

# 1 - (2 - 羟丙基磺基) - 3 - 十二烷基咪唑 内盐的合成与性能

胡 洁 林泽云 黄以军 董莉莉 刘雪锋  
(江南大学 化学与材料工程学院 江苏 无锡 214122)

摘要:以 3 - 氯 - 2 - 羟丙基磺酸钠与  $n$  - 十二烷基咪唑为原料,合成了两性型离子液体(IL)表面活性剂 1 - (2 - 羟丙基磺基) - 3 - 十二烷基咪唑内盐(HPSDim),通过 ESI - MS, FTIR 及  $^1\text{H}$ NMR 表征其分子结构;分别用表面张力和稳态荧光法测定了 35 °C 时 HPSDim 在 0.5 mol · L<sup>-1</sup> 的 NaCl 水溶液中的临界胶束浓度(cmc)和平均胶束聚集数( $N_m$ )等表面活性参数。结果表明,HPSDim 的 Krafft 点高达(65.8 ± 0.5) °C,但在室温下易溶于 0.5 mol · L<sup>-1</sup> 的 NaCl 水溶液中;表面张力法测得其 cmc 为 0.98 mmol · L<sup>-1</sup> (荧光探针法为 1.0 mmol · L<sup>-1</sup>);在 6.0 ~ 8.0 mmol · L<sup>-1</sup> 范围内, $N_m$  随 HPSDim 浓度增加而线性增大,推算其临界胶束聚集数( $N_{m,c}$ )为 30.9;其堆积参数( $P_c$ )为 0.40,推测 HPSDim 胶束形状可能为柱状。

关键词:离子液体型两性表面活性剂;1 - (2 - 羟丙基磺基) - 3 - 十二烷基咪唑内盐;Krafft 点;临界胶束浓度;临界胶束聚集数

中图分类号:TQ423.3<sup>+</sup>4 文献标识码:A 文章编号:1001 - 1803(2012)01 - 0019 - 05

## Synthesis and properties of 1 - (2 - hydroxy propanesulfo) - 3 - dodecylimidazol inner salt

HU Jie, LIN Ze - yun, HUANG Yi - jun, DONG Li - li, LIU Xue - feng  
(School of Chemical and Material Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** A zwitterionic liquid surfactant, 1 - (2 - hydroxy propanesulfo) - 3 - dodecylimidazol inner salt (HPSDim), was synthesized with sodium 3 - chloro - 2 - hydroxy - propane sulfonate and  $n$  - dodecyl imidazole as starting materials. Molecule structure of HPSDim was characterized by ESI - MS, FTIR and  $^1\text{H}$ NMR. Surface active parameters of HPSDim in 0.5 mol · L<sup>-1</sup> NaCl aqueous solution at 35 °C, such as the critical micelle concentration (cmc) and the mean aggregation number ( $N_m$ ), were determined by fluorescence probe and surface tension method separately. Results showed that Krafft point of HPSDim is high as (65.8 ± 0.5) °C. However, HPSDim is readily dissolved in 0.5 mol · L<sup>-1</sup> NaCl aqueous solution at room temperature. Value of cmc achieves 0.98 mmol · L<sup>-1</sup> and 1.0 mmol · L<sup>-1</sup> determined by surface tension method and fluorescence probe method respectively.  $N_m$  increases linearly with increasing of HPSDim concentration within range of 6.0 to 8.0 mmol · L<sup>-1</sup>, and the critical micelle aggregation number ( $N_{m,c}$ ) can be calculated as 30.9. Its packing parameter ( $P_c$ ) is 0.40. Shape of micelle of HPSDim might be inferred as cylindrical.

**Key words:** ionic liquid - like zwitterionic surfactant; 1 - (2 - hydroxy propanesulfo) - 3 - dodecylimidazol inner salt; Krafft point; critical micelle concentration; critical aggregation number

离子液体(IL)是指在室温或接近室温条件下呈现液态的有机熔融盐,一般由体积相对较大的有机阳离子(如季铵盐离子、季磷盐离子、咪唑盐离子、吡咯盐离子等)和体积相对较小的无机(或有机)阴离子构

成,具有蒸气压低、几乎不可燃、导电性高、热稳定性好、电化学窗口宽等优点<sup>[1-4]</sup>。

IL 表面活性剂作为一种功能性离子液体,同时兼具离子液体和表面活性剂双重性质,已经成为离子液

收稿日期:2011 - 10 - 19; 修回日期:2011 - 12 - 26

基金项目:江苏省高校“青蓝工程”青年骨干教师资助项目(苏教师[2010]27号);浙江赞宇科研基金资助项目;江苏省精细石油化工重点实验室开放基金资助项目(KF0903)

作者简介:胡洁(1987 - )男,浙江人,硕士研究生,电话:13665134051。

通讯联系人:刘雪锋,副教授,博士,电话:13382889669。

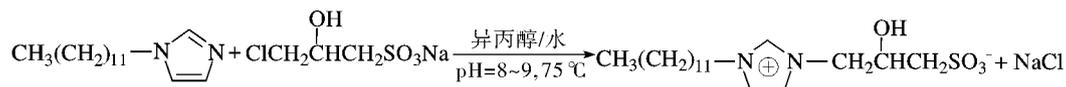
体和表面活性剂科学交叉领域研究的前沿热点之一<sup>[5-18]</sup>。当前,文献报道的 IL 表面活性剂大多为阳离子型表面活性剂,而两性型 IL 表面活性剂则鲜有报道。2002 年,Cole 等<sup>[19]</sup>报导了两性型离子液体的合成路线;2010 年,Tondo 等<sup>[20]</sup>合成了两性型 IL 表面活性剂 1-十四烷基-3-磺丙基咪唑内盐;最近,Liu 等<sup>[21]</sup>报导了两性型 IL 表面活性剂 1-羧甲基-3-十二烷基咪唑内盐的合成与性能。

鉴于传统两性表面活性剂的优良特性,为进一步探索和积累两性型 IL 表面活性剂的性质,作者设计合成了一种带羟基的咪唑基两性型 IL 表面活性剂 1-(2-羟丙基磺基)-3-十二烷基咪唑内盐(HPSDim),通过 ESI-MS,FTIR 及<sup>1</sup>HNMR 对其结构进行表征;并分别采用表面张力法和稳态荧光法测定 HPSDim 水溶液的表面张力-浓度曲线和平均胶束聚集数,以期两性型 IL 表面活性剂的实际应用提供有用信息。鉴于其分子结构中具有两性型离子基和羟基,预计该两性型 IL 表面活性剂作为稳定剂和还原剂在纳米金属催化剂液相法合成、分离等领域具有潜在的用途。

## 1 实验部分

### 1.1 主要试剂与仪器

环氧氯丙烷、亚硫酸氢钠、四甲基溴化铵(TMAB)、



### 1.3 分析表征

ESI-MS: 负离子模式下,在 Maldi Synapt Q-TOF 电喷雾质谱仪上检测 HPSDim 的电喷雾质谱图。

FTIR: 采用涂膜法,在 FTLA200-104 红外光谱仪上检测 HPSDim 的红外光谱图。

<sup>1</sup>HNMR: 以 DMSO-d<sub>6</sub> 为溶剂、四甲基硅烷(TMS)为内标,在 Avance III 400 核磁共振仪上检测 HPSDim 的<sup>1</sup>HNMR 谱图。

### 1.4 Krafft 点的测定

Krafft 点的测定按照文献[23-24]方法进行:取质量分数为 1% 的 HPSDim 水溶液 100 mL,在水浴中逐步加热或冷却(温度改变速率不大于 0.5 °C·min<sup>-1</sup>),并充分搅拌,测得溶液由澄清至浑浊(或由浑浊至澄清)突变所对应的温度即为 HPSDim 的 Krafft 点。

异丙醇,均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;二苯甲酮,化学纯,国药集团化学试剂有限公司;n-十二烷基咪唑(C<sub>12</sub>im)与超纯水均为实验室自制。FTLA200-104 红外光谱仪,加拿大 Bomen 公司;Maldi Synapt Q-TOF 质谱分析仪,美国 Waters 公司;Avance III 400 核磁共振仪,德国 Bruker 公司;RF-5301PC 荧光分光光度计,岛津(香港)有限公司。

### 1.2 1-(2-羟丙基磺基)-3-十二烷基咪唑内盐的合成

准确称取 0.17 mol NaHSO<sub>3</sub> 和 0.01 mol TMAB 溶于 50 mL 水中,在 85 °C 下缓慢滴加 0.20 mol 环氧氯丙烷,回流搅拌 2 h。抽滤,所得滤饼用甲醇洗涤,干燥后得到白色 3-氯-2-羟基丙磺酸钠固体,测其熔点为(252.5 ± 0.2) °C,与文献[22]相符。

取 0.06 mol C<sub>12</sub>im 与 0.08 mol 3-氯-2-羟基丙磺酸钠溶于异丙醇-水(体积比为 1:1)体系,N<sub>2</sub> 保护下 75 °C 搅拌反应 5 h,以稀 NaOH 水溶液调节 pH = 8~9;反应结束后,蒸去溶剂,再用无水乙醇溶解,热滤脱除无机盐,除去乙醇后再用丙酮洗涤除去可能未反应的 C<sub>12</sub>im;产物干燥后用无水乙醇在 -15 °C 下重结晶,得到淡黄色结晶。真空干燥 4 d 后,得到浅黄色的 1-(2-羟丙基磺基)-3-十二烷基咪唑内盐(HPSDim),熔点为 83~84 °C,收率为 65.7%。反应方程式如下:

### 1.5 表面活性参数测定

以 0.5 mol·L<sup>-1</sup> 的 NaCl 水溶液为溶剂,配制浓度在 10<sup>-5</sup>~10<sup>-3</sup> mol·L<sup>-1</sup> 内的 HPSDim 系列溶液;用滴体积法测定 35 °C 时 HPSDim 溶液的表面张力 γ,得到 γ-lg c 曲线,进而求得 HPSDim 的 cmc 及其他各表面活性参数。同时,以芘为探针,通过稳态荧光探针法<sup>[25]</sup>测定 HPSDim 的 cmc。

### 1.6 HPSDim 的平均胶束聚集数(N<sub>m</sub>)

以芘为探针、二苯甲酮为猝灭剂,通过稳态荧光猝灭法测 HPSDim 的平均胶束聚集数<sup>[15,26]</sup>:在洁净干燥的锥形瓶中,精确移入一定量的二苯甲酮-甲醇溶液,吹干甲醇,再移入配制好的待测溶液,在超声波浴槽中分散 5 min,35 °C 水浴中恒温至少 12 h,然后在狭缝宽度 3 nm,激发光波长 335 nm 下测定溶液的荧光发射光谱。

## 2 结果与讨论

### 2.1 HPSDim 的分析表征

图1为负离子模式下 HPSDim 的 ESI-MS 图。HPSDim 在电子流轰击下失去一个  $H^+$  形成  $[HPSDim - H]^-$ ; 由图1可知,  $[HPSDim - H]^-$  质荷比 ( $m/z$ ) 的实验值与其理论值 (373.5) 非常吻合。

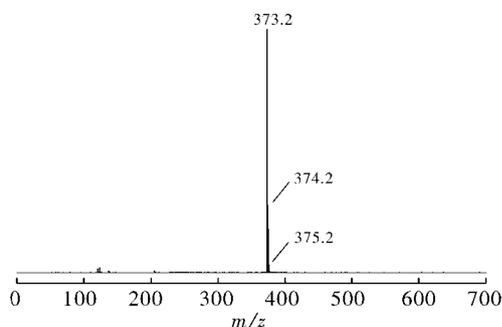


图1 负离子模式下 HPSDim 的 ESI-MS 图

Fig. 1 ESI-MS spectrum of HPSDim at negative ion mode

图2为 HPSDim 的 FTIR 谱图。由图2可知,  $3324.1\text{ cm}^{-1}$  处为  $-OH$  的伸缩振动吸收峰;  $3148.4\text{ cm}^{-1}$  处为  $=C-H$  的伸缩振动吸收峰;  $2923.1$  和  $2853.4\text{ cm}^{-1}$  处为  $-CH_3$  和  $-CH_2-$  上  $C-H$  的伸缩振动吸收峰;  $1637.8\text{ cm}^{-1}$  处为  $-C=N-$  伸缩振动吸收峰;  $1563.4\text{ cm}^{-1}$  处为咪唑环骨架振动吸收峰;  $1465.9\text{ cm}^{-1}$  处为饱和  $-C-H$  的弯曲振动吸收峰;  $1193.6\text{ cm}^{-1}$  处为  $-S=O$  的伸缩振动吸收峰;  $1041.7\text{ cm}^{-1}$  处为  $-C-O$  的伸缩振动吸收峰;  $725.6\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰说明化合物中含有  $n > 4$  的烷基链 ( $CH_2$ ) $_n$ 。

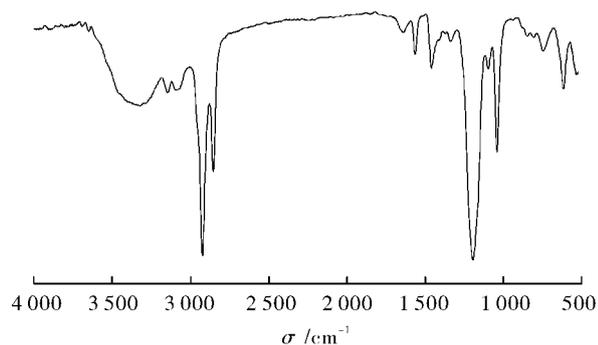


图2 HPSDim 的 FTIR 谱图

Fig. 2 FTIR spectrum of HPSDim

图3为 HPSDim 的  $^1H$ NMR 谱图。对图3解析 ( $\delta$ ) 如下:  $9.15(s, 1H)$ ,  $7.78(s, 1H)$ ,  $7.72(s, 1H)$ ,  $5.56(s, 1H)$ ,  $4.30 \sim 4.44(ddd, 2H)$ ,  $4.16(t, 2H)$ ,  $4.14(m, 1H)$ ,  $3.97(m, 2H)$ ,  $1.79(m, 2H)$ ,  $1.24(m, 18H)$ ,  $0.86(t, 3H)$ 。上述结果表明, 所得产物与目标产物分子结构完全相符, 且纯度较高。

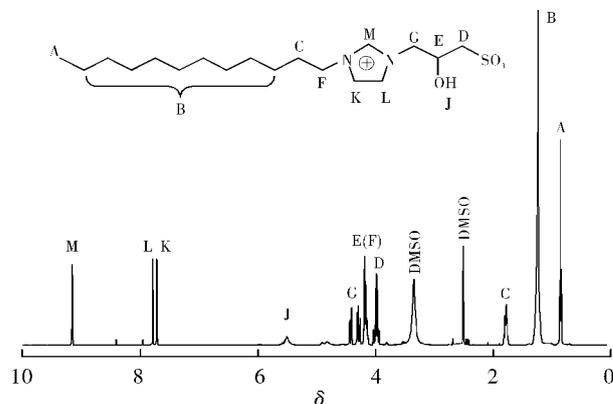


图3 HPSDim 的  $^1H$ NMR 谱图

Fig. 3  $^1H$ NMR spectrum of HPSDim

### 2.2 HPSDim 的 Krafft 点

实验测得 HPSDim 的 Krafft 点为  $(65.8 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。与相同疏水链长的传统羟基磺基甜菜碱相比, HPSDim 的 Krafft 点偏高。Reichert 等<sup>[27]</sup>认为: HPSDim 咪唑环中  $C-N=C-C$  键  $100.05^\circ$  的扭转角使得带正电荷的咪唑头基 ( $ImH^+$ ) 及带负电的磺基 ( $SO_3^-$ ) 与邻近 HPSDim 分子发生相互作用, 形成由  $C-H \cdots O$  紧密连接的网状结构, 从而导致 Krafft 点升高。若是有无机电解质共存, 由于电解质离子可抑制邻近分子  $SO_3^-$  与  $ImH^+$  间的相互作用, HPSDim 的溶解度会变大, Krafft 点会降低, 这一推测在实验中得到了证实: 在室温下, HPSDim 极易溶解于  $0.5\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 NaCl 水溶液中。

### 2.3 HPSDim 的表面活性参数

图4为  $35^\circ\text{C}$  时, HPSDim 在  $0.5\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 NaCl 水溶液中的  $\gamma - \lg c$  曲线。 $\gamma - \lg c$  曲线拐点对应浓度即为 cmc; 由图4可见  $\gamma - \lg c$  曲线拐点尖锐, 并且没有出现最低点现象, 结合 2.1 节分析结果可以推断: 所得 HPSDim 样品达到表面化学纯度 (surface chemical purity)<sup>[28]</sup> 级别。

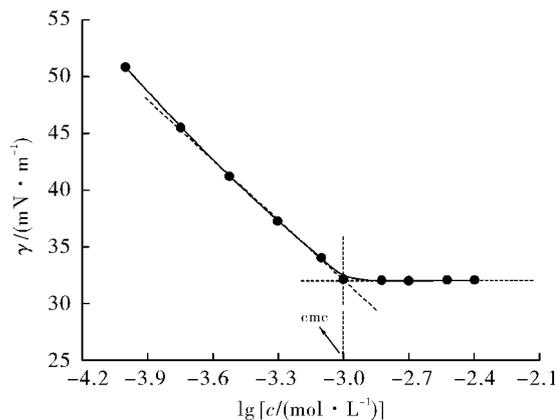


图4 HPSDim 的  $\gamma - \lg c$  曲线

Fig. 4  $\gamma - \lg c$  plot of HPSDim

根据图 4 中的数据,可以计算得到 HPSDim 的其他表面活性参数,如表面张力降低效率参数  $pc_{20}$ ,表面张力降低效能参数  $\Pi_{cmc}$ ,饱和吸附量  $\Gamma_m$ ,饱和吸附时 HPSDim 分子截面积  $A_{min}$  等。计算公式如下:

$$pc_{20} = -\lg c_{20} \quad (1)$$

$$\Pi_{cmc} = \gamma_0 - \gamma_{cmc} \quad (2)$$

$$\gamma_0 - \gamma = RT\Gamma_m \ln \left( \frac{c}{b} + 1 \right) \quad (3)$$

$$A_{min} = \frac{10^{18}}{N_A \Gamma_m} \quad (4)$$

式(1)中  $c_{20}$  为使  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 NaCl 水溶液的表面张力降低  $20 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$  时 HPSDim 的浓度;式(2)中  $\gamma_0$  为  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  时  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 NaCl 水溶液的表面张力;式(3)为 Gibbs 吸附公式与 Szyszkowski 公式结合后的数学变形, $R$  为气体常数  $8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , $T$  为热力学温度(K), $b$  为经验常数, $\Gamma_m$  为饱和吸附量( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ), $c$  为 HPSDim 的浓度( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ );式(4)中  $N_A$  为 Avogadro 常数  $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。

上述 HPSDim 的各项表面活性参数计算结果列于表 1 中。

表 1 HPSDim 的表面活性参数  
Tab. 1 Surface activity parameters of HPSDim

$c_{cmc}^{1)} / (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	$c_{cmc}^{2)} / (\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	$\gamma_{cmc} / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$\Gamma_m / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2})$	$A_{min} / \text{nm}^2$	$\Pi_{cmc} / (\text{mN} \cdot \text{m}^{-1})$	$pc_{20}$
0.98	1.0	32.20	3.19	0.52	39.60	4.03

注:1) 表面张力法测定结果;2) 荧光探针法测定结果。

图 5 是  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  时以苾为荧光探针获得的  $I_1/I_3 - c$  曲线图。在表面活性剂胶束溶液中,苾倾向于溶解在胶束的疏水区,因此常用作表面活性剂胶束形成与否的探针物质。苾的荧光发射光谱有 5 个荧光发射峰,其中  $I_1$  为  $373 \text{ nm}$  附近的荧光发射强度,可随苾所处环境的极性增加而增强; $I_3$  为  $384 \text{ nm}$  附近的荧光发射强度,对环境极性不敏感。因此,  $I_1/I_3$  的大小不仅可用作表征胶束微环境的极性大小,也可用作测量表面活性剂的 cmc。对  $I_1/I_3 - c$  曲线求一阶导数并作  $d(I_1/I_3)/dc - c$  曲线,则  $d(I_1/I_3)/dc - c$  曲线的最低点对应浓度  $c$  即为 cmc。

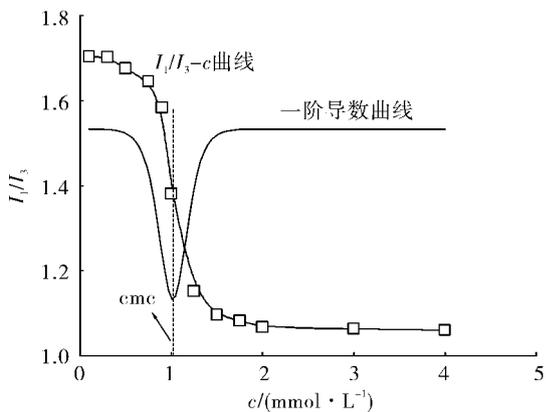


图 5 HPSDim 的  $I_1/I_3 - c$  曲线

Fig. 5  $I_1/I_3 - c$  plot of HPSDim

## 2.4 HPSDim 的胶束性质

以苾为探针、二苯甲酮为猝灭剂,用稳态荧光猝灭法测得 HPSDim 的平均胶束聚集数 ( $N_m$ ):

$$\ln \left( \frac{I_0}{I} \right) = \frac{N_m c_0}{c - c_{cmc}} \quad (5)$$

式(5)中  $I_0$  和  $I$  分别是不存在和存在猝灭剂情况下探针的荧光强度, $c_0$  和  $c$  分别为猝灭剂和 HPSDim 的浓度。图 6 为  $N_m$  随 HPSDim 的浓度  $c$  的变化关系曲线。

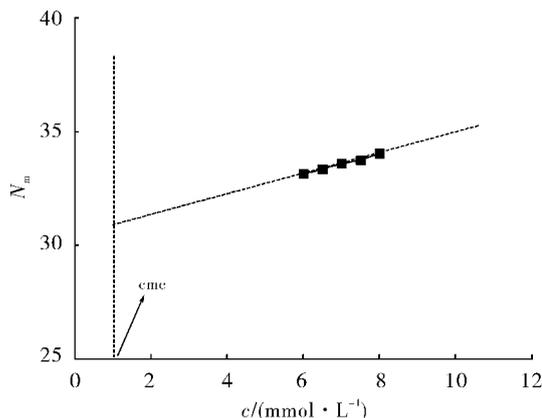


图 6 HPSDim 的  $N_m - c$  曲线

Fig. 6  $N_m - c$  plot of HPSDim

由图 6 可见,在浓度  $6.0 \sim 8.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  内,  $N_m$  随表面活性剂浓度的增加而增大,两者之间呈良好的线性依存关系,拟合方程如下:

$$N_m = 30.42 + 0.45c \quad R^2 = 0.9998 \quad (6)$$

将  $c$  即 cmc 代入式(6),即可得到临界胶束聚集数 ( $N_{m,c}$ )<sup>[21-26]</sup> 为 30.9。从理论上讲,  $N_{m,c}$  描述的是表面活性剂浓度刚刚达到 cmc 时,溶液中所形成的第 1 个胶束的胶束聚集数。

通过计算堆积参数 ( $P_c$ ) 的大小来估测 HPSDim 胶束的形状,计算公式<sup>[29]</sup>如下所示:

$$P_c = V_H / (l_c A_{min}) \quad (7)$$

$$V_H = 27.4 + 26.9C_n \quad (8)$$

$$l_c = 1.5 + 1.265C_n \quad (9)$$

式中  $V_H$  ( $10^{-3} \text{ nm}^3$ ) 与  $l_c$  ( $10^{-1} \text{ nm}$ ) 分别代表 HPSDim 分子的疏水碳链的体积与长度;  $C_n$  为 HPSDim 疏水碳链的碳原子个数。计算得到 HPSDim 的  $P_c$  为 0.40, 根据表面活性剂分子结构与胶束形态之间的几何关系<sup>[30]</sup> 推测, HPSDim 的胶束可能为柱状胶束。

### 3 结论

以 3-氯-2-羟基丙磺酸钠与  $n$ -十二烷基咪唑经过一步反应简便地得到两性型 IL 表面活性剂 1-(2-羟丙基磺基)-3-十二烷基咪唑内盐 (HPSDim), 并通过 ESI-MS, FTIR 及  $^1\text{H}$ NMR 确证了 HPSDim 的分子结构。HPSDim 的 Krafft 点较高, 为  $(65.8 \pm 0.5) \text{ }^\circ\text{C}$ , 但是在室温条件下极易溶于  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 NaCl 水溶液中;  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  时, HPSDim 的 cmc 分别为 0.98 (表面张力法) 和  $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  (荧光探针法); 在  $6.0 \sim 8.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  范围内, HPSDim 的平均胶束聚集数 ( $N_m$ ) 随 HPSDim 浓度的增大而线性增大, 由此推算得到其临界胶束聚集数 ( $N_{mc}$ ) 为 30.9; HPSDim 的堆积参数 ( $P_c$ ) 为 0.40, 推测 HPSDim 的胶束形状可能为柱状。

参考文献:

[1] 王寿武, 冯莉, 陈双平, 等. 离子液体及其在有机合成中的应用 [J]. 日用化学工业 2005, 35(2): 102-106.

[2] WELTON T. Room-temperature ionic liquids: Solvents for synthesis and catalysis [J]. Chemical Reviews, 1999, 99(8): 2071-2083.

[3] ZHAO H, XIA S, MA P. Use of ionic liquids as 'green' solvents for extractions [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2005, 80: 1089-1096.

[4] JENKINS H D B. Ionic liquids: an overview [J]. Science Progress, 2011, 94(3): 265-297.

[5] LAW G, WATSON P R. Surface tension measurements of  $N$ -alkylimidazolium ionic liquids [J]. Langmuir 2001, 17: 6138-6141.

[6] KANG W P, DONG B, GAO Y N, et al. Aggregation behavior of long-chain imidazolium ionic liquids in ethylammonium nitrate [J]. Colloid and Polymer Science 2010, 288: 1225-1232.

[7] CORNELLAS A, PEREZ L, COMELLES F, et al. Self-aggregation and antimicrobial activity of imidazolium and pyridinium based ionic liquids in aqueous solution [J]. Journal of Colloid and Interface Science 2011, 355(1): 164-171.

[8] BALTAZAR Q Q, CHANDAWALLA J, SAWYER K, et al. Interfacial and micellar properties of imidazolium-based monocationic and dicationic ionic liquids [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects 2007, 302(1): 150-156.

[9] DING Y S, ZHA M, ZHANG J, et al. Synthesis, characterization and properties of geminal imidazolium ionic liquids [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects 2007, 298(3): 201-205.

[10] DONG B, LI N, ZHENG L Q, et al. Surface adsorption and micelle formation of surface active ionic liquids in aqueous solution [J]. Langmuir 2007, 23: 4178-4182.

[11] WANG T F, SHANG Y Z, PENG C J, et al. Mixing behavior of ionic liquid surfactant  $C_{12}\text{mimBr}$  with common surfactants [J]. Acta Chimica Sinica 2009, 67(11): 1159-1165.

[12] SMIRNOVA N A, VANIN A A, SAFONOVA E A, et al. Self-assembly

in aqueous solutions of imidazolium ionic liquids and their mixtures with an anionic surfactant [J]. Journal of Colloid and Interface Science 2009, 336(2): 793-802.

[13] BEHERA K, PANDEY S. Interaction between ionic liquid and zwitterionic surfactant: A comparative study of two ionic liquids with different anions [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 331(1): 196-205.

[14] AEROV A A, KHOKHLOV A R, POTEKIN I I. "Amphiphilic" ionic liquid in a mixture of nonionic liquids: Theoretical study [J]. Journal of Physical Chemistry B 2010, 114(46): 15066-15074.

[15] DONG B, ZHAO X, ZHENG L, et al. Aggregation behavior of long-chain imidazolium ionic liquids in aqueous solution: Micellization and characterization of micelle microenvironment [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects 2008, 317: 666-672.

[16] ZHANG S H, GAO Y N, DONG B, et al. Interaction between the added long-chain ionic liquid 1-dodecyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate and Triton X-100 in aqueous solutions [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects 2010, 372(1/2/3): 182-189.

[17] ZHENG L, GUO C, WANG J, et al. Effect of ionic liquids on the aggregation behavior of PEO-PPO-PEO block copolymers in aqueous solution [J]. Journal of Physical Chemistry B 2007, 111(6): 1327-1333.

[18] ADHIKARI A, DEY S, DAS D K, et al. Solvation dynamics in ionic liquid swollen P123 triblock copolymer micelle: A femtosecond excitation wavelength dependence study [J]. Journal of Physical Chemistry B 2008, 112(20): 6350-6357.

[19] COLE A C, JENSEN J L, NTAI I. Novel Brønsted acidic ionic liquids and their use as dual solvent-catalysts [J]. Journal of the American Chemical Society 2002, 124(21): 5962-5963.

[20] TONDO D W, LEOPOLDINO E C, SOUZA B S, et al. Synthesis of a new zwitterionic surfactant containing an imidazolium ring: Evaluating the chameleon-like behavior of zwitterionic micelles [J]. Langmuir, 2010, 26: 15754-15760.

[21] LIU X F, DONG L L, FANG Y. A novel zwitterionic imidazolium-based ionic liquid surfactant: 1-Carboxymethyl-3-dodecylimidazolium inner salt [J]. Journal of Surfactants and Detergents, 2011, 14(4): 497-504.

[22] 申云霞, 毕彩丰, 赵宇, 等. 2-羟基-3-氯丙磺酸钠的合成及结构表征 [J]. 化工进展 2009, 28(12): 2218-2220, 2225.

[23] HATÖ M, SHINODA K. Krafft points of calcium and sodium dodecylpoly(oxethylene) sulfates and their mixtures [J]. Journal of Physical Chemistry, 1973, 77: 378-381.

[24] TSUJII K, SAITO N, TAKEUCHI T. Krafft points of anionic surfactants and their mixtures with special attention to their applicability in hard water [J]. Journal of Physical Chemistry, 1980, 84: 2287-2291.

[25] AGUIAR J, CARPENA P, MOLINA-BOLÍVAR J A, et al. On the determination of the critical micelle concentration by the pyrene 1:3 ratio method [J]. Journal of Colloid and Interface Science 2003, 258: 116-122.

[26] 方云, 刘雪锋, 夏咏梅, 等. 稳态荧光探针法测定临界胶束聚集数 [J]. 物理化学学报 2001, 17(9): 828-831.

[27] REICHERT W M, TRULOVE P C, DE LONG H C. 3-(1-Methyl-3-imidazolium) propanesulfonate: A precursor to a brønsted acid ionic liquid [J]. Acta Crystallogr Sect E: Struct Rep Online 2010, 66(3): O591.

[28] MOHAMED A, TRICKETT K, CHIN S Y, et al. Universal surfactant for water oils and  $\text{CO}_2$  [J]. Langmuir 2010, 26: 13861-13866.

[29] ROSEN M J. Surfactants and interfacial phenomena [M]. 3rd ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc 2004: 108.

[30] TANFORD C. Micelle shape and size [J]. Journal of Physical Chemistry, 1972, 76(21): 3020-3024.