

带支链疏水基的阴离子双子表面活性剂的合成及其胶束化热力学研究

李鹏飞, 胡志勇, 曹端林

(中北大学 化工与环境学院, 山西 太原 030051)

摘要: 以三聚氰氨为原料, 利用其 3 个氯原子在不同温度下的不同活性, 分别与氨基乙磺酸和二正辛基胺或氨基乙磺酸和二异辛基胺反应, 两步法合成了 2 种具有不同疏水链结构的 gemini 表面活性剂。用 ^1H NMR, MS 及元素分析对其进行了结构表征, 并对其表面活性与胶束化热力学参数进行了计算和讨论。结果表明, 疏水链为支链的 gemini 表面活性剂能较好的降低水的表面张力, 但其形成胶束的能力较差。在 30 °C 下, 其最低表面张力 (γ_{cmc}) 和 cmc 分别是 $26.8 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $4.89 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$; 且随温度的升高, 2 种表面活性剂的电导率升高, 反离子结合度降低; 其胶束化热力学参数表明其胶束的生成过程为熵驱动过程。

关键词: 双子表面活性剂; 合成; 热力学参数

中图分类号: TQ423.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-1803(2012)01-0010-05

Synthesis of gemini surfactant with branched carbon chain hydrophobic group and study of thermodynamics of their micellization in aqueous solution

LI Peng-fei, HU Zhi-yong, CAO Duan-lin

(School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract: Two kinds of gemini surfactants with different carbon chain hydrophobic group, sodium 4-(2-(N,N-bis-ethylhexylamino)-1,3,5-triazine-4,6-ylamino) ethane sulfonate (IXC₈) and sodium 4-(2-(N,N-bis-octylamino)-1,3,5-triazine-4,6-ylamino) ethane sulfonate (XC₈) were synthesized from sodium amino ethyl sulfonate, cyanuric chloride and bis-ethylhexylamine as well as sodium amino ethyl sulfonate, cyanuric chloride and bis-n-octylamine respectively via a two step reaction process. Chemical structures of the prepared compounds were characterized by ^1H NMR, MS and elementary analysis. Results showed that the surfactant IXC₈ has a higher critical micelle concentration (cmc) and better capability for lowering the surface tension. The surface tension (γ_{cmc}) and cmc achieves $26.8 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ and $4.89 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively at 30 °C. Moreover, with the increase of temperature, the electrical conductivity of IXC₈ and XC₈ increases, while the binding force with the counter ion decreases. The thermodynamic parameters of micellization of IXC₈ and XC₈ showed that the process of micellization is driven by the entropy.

Key words: gemini surfactant; synthesis; thermodynamic parameters

双子 (gemini) 表面活性剂是一类性能优异的表面活性剂^[1-3], 其分子结构中含有 2 个疏水基、2 个亲水基和一个联接基团。与普通表面活性剂相比, 双子表面活性剂具有更高降低水的表面张力的能力、更低的临界胶束浓度、特殊的流变学性质等。其中联接基对 gemini 表面活性剂性能的影响已成为国内外十分活跃

的研究领域, 疏水基团对 gemini 表面活性剂性能的影响研究主要集中在其碳链的长度上^[4], 针对疏水基团结构的研究目前还很少^[5-12]。

作者所在课题组^[13-16]近些年来以三聚氰氨为原料合成了多种性能优良的 gemini 表面活性剂。作者以三聚氰氨、脂肪胺、氨基乙磺酸为原料合成了疏水链

收稿日期: 2011-10-07; 修回日期: 2011-11-29

作者简介: 李鹏飞 (1986-) 男, 山西人, 硕士研究生, 电话: 15135169040。

通讯联系人: 胡志勇, 博士, 副教授, E-mail: huzhiyong@nuc.edu.cn。

分别为直链和支链的 gemini 表面活性剂,并对其进行了表面活性测定和胶束化热力学方面的研究。由于这种表面活性剂外形像英文字母“X”,所以称这种表面活性剂为 X 型 gemini 表面活性剂。

1 实验部分

1.1 主要原料及仪器

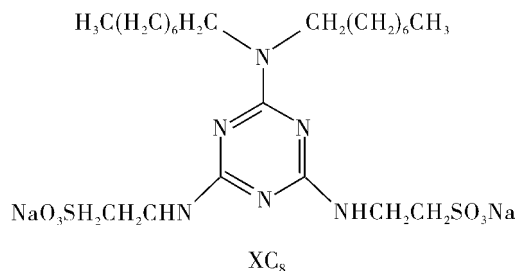
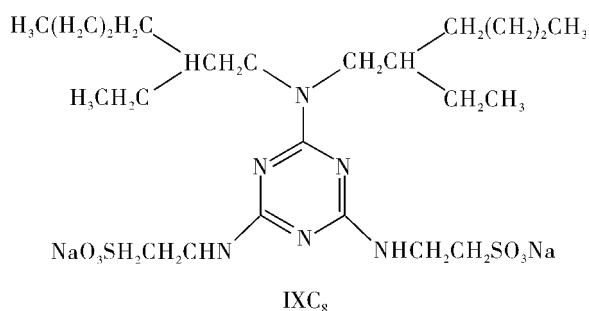
三聚氯氰,工业纯,河北诚信有限责任公司;二正辛基胺、二异辛基胺和氨基乙磺酸,分析纯,北京百灵威化学技术有限公司;二氧六环、甲苯和丙酮,分析纯,天津市化学试剂三厂。DRX-400 型超导核磁共振谱仪和 APEXIV 型电喷雾质谱分析仪,瑞士 Bruker 公司;VARIO EL III 型元素分析仪,德国 Elementer 公司;JK99 型全自动张力仪,上海中晨科技有限公司;EC71 台式电导率测量仪,美国哈希公司;SX-CH1015 型超级恒温水槽(温度波动为 ± 0.05 °C),北京恒奥德仪器仪表有限公司;超纯水机(25 °C 电阻率为 $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$) 美国 ASINO 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 X 型 gemini 表面活性剂的合成

将 0.055 mol 脂肪胺溶解在 100 mL 甲苯中,在 $0 \sim 5$ °C 下,将其滴入溶有 0.05 mol 三聚氯氰的 50 mL 甲苯中,加入质量分数为 10% 的 Na_2CO_3 水溶液,维持 $\text{pH} = 9 \sim 10$ 反应 10 h。反应结束后静置分层,将有机层分别用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐酸、 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaHCO_3 水溶液和超纯水各洗涤 3 次。浓缩有机层,得粗产物,用正庚烷重结晶 3 次,得疏水中间体。

将氨基乙磺酸用 NaOH 中和制得氨基乙磺酸钠。在 $45 \sim 50$ °C 下,将溶有 0.22 mol 氨基乙磺酸钠的水溶液滴入溶有 0.1 mol 疏水中间体的 100 mL 二氧六环中,用质量分数为 10% 的 Na_2CO_3 水溶液维持 $\text{pH} = 9 \sim 10$ 反应 6 h,然后升温至 90 °C,回流 7 h。反应结束后,冷析,过滤,用冷超纯水将滤饼洗涤 3~4 次后得粗产物。将粗产物在超纯水中重结晶 3 次得产物。产物结构式如下:



1.2.2 表面活性的测定及胶束生成热力学参数计算

表面张力测定:取 1.2.1 制备产物分别加超纯水配成不同浓度的溶液,采用吊片法测定 30 °C 时溶液的表面张力。以不同浓度下的表面张力(γ)对浓度的对数($\lg c$)作图可得临界胶束浓度(cmc)和与其对应的最低表面张力(γ_{cmc})。表面活性剂在溶液表面上的最大吸附量(Γ_{max})及平均每个分子占有的最小面积(A_{min})用下式^[17]进行计算:

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

$$A_{\text{min}} = 10^{14} / (N_A \Gamma_{\text{max}}) \quad (2)$$

式中 R 为气体常数 $8.315 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为热力学温度 K ; $\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \lg c} \right)_T$ 为 $\gamma - \lg c$ 曲线的斜率; N_A 为阿伏加德罗常数; n 为 Gibbs 指前因子,在没有其他电解质干扰的情况下, gemini 表面活性剂的 n 值为 3^[18]。

电导率的测定:用超纯水配制一系列不同浓度的 1.2.1 制备产物的水溶液,将其置于超级恒温槽中,用电导率仪分别测定其在 25, 30, 35 和 40 °C 下的电导率,仪器误差值为 $\pm 0.2 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。以电导率对浓度作图,曲线转折点所对应的浓度即为 cmc ,计算其相关的胶束化热力学参数。

2 结果与讨论

2.1 X 型 gemini 表面活性剂的表征及产率

合成的目标化合物用 $^1\text{H NMR}$ (600 MHz, $\text{DMSO}-d_6$)、 $\text{MS}(m/z)$ 以及元素分析 ($w/\%$, 实验值/理论值)进行表征。 XC_8 和 IXC_8 的 MS 数据均为 $587.3 [M - \text{Na}]^-$ 。 XC_8 和 IXC_8 的元素分析数据分别为: C 45.14/45.23, H 7.25/7.26, N 13.56/13.76; C 45.05/45.23, H 7.25/7.26, N 13.74/13.76。 XC_8 的 $^1\text{H NMR}$ 数据分别为: 0.85 [t, 6H, $\text{CH}_2\text{CH}_2(\text{CH}_2)_5\text{CH}_3$], 1.24 [m, 20H, $\text{CH}_2\text{CH}_2(\text{CH}_2)_5\text{CH}_3$], 1.49 [m, 4H, $\text{CH}_2\text{CH}_2(\text{CH}_2)_5\text{CH}_3$], 2.60 [t, 4H, $\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{SO}_3\text{Na}$], 3.50 [t, 8H, $\text{CH}_2\text{CH}_2(\text{CH}_2)_5\text{CH}_3$, $\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{SO}_3\text{Na}$], 6.25 [t, 2H, $\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{SO}_3\text{Na}$]; IXC_8 的 $^1\text{H NMR}$ 数据分别为: 0.81 [t, 12H, $\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_2\text{CH}_3)(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$],

1. 18 ~ 1. 22 [m ,16H ,CH₂CH(CH₂CH₃) (CH₂)₃CH₃] ,
1. 73 ~ 1. 77 [m ,2H ,CH₂CH(CH₂CH₃) (CH₂)₃CH₃] ,
2. 65 [t ,4H ,NHCH₂CH₂SO₃Na] ,3. 48 [d ,8H ,CH₂CH
(CH₂CH₃) (CH₂)₃CH₃ ,NHCH₂CH₂SO₃Na] ,6. 27 [t ,
2H ,NHCH₂CH₂SO₃Na]。XC₈ 和 IXC₈ 的产率分别为
74. 7% 和 71. 8% 。

2.2 X 型 gemini 表面活性剂的表面活性

cmc 和 γ_{cmc} 是衡量表面活性剂表面活性的主要参数。在 30 °C 下测定了 XC₈ 和 IXC₈ 水溶液的表面张力 绘制了其 $\gamma - \lg c$ 曲线 结果如 1 所示。由图 1 可以看出 ,XC₈ 的 cmc 为 $7.59 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, γ_{cmc} 为 27.9 mN · m⁻¹; IXC₈ 的 cmc 为 $4.89 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, γ_{cmc} 为 26.8 mN · m⁻¹。计算得 XC₈ 的 $\Gamma_{max} = 1.30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$, $A_{min} = 1.28 \text{ nm}^2$; IXC₈ 的 $\Gamma_{max} = 1.16 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$, $A_{min} = 1.45 \text{ nm}^2$ 。IXC₈ 的 cmc 高于 XC₈ 的 cmc ,这可能是由于支链疏水链之间的范德华力低于直链疏水链之间的范德华力 ,导致了 IXC₈ 不易在本体溶液中形成聚集体^[19]。虽然 IXC₈ 的 cmc 比 XC₈ 的高 ,但其在降低水的表面张力方面的能力更强。同时 IXC₈ 的 Γ_{max} 低于 XC₈ ,说明 IXC₈ 比 XC₈ 在界面上排布得疏松。这个结果似乎应该导致 XC₈ 的 γ_{cmc} 低于 IXC₈ ,但实际测量值却与之恰恰相反。这可能是由于 IXC₈ 上有 4 个甲基使溶液表面更加接近液烃表面^[20] ,从而在一定程度上弥补了 IXC₈ 在最大吸附量方面的劣势。

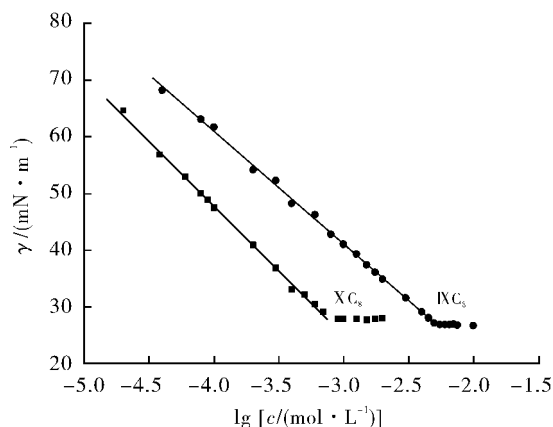


图 1 XC₈ 和 IXC₈ 的 $\gamma - \lg c$ 曲线

Fig. 1 Surface tension vs. concentration of XC₈ and IXC₈

2.3 X 型 gemini 表面活性剂的胶束化热力学参数

胶束溶液是一个热力学平衡体系 ,因此可以利用热力学方法加以研究。热力学研究首先要确定体系的起止状态 ,建立所研究过程的热力学函数。从热力学

函数与体系的各种物理化学性质的关系对后者作出解释或者预测。胶束的形成是若干个表面活性剂分子或离子结合成一个整体的过程。因此 ,可以采用 2 种热力学模型: 相分离模型和质量作用模型^[21]。

作者使用的是相分离模型 ,gemini 表面活性剂的胶束生成吉布斯自由能和临界胶束浓度之间符合式 (3) 的关系^[22]:

$$\Delta G_m^0 = RT(0.5 + \beta) \ln X_{cmc} \quad (3)$$

式中 R 为气体常数 $8.315 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T 为热力学温度 ,K; $X_{cmc} = c_{cmc} / 55.4$,55.4 是 25 °C 下 1 L 水的物质的量 μmol ; β 为胶束/溶液界面的反离子结合度 $\beta = 1 - \alpha$,其中 α 为胶束的离子化程度 ,其值为电导率 - 浓度曲线在 cmc 之下和之上的 2 条直线斜率的比值。通过电导率 - 浓度曲线可以得到 α 的值^[23]。作者给出了 IXC₈ 在不同温度下所测得电导率对浓度变化的曲线 ,实验结果见图 2。由图 2 可以看出 ,IXC₈ 的 cmc 是随着温度的上升而增大的。同时经计算可得 2 种表面活性剂的反离子结合度随着温度的升高而降低。

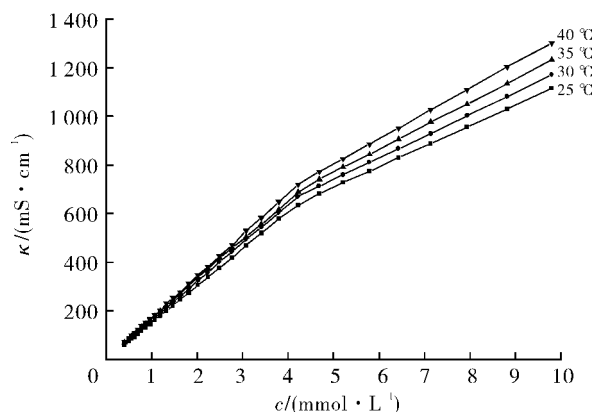


图 2 在不同温度下 IXC₈ 的电导率随浓度变化曲线
Fig. 2 Plots of electrical conductivity against concentration of IXC₈ at different temperature

胶束生成标准焓 ΔH_m^0 可以通过 Gibbs - Helmholtz 公式^[12] 推导而得 ,见式(4) :

$$\Delta H_m^0 = -RT^2 (0.5 + \beta) \frac{d \ln X_{cmc}}{dT} \quad (4)$$

胶束生成标准熵 ΔS_m^0 可以通过式(5) 求得^[12]:

$$\Delta S_m^0 = (\Delta H_m^0 - \Delta G_m^0) / T \quad (5)$$

表 1 给出了 XC₈ 和 IXC₈ 在不同温度下的胶束化热力学参数。由表 1 可知 ,XC₈ 和 IXC₈ 的吉布斯标准自由能 ΔG_m^0 都为负值 ,这说明胶束的形成是自发的。在 30 °C 下 ,XC₈ 的 $\Delta G_m^0 = -31.55 \text{ kJ/mol}$,比 IXC₈ 的 $\Delta G_m^0 = -22.17 \text{ kJ/mol}$ 小 ,说明带有直链的 gemini 表面活性剂比带有支链的 gemini 表面活性剂更容易形

成胶束。另外随着温度的升高, XC_8 和 IXC_8 的 ΔG_m^0 是在增大的, 说明温度的升高不利于胶束的形成。这

可能是由于温度升高, 表面活性剂分子运动加剧使分子之间不易缔合在一起^[24]。

表 1 X 型 gemini 表面活性剂在不同温度下的热力学参数
Tab. 1 Influence of temperature on the parameters of micellization for XC_8 and IXC_8

表面活性剂	$t/^\circ\text{C}$	$c_{\text{cmc}}/(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	α	$\Delta G_m^0/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta H_m^0/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$-T\Delta S_m^0/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
XC_8	25	0.74	0.35	-31.98	-6.71	-25.27
	30	0.77	0.38	-31.55	-6.75	-24.80
	35	0.81	0.40	-31.38	-6.85	-24.53
	40	0.83	0.42	-31.21	-6.95	-24.26
IXC_8	25	4.20	0.55	-22.29	-1.23	-21.06
	30	4.22	0.57	-22.17	-1.24	-20.92
	35	4.26	0.59	-22.02	-1.26	-20.77
	40	4.29	0.61	-21.87	-1.27	-20.60

由表 1 可知, XC_8 和 IXC_8 的 ΔH_m^0 都为负值, 说明胶束化过程是一个放热的过程。这可能和表面活性剂与溶剂的相互作用有关^[25]。同时 Nusselder 和 Engberts^[25] 认为, 当 ΔH_m^0 为负值时说明色散力在胶束的形成过程中起了主要作用。

由表 1 可知, XC_8 和 IXC_8 的 ΔS_m^0 都为正值并且随着温度的上升而下降。这个结果说明了两方面的内容: 一是 ΔS_m^0 随着温度的上升而下降说明胶束的形成能力随着温度的上升而下降; 二是 ΔS_m^0 为正值说明胶束化过程是自发进行的。 ΔS_m^0 为正值可能与表面活性剂形成胶束后溶剂分子的活动能力加强有关^[26]。但是从胶束是由多个表面活性剂分子自组装而成的角度来看, ΔS_m^0 主要与分子构象的变化有关, ΔS_m^0 应为负值。目前主要是通过 Tanford^[27] 和 Lee^[28] 所提出的“冰山结构”来解释这个矛盾。他们认为 ΔS_m^0 主要受两方面原因的影响, 一方面是烃链周围的水分子的正常的氢键结构被破坏, 同时其周围又形成了一些新的结构的水分子(冰山结构)。也就是说疏水碳链的存在使其周围的水分子排列得更加有序, 从而使 ΔS_m^0 下降。另一方面, 为了减轻上述影响, 使水分子之间恢复到原来的正四面体结构, 分子的运动加剧。同时为了使表面活性剂分子形成胶束, 疏水链之间的色散力也在破坏烃链周围的“冰山结构”, 因而也使水分子的无序度增加。由于上述原因的共同影响最终使 ΔS_m^0 上升。但是 Graziano^[29] 认为不存在所谓的“冰山结构”。因为在实验中还没有找到“冰山结构”存在的证据。例如, Buchanan 等^[30] 通过中子散射实验发现水溶剂层

结构和水本体结构之间并没有什么不同。由此看来, 有关胶束生成标准熵的正负值问题还需要进一步的研究。

由表 1 数据还可知 ΔG_m^0 为负值主要是由 ΔS_m^0 决定的, 因为 ΔH_m^0 比 $-T\Delta S_m^0$ 大得多。由此可知胶束化是一个熵驱动的过程。过程中的驱动力来自于表面活性剂的疏水链从溶剂中转移到胶束内部的趋势。但是 $-T\Delta S_m^0$ 的值随着温度的升高而上升, 与此相反的是 ΔH_m^0 和 ΔS_m^0 却在降低。这个结果说明, 尽管胶束化是一个熵驱动的过程, 但随着温度的升高, ΔS_m^0 对 ΔG_m^0 的贡献逐渐变小, 而焓驱动的作用在增加, 并且可能在某一温度下胶束化过程变为一个焓驱动的过程。由此可知 IXC_8 和 XC_8 的胶束化过程是一个熵-焓补偿的过程。

3 结论

1) 采用 2 步反应合成了疏水链结构分别为支链和直链的 gemini 表面活性剂。用 ¹H NMR, MS 和元素分析对其进行了结构表征。

2) 在 30 $^\circ\text{C}$ 下, IXC_8 和 XC_8 的 cmc 和 γ_{cmc} 分别为 $4.89 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $26.8 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $7.59 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $27.9 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

3) 随温度的升高, IXC_8 和 XC_8 溶液的电导率升高, 反离子结合度减小。

4) 在 25 ~ 40 $^\circ\text{C}$ 下 ΔG_m^0 均为负值, ΔS_m^0 对 ΔG_m^0 的贡献大于 ΔH_m^0 的贡献, 表明 IXC_8 和 XC_8 溶液的胶束形成可自发进行, 且主要是熵驱动过程。

参考文献:

- [1] 曹云丽,徐伏,王莉,等. 双子表面活性剂的应用研究进展[J]. 日用化学工业 2011, 41(2): 46-49.
- [2] 聂红艳,徐宝财,周雅文. 特种表面活性剂和功能性表面活性剂(V): 双子表面活性剂的合成研究进展[J]. 日用化学工业 2009, 39(4): 287-293.
- [3] 聂红艳,徐宝财,周雅文. 特种表面活性剂和功能性表面活性剂(VI): 双子表面活性剂的性质和应用[J]. 日用化学工业 2009, 39(5): 348-353.
- [4] ZANA R. Dimeric (gemini) surfactants: Effect of the spacer group on the association behavior in aqueous solution[J]. Journal of Colloid and Interface Science 2002, 248(2): 203-220.
- [5] 卢庆祥,傅式洲,尹宝霖,等. 季铵盐型双子表面活性剂的合成和性能[J]. 日用化学工业 2009, 39(2): 81-96.
- [6] ZHU YUNPENG, MASUYAMA A, OKAHARA M. Preparation and properties of double or triple chain surfactants with two sulfonate groups derived from N-acyldiethanolamines [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1990, 67(7): 459-463.
- [7] MAGDASSI S, BEN MOSHE M, TALMON Y, et al. Microemulsions based on anionic gemini surfactant [J]. Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects 2003, 212(1): 1-7.
- [8] DU XINGGANG, LU YAO, LI LING, et al. Synthesis and unusual properties of novel alkylbenzene sulfonate gemini surfactants [J]. Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007, 290(3): 132-137.
- [9] YOSHIMURA T, ESUMI K. Synthesis and surface properties of anionic gemini surfactants with amide groups [J]. Journal of Colloid and Interface Science 2004, 276(1): 231-238.
- [10] LASCHEWSKY A, WATTEBLE L, AROT CARENA M, et al. Synthesis and properties of cationic oligomeric surfactants [J]. Langmuir, 2005, 21(16): 7170-7179.
- [11] OHNO A, KUSHIYAMA A, KONDO Y, et al. Synthesis and properties of gemini-type hydrocarbon-fluorocarbon hybrid surfactants [J]. Journal of Fluorine Chemistry 2008, 129(7): 577-582.
- [12] AO MINGQI, XU GUIYING, ZHU YANYAN, et al. Synthesis and properties of ionic liquid-type gemini imidazolium surfactants [J]. Journal of Colloid and Interface Science 2008, 326(2): 490-495.
- [13] LI XIN, HU ZHIYONG, CAO DUANLIN, et al. Synthesis and properties of novel alkyl sulfonate gemini surfactants [J]. Journal of Surfactants and Detergents 2010, 13(3): 353-359.
- [14] XUE CHUNLI, HU ZHIYONG, CAO DUANLIN, et al. Synthesis and properties of novel alkylbetaine zwitterionic gemini surfactants derived from cyanuric chloride [J]. Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects 2011, 375(3): 141-146.
- [15] ZHAO SUFEN, HU ZHIYONG, CAO DUANLIN, et al. Interaction of novel anionic gemini surfactants with cetyltrimethylammonium bromide [J]. Journal of Colloid and Interface Science 2010, 350(2): 480-485.
- [16] LI XIN, HU ZHIYONG, CAO DUANLIN, et al. Study on the synthesis and surface activities of novel alkyl sulfonate gemini surfactants [J]. Tenside Surfactants and Detergents 2010, 47(4): 243-247.
- [17] 赵国玺,朱玲瑶. 表面活性剂作用原理[M]. 北京: 中国轻工业出版社 2003: 69-82.
- [18] ZANA R, XIA JIDING. Gemini surfactants: synthesis, interfacial and solution-phase behavior, and applications [M]. New York: Marcel Dekker 2004: 33-35.
- [19] 陈荣圻. 表面活性剂化学及应用[M]. 北京: 中国纺织出版社, 1996: 88-90.
- [20] 赵维蓉,张胜义. 表面活性剂化学[M]. 合肥: 安徽大学出版社, 1997: 207-212.
- [21] 陆大年. 表面活性剂化学及纺织助剂[M]. 北京: 中国纺织工业出版社 2009: 37-42.
- [22] ZANA R. Critical micellization concentration of surfactants in aqueous solution and free energy of micellization [J]. Langmuir, 1996, 12(5): 1208-1211.
- [23] INOUE T, EBINA H, DONG B, et al. Electrical conductivity study on micelle formation of long-chain imidazolium ionic liquids in aqueous solution [J]. Journal of Colloid and Interface Science 2007, 314(1): 236-241.
- [24] 朱有益,韩冬,沈平平. 表面活性剂结构与性能的关系[M]. 北京: 石油工业出版社 2003: 24-27.
- [25] NUSSELDER J J H, ENGBERTS J B F N. Toward a better understanding of the driving force for micelle formation and micellar growth [J]. Journal of Colloid and Interface Science 1992, 148(2): 353-361.
- [26] ATKINS P W. Physical chemistry [M]. 6th ed. UK: Oxford University Press, 1998: 33-34.
- [27] TANFORD C. The hydrophobic effect: formation of micelles and biological membranes [M]. 2nd ed. Malabar: Krieger Publishing Company, 1991: 55-60.
- [28] LEE D. Enthalpy-entropy compensation in ionic micelle formation [J]. Journal of Colloid and Polymer Science, 1995, 273(6): 539-543.
- [29] GRAZIANO G. Comment on "The hydrophobic effect and its role in cold denaturation", Cryobiology 60(2010) 91-99 [J]. Cryobiology, 2010, 60(3): 354-355.
- [30] BUCHANAN P, ALDIWAN N, SOPER A J, et al. Decreased structure on dissolving methane in water [J]. Chemical Physics Letters, 2005, 415(2): 89-93.

欢迎投稿

欢迎订阅

欢迎惠登广告