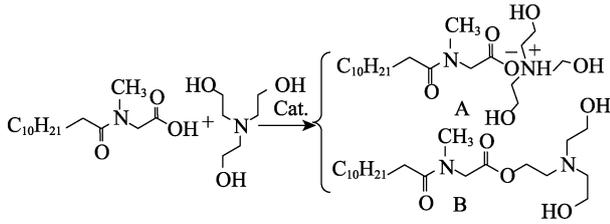
C-MAG HS7数显型磁力搅拌器,德国IKA公司;Nicolet iS5型傅里叶变换红外光谱仪,美国Thermo Scientific公司;DRX 400MHz型核磁共振波谱仪、ESI-Q-TOF型质谱仪,德国Bruker公司;JYW-200型表面张力仪,承德鼎盛公司;气泵、流量计、恒温水浴及带有气体扩散头的鼓气管均源于BF-24润滑油抗泡沫测定器(改进的泡沫测定仪),大连北方分析仪器有限公司;FE38型电导率仪,美国Mettler Toledo公司。

1.2 方法

向250 mL反应瓶中加入三乙醇胺(14.9 g, 0.1 mol),磁力搅拌并油浴升温至75 °C,用恒压漏斗滴加预先融化的*N*-月桂酰肌氨酸(27.1 g, 0.1 mol),滴加完毕后,保温反应1 h,降温得黄色针状固体产物(42.0 g),即为产物A,收率100%;向通有 N_2 的250 mL反应瓶中加入三乙醇胺(14.9 g, 0.1 mol),再加入催化剂1-丁基磺酸-3-甲基咪唑硫酸氢盐^[13](0.87 g,相对于反应物总质量2%),磁力搅拌并油浴升温至130 °C,用恒压漏斗缓慢逐滴滴加融化的*N*-月桂酰肌氨酸(28.45 g, 0.105 mol),滴加完毕后,保温反应1 h,三口烧瓶出口紧连一个干燥管,使反应过程中生成的水随 N_2 带出被干燥剂吸收而离开反应体系,使反应平衡向右移动,所得产物即为粗产物B。

粗产物B用适量质量分数10%的氢氧化钠溶液洗涤,使不溶于水的*N*-月桂酰肌氨酸变成*N*-月桂酰肌氨酸钠,再按饱和氯化钠水溶液与产物B体积比2:8加入饱和氯化钠溶液,最后用分液漏斗分离,弃掉水相,以去除未反应的*N*-月桂酰肌氨酸及催化剂,再在所得的油相中加入无水硫酸镁,除去剩余的水,过滤后经柱层析分离提纯^[14-15]得棕色油状液体(18.91 g)即为产物B,产率47.0%。

反应式如下所示:



1.3 测试与表征

1.3.1 红外光谱测试

将样品直接置于样品池内, 采用傅里叶变换红外光谱仪进行测试, 测试范围为 $600\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 。

1.3.2 核磁共振氢谱分析

产物 A 与产物 B 的 $^1\text{HNMR}$ 通过核磁共振光谱仪进行分析, 重水 (D_2O) 为溶剂。

1.3.3 表面张力测试

产物 A 与产物 B 通过去离子水配制成特定浓度的溶液, 采用表面张力仪通过吊环法进行测试, 在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 每个溶液测试 3 次, 然后取其平均值作为最后的表面张力值。

1.3.4 泡沫性能评价方法

改进的泡沫扫描仪采用鼓气方式产生泡沫, 鼓气结束时测量泡沫的最大体积, 即泡沫的起泡体积。泡沫体积衰减一半, 所用的时间为泡沫半衰期。以去离子水为溶剂配制 250 mL 特定浓度的产物溶液, 置于 1000 mL 的量筒中, 在 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 、空气流速 120 mL/min 的条件下, 用尾端带有气体扩散头的鼓气管, 将气体扩散头置于溶液中下部, 鼓气 5 min , 测量其最大起泡体积以及半衰期。按照泡沫综合指数 (F)^[16-18] 来表征发泡剂的起泡能力、稳泡能力以及泡沫衰减的过程, 用下式计算泡沫的综合指数:

$$F = \int_{t_0}^t f(x) dt$$

式中: F 为泡沫综合指数, $\text{mL}\cdot\text{min}$; t_0 为泡沫达到最大发泡体积所用时间, min ; t 为泡沫的半衰期, min ; $f(x)$ 为发泡高度曲线。

1.3.5 电导率测试

用去离子水将产物 A 与产物 B 配制成质量分数为 0.15% 的溶液, 采用电导率仪进行测试, $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下, 每个溶液测试 3 次, 然后取其平均值作为最后的电导率值。

1.3.6 抗硬水能力测试

参照 GB/T 7381—2010《表面活性剂在硬水中稳定性的测定方法》^[19], $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下, 用已知浓度的人工硬水滴定质量分数为 1.0% 的表面活性剂溶液的抗硬水能力, 利用溶液刚刚变浑浊为止 (滴定速度约 1.0 mL/min) 所用人工硬水的体积作为评价表面活性剂抗硬水能力的定量指标。

2 结果与讨论

2.1 反应温度对产物结构的影响

2.1.1 产物的红外分析

原料及产物的红外光谱图如图 1 所示。从图 1 可以看出, N -月桂酰肌氨酸在 1610 与 1730 cm^{-1} 处分别出现酰胺基与羧基的 $\text{C}=\text{O}$ 基团的伸缩振动吸收峰, 而无羧基中羟基的吸收峰, 因为大多数脂肪酸都以二聚物的形式存在, 一个脂肪酸分子与另外的脂肪酸分子之间靠氢键相结合, 因此没有游离的 COOH 基团存在; 三乙醇胺谱图中, 在 3350 cm^{-1} 处为 —OH 的伸缩振动吸收峰, 1035 cm^{-1} 处是 C—N 基团的伸缩振动吸收峰; 通过产物 A 的红外谱图可以发现, 3350 cm^{-1} 处为 —OH 的伸缩振动吸收峰, 推测经过反应三乙醇胺成功接枝到 N -月桂酰肌氨酸分子上, 但在 1730 cm^{-1} 处未见明显的酯基的 $\text{C}=\text{O}$ 基团吸收峰, 根据反应原理可以推测产物 A 结构为 N -月桂酰肌氨酸三乙醇胺盐。通过产物 B 的红外谱图可以发现, 3350 cm^{-1} 处为 —OH 的伸缩振动吸收峰, 可以推测经过反应三乙醇胺成功接枝到 N -月桂酰肌氨酸分子上, 但在 1730 cm^{-1} 处有明显的酯基的 $\text{C}=\text{O}$ 基团吸收峰, 根据反应原理可以推测产物 B 结构为 N -月桂酰肌氨酸三乙醇胺酯。

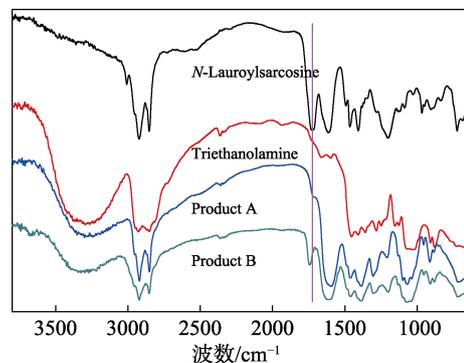


图 1 N -月桂酰肌氨酸、三乙醇胺、产物 A、B 的红外谱图
Fig. 1 FTIR spectra of N -lauroyl sarcosine, triethanolamine, products A and B

2.1.2 产物的核磁共振氢谱分析

产物的 $^1\text{HNMR}$ 谱图如图 2 所示。在高场区, 化学位移为 0.74 与 1.15 处的吸收峰是由 N -月桂酰肌氨酸中甲基 (—CH_3)、亚甲基 (—CH_2) 的振动产生, 化学位移为 2.12 与 2.28 处的吸收峰是由三乙醇胺中 $\text{N}(\text{CH}_2)_3$ 基团产生, 产物 A 与产物 B 的 $^1\text{HNMR}$ 谱图中均出现了上述吸收峰, 可以说明 N -月桂酰肌氨酸与三乙醇胺进行了反应, 在产物 A 与产物 B 的结构中均含有 N -月桂酰肌氨酸与三乙醇胺基团。在低场区, 化学位移为 $10.0\sim 12.0$ 区间内未见

—COOH 上 H 的弱吸收峰, 同样可以说明 *N*-月桂酰肌氨酸与三乙醇胺进行了反应。经过对比可知, 在化学位移 3.67 与 3.76 的吸收峰分别是由产物 A 与产物 B 中羟基 (—CH₂—OH) 产生, 并经峰面积积分计算, 推算产物 A 与产物 B 分子结构中羟基的个数比为 3 : 2。产物 A 的 ¹HNMR 谱图在化学位移 2.75 处多了一个吸收峰, 可以推测其可能为 *N*-月桂酰肌氨酸三乙醇胺盐中游离氢 (—H) 的吸收峰, 其余吸收峰及峰面积比例与产物 A 与产物 B 结构中氢原子数目基本吻合, 整体峰形峰位与文献[2]报道一致。

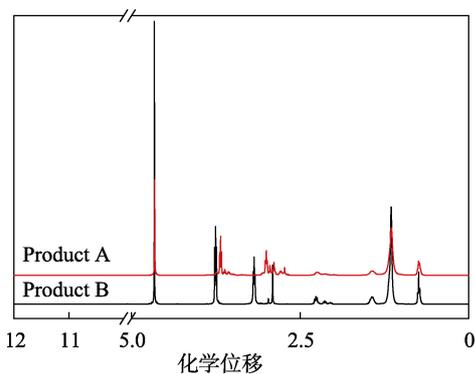


图2 产物 A、B 的 ¹HNMR 核磁氢谱图
Fig. 2 ¹HNMR spectra of products A and B

2.1.3 产物的质谱分析

分别对产物 A 与产物 B 进行了质谱分析, 如图 3 所示。用 ESI 作为离子源, 根据产物结构特征, 产物 A 采用正离子模式, 其主要特征片段的离子峰为 $m/Z=150.11$ [(HOCH₂CH₂)₃NH⁺ 碎片峰]; 产物 A 采用负离子模式, 其主要特征片段的离子峰为 $m/Z=270.21$ [C₁₁H₂₃CON(CH₃)CH₂COO⁻ 碎片峰], 通过特征片段的离子峰, 可以更进一步验证目标产物 A 的分子结构。产物 B 采用正离子模式, 其主要特征片段的离子峰为 $m/Z=403.51(M+H)^+$ 和 $402.25(M^+)$, 进一步确证了目标产物 B 的分子结构。

综上所述, 经过红外光谱、¹HNMR 和质谱分析, 可以确定产物 A 为 *N*-月桂酰肌氨酸三乙醇胺盐, 产物 B 为 *N*-月桂酰肌氨酸三乙醇胺酯。

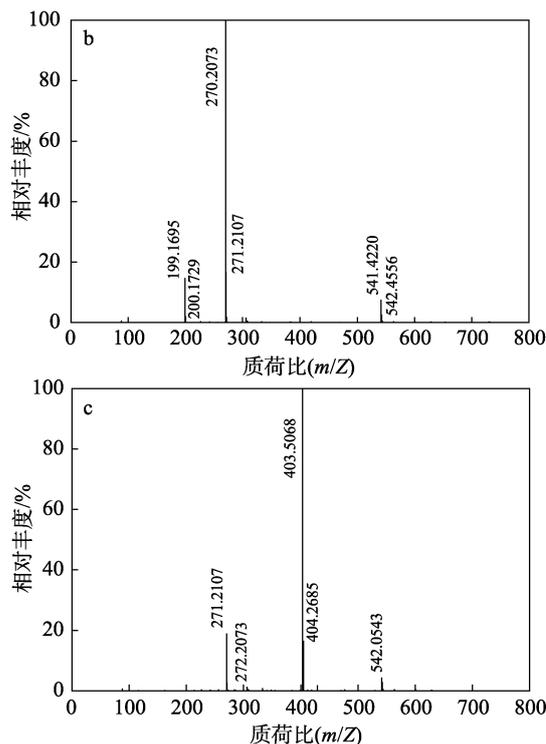
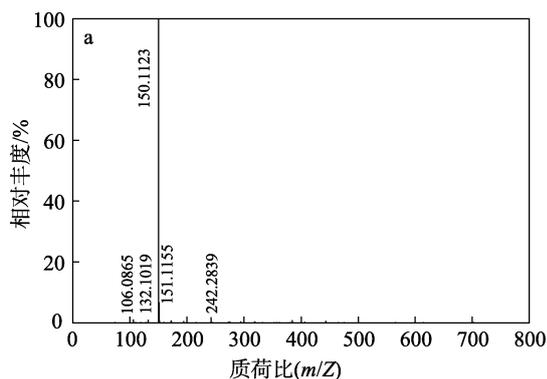


图3 产物 A (a, 正离子模式)、产物 A (b, 负离子模式)、产物 B (c, 正离子模式) 的质谱图

Fig. 3 Mass spectra of product A (a, positive ion mode), product A (b, negative ion mode), product B (c, positive ion mode)

2.2 反应时间对产物结构的影响

为了进一步验证反应温度是影响产物结构的关键因素, 通过延长反应时间来考察产物的结构变化, 延长反应时间所得产物外观一致, 75 °C 所得产物为黄色针状固体, 130 °C 所得产物为棕色油状液体。不同反应温度、不同反应时间条件下产物 A、B 的红外谱图见图 4。从图 4 可以看出, 75 °C 下, 反应 1 与 3 h 的产物, 经红外光谱对比分析, 其谱图一致, 并未由于延长反应时间而使产物 A 转化为产物 B, 形成酯基; 130 °C 下, 反应 1 和 3 h 的产物, 经红外光谱对比分析, 其谱图一致, 说明产物 B 结构稳定。综上可知, 反应时间不是影响产物结构的决定因素, 而反应温度是影响产物结构的关键因素。

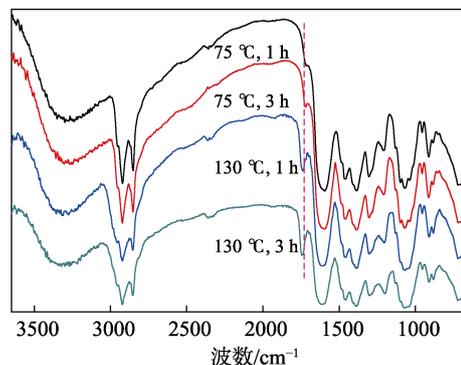


图4 不同反应温度、不同反应时间条件下产物 A、B 的红外谱图

Fig. 4 FTIR spectra of products A and B at different reaction temperatures and reaction times

2.3 产物性能研究

表面活性剂结构不同, 其性能亦不同^[20]。*N*-月桂酰肌氨酸三乙醇铵盐属于阴离子型表面活性剂, 而*N*-月桂酰肌氨酸三乙醇胺酯属于非离子型表面活性剂。因此, 分别对其泡沫性能及抗硬水能力进行了测试。

2.3.1 产物的泡沫性能

泡沫性能是表面活性剂的关键性能之一, 直接影响表面活性剂的应用情况, 根据泡沫产生原理, 表面活性剂的表面张力越高, 泡沫越少且容易破灭^[21-22]。因此, 对产物 A 和产物 B 的表面张力进行了测试, 结果见图 5。从图 5 可以看出, 随着溶液质量分数由 0.025% 逐渐增大到 1.0%, 溶液的表面张力均呈现先降低再略增大的变化趋势, 均在质量分数为 0.15% 处表面张力最小。而在表面张力达到最小后, 随着质量分数的增加, 产物 A 的表面张力基本不变, 趋于稳定, 而产物 B 的表面张力逐渐增加, 当质量分数大于 0.8% 时, 产物 B 的表面张力超过产物 A 的表面张力, 并趋于稳定。

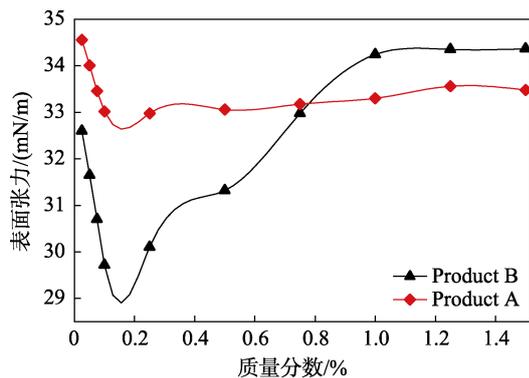


图 5 不同质量分数下产物 A、B 的表面张力变化

Fig. 5 Surface tension of products A and B at different mass fractions

根据表面张力随质量分数的变化, 可以推测两种产物临界胶束浓度均在质量分数为 0.15% 附近, 故选择质量分数为 0.15% 对两种产物泡沫性能进行分析。根据对两种产物泡沫体积变化与时间的不间断观察记录发现, 在泡沫体积最大至泡沫体积衰减一半的区间内, 两种产物泡沫体积与时间的变化规律近似呈线性相关, 故发泡高度曲线可简化为通过起泡最大体积与半衰期两点之间的直线函数, 对直线函数 $f(x)$ 进行积分, 求得泡沫综合指数, 结果如表 1 所示。

表 1 两种产物溶液的泡沫性能

Table 1 Foam properties of two product solutions

	起泡体积/mL	半衰期/min	泡沫综合指数/(mL·min)
产物 A	680	22.56	5970.98
产物 B	720	28.26	8277.89

由表 1 可知, 产物 A 与产物 B 的泡沫半衰期分别为 22.56 和 28.26 min。在泡沫消除的过程中, 产物 A 是泡沫中部气泡快速聚集形成大泡而破灭, 同时, 顶部与空气接触区泡沫同步破灭, 而产物 B 是泡沫顶部与空气接触处泡沫优先破灭, 内部泡沫相对稳定, 产物 B 的泡沫稳定性整体较产物 A 稳定。这可能由溶液中两种产物的结构变化所致, 产物 A 分子在溶液中电离, 导致游离离子相对分子质量变小, 而产物 B 分子结构稳定, 相对分子质量较大, 泡沫寿命长, 稳定性好^[23]。同时, 通过测定两种产物质量分数为 0.15% 的溶液的电导率, 验证了产物 A 较产物 B 更易电离, 其电导率分别为 189.61 和 137.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。根据泡沫强度判定, 40 $^{\circ}\text{C}$ 下, 产物 B 的泡沫综合指数相比产物 A 提升了 38.64%。

2.3.2 抗硬水性能

抗硬水能力是评价表面活性剂析皂强弱的重要指标, 影响乳液的稳定性^[24-25]。用 100 mg/L 的人工硬水分别滴定 25 mL 质量分数为 1.0% 的产物 A、B 的去离子水溶液至溶液刚刚变浑浊为止, 滴定前后产物 A、B 水溶液的外观变化如图 6 所示。A₁、A₂ 分别为经 100 mg/L 人工硬水滴定前后的质量分数为 1.0% 的产物 A 的去离子水溶液, B₁、B₂ 分别为经 100 mg/L 人工硬水滴定前后的质量分数为 1.0% 的产物 B 的去离子水溶液。滴定产物 A 所用人工硬水体积为 22.13 mL, 滴定产物 B 所用人工硬水体积为 28.88 mL, 产物 B 与产物 A 相比, 其抗硬水能力提升了 30.5%。原因可能是产物 A 分子易于电离, 相对于非离子表面活性剂产物 B, *N*-月桂酰肌氨酸离子与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 作用较强^[26]。据文献^[27]报道, 可以推测产物 B 中 $-(\text{CH}_2-\text{CH}_2\text{OH})_2$ 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 具有络合作用, 降低产物 B 分子的聚集能力。因此, 产物 B 具有较强的抗硬水能力。

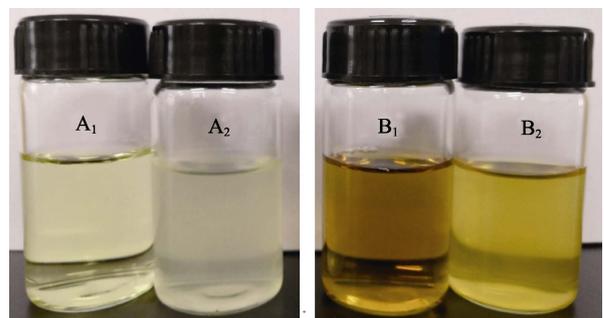


图 6 人工硬水滴定前后产物 A、B 的外观变化

Fig. 6 Appearance changes of products A and B before and after artificial hard water titration

3 结论

(1) 温度是影响 *N*-月桂酰肌氨酸与三乙醇胺反应产物结构的关键因素, 低温下 (75 $^{\circ}\text{C}$) 产物主要

为N-月桂酰肌氨酸三乙醇胺盐,高温下(130℃)产物主要为N-月桂酰肌氨酸三乙醇胺酯,反应时间对N-月桂酰肌氨酸与三乙醇胺反应产物结构的影响甚微。

(2)通过对N-月桂酰肌氨酸与三乙醇胺反应产物的性能研究表明,产物B的表面张力随浓度变化较大,产物A的表面张力随浓度变化较小。当质量分数小于0.8%时,产物B具有较低的表面张力。40℃下,质量分数为0.15%时,产物B比产物A具有更好的泡沫稳定性。经过对两种产物的抗硬水性能对比发现,产物B比产物A具有更优异的抗硬水能力,其抗硬水能力提升了30.5%,更有利于乳液稳定。

(3)N-月桂酰肌氨酸与三乙醇胺反应产物具有优异的乳化及防锈性能,通过研究反应温度对产物结构及其泡沫与抗硬水性能的影响,明确其结构与性能的关系,指导开发性能更加稳定、绿色的浓缩液产品,以期满足不同矿区水质对浓缩液性能的要求。

参考文献:

- [1] LIU R F (刘汝锋), CHEN Y X (陈亿新), SHANG X Q (尚小琴), *et al.* Preparation of microemulsion grinding fluid and its antirust performance[J]. Chemical Industry and Engineering Progress (化工进展), 2012, 31(8): 1857-1860.
- [2] CAI M J, LI Q Q, CHEN X M. Synthesis, surface activity, and antifogging property of triethanolamine monoaurate ester[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2015, 31(2): 223-229.
- [3] CHEN L (陈丽), ZHOU M H (周美华). Research trend of amino acid-based surfactants[J]. Fine and Specialty Chemicals (精细与专用化学品), 2004, 12(19): 7-11.
- [4] GENG E H (耿二欢), HONG Y Q (洪玉倩), WANG W D (王文德). Study on surfactant blending performance of sodium N-lauroylalanine[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics (日用化学工业), 2017, 47(12): 681-684.
- [5] TIAN H J (田会娟), LIU X H (柳鑫华), RUI Y L (芮玉兰). Progress in research on amino acids as corrosion inhibitors in acid solutions[J]. Corrosion & Protection (腐蚀与防护), 2009, 30(3): 186-189.
- [6] GUO X H (郭学辉), WANG K (王康), HU B S (胡百顺), *et al.* Research progress on corrosion inhibition mechanism of amino acid corrosion inhibitors[J]. Corrosion Science and Protection Technology (腐蚀科学与防护技术), 2013, 25(1): 63-66.
- [7] LI S F (黎四芳), LI H (李红). Corrosion inhibition performances of sodium N-lauroyl sarcosinate and its composites[J]. Corrosion Science and Protection Technology (腐蚀科学与防护技术), 2008, 20(4): 289-291.
- [8] HONG Y Q (洪玉倩), SHI L W (史立文), GENG E H (耿二欢), *et al.* Study on the surface performance of sodium N-lauroylamino acid[J]. China Cleaning Industry (中国洗涤用品工业), 2019, (2): 17-21.
- [9] WANG K (王宽), SUN J L (孙吉龙), LI Z Y (李泽勇). Study on the self-thickening system of sodium lauroyl sarcosinate[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics (日用化学工业), 2018, 48(12): 22-25.
- [10] YU F (俞芳). Current situation with respect to synthesis technology of sodium N-acyl sarcosinate[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics (日用化学工业), 2016, 46(1): 53-57.
- [11] ZHANG D R, SUN Y G, DENG Q H, *et al.* Study of the environmental responsiveness of amino acid-based surfactant sodium lauroylglutamate and its foam characteristics[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 504: 384-392.
- [12] People's Republic of China State Administration of Work Safety (中国国家安全监督管理总局). Emulsifying oil, concentrate fluid and high-water content hydraulic fluid used for powered support: MT 76—2011[S]. Beijing: Standards Press of China (中国标准出版社), 2011: 1-10.
- [13] LI Y, HU S L, CHENG J H, *et al.* Acidic ionic liquid-catalyzed esterification of oleic acid for biodiesel synthesis[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2014, 35(3): 396-406.
- [14] WANG Y G, WANG P W, YAO C Z, *et al.* Analysis of triethanolamine esters of stearic acid used to synthesize new softener[J]. Leather and Chemicals (皮革与化工), 2004, 21(6): 29-33.
- [15] WEN P P, SUN Y Q, SHI X Q, *et al.* Synthesis of stearic acid triethanolamine tri-ester[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics (日用化学工业), 2012, 42(6): 424-427.
- [16] SÁNCHEZ C C, PATINO J R. Interfacial, foaming and emulsifying characteristics of sodium caseinate as influenced by protein concentration in solution[J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(3): 407-416.
- [17] LIU H S (刘宏生), WANG J Q (王景芹). Foam properties of sodium α -olefin sulfonate compounded systems[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition) (青岛科技大学学报:自然科学版), 2013, 34(1): 12-16.
- [18] YANG Y (杨奕), TANG S F (唐善法), WU H (吴浩), *et al.* Performance evaluation of low interfacial tension temperature and salt resistant YUDP foaming agent[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2019, 36(8): 1689-1694.
- [19] Standardization Administration of the People's Republic of China (中国国家标准化管理委员会). Surface active agents-Determination of stability in hard water: GB 7381—2010[S]. Beijing: Standards Press of China (中国标准出版社), 2010: 1-4.
- [20] SUN G N (孙冠男), ZHENG L Q (郑利强), SUN J C (孙继超). Self-assembly of surfactants controlled by weak interactions (II) the structure and design of surfactants[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics (日用化学工业), 2019, 49(2): 13-18.
- [21] HANG Z J (杭智军), WANG Y C (王玉超), BAI F F (白飞飞), *et al.* Discussion on performance requirements and application of defoamer for hydraulic support concentrated liquid[J]. Coal and Chemical Industry (煤炭与化工), 2018, 41(12): 87-89.
- [22] ZHU T Y (朱天一), LI M (李茂), CHENG L (程亮), *et al.* Types and characteristics introduction of antifoaming agent[J]. Lubricating Oil (润滑油), 2017, 32(6): 23-25.
- [23] BAEZA R, SANCHEZ C C, PILOSO A R, *et al.* Interfacial and foaming properties of prolylenglycol alginates: Effect of degree of esterification and molecular weight[J]. Colloids & Surfaces B Biointerfaces, 2004, 36(3): 139-145.
- [24] ZHAO X (赵晓), HU X Y (胡学一), FANG Y (方云), *et al.* Unique physicochemical properties of sodium 9, 10, 12, 13-tetrahydroxyl stearate in cold hard water and under neutral pH condition[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2013, 30(9): 1003-1007.
- [25] LIU H Q (刘红芹), SHI G Y (石国英), ZHANG X X (张晓旭), *et al.* Synthesis and properties of lauryl polyoxyethylene(5) amine oxide[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2017, 34(8): 849-853.
- [26] ZHAO T T (赵涛涛), GONG H J (宫厚健), XU G Y (徐桂英), *et al.* Investigation of salts tolerance of anionic surfactants in aqueous solutions[J]. Oilfield Chemistry (油田化学), 2010, 27(1): 112-118.
- [27] CHEN Y J (陈贻建). The Ca²⁺-tolerant mechanism of anionic-nonionic surfactant[D]. Jinan: Shandong University (山东大学), 2014.