

氟醚磷酸胆碱的合成及性能研究

廖晨宇^{a,b} 郭山巍^{a,b} 黄美薇^{*,b} 郭勇^{*,b}

陈庆云^b 刘超^{*,a} 张运文^c

(^a 上海应用技术大学 化学与环境工程学院 上海 201418)

(^b 中国科学院上海有机化学研究所 先进氟氮材料重点实验室 上海 200032)

(^c 三明市海斯福化工有限责任公司 福建三明 365200)

摘要 磷酸胆碱是一类两性型表面活性剂, 在生物领域被广泛应用. 当把它的疏水部分由碳氢链段替换为含氟链段时, 磷酸胆碱表面活性剂的界面性质会呈现出明显差异. 将含氟链段引入到磷酸胆碱中丰富了它的种类拓展了它的应用. 本工作合成了一种氟醚磷酸胆碱表面活性剂, 在含氟链段中插入氧原子, 使含氟链段更加多样化. 对氟醚磷酸胆碱的表面活性、泡沫性能及润湿性能进行了一系列探究, 实验结果表明, 氟醚磷酸胆碱具有低表面张力、泡沫性能好、可在聚四氟乙烯(PTFE)上润湿等优点, 是一类具有良好应用前景的表面活性剂.

关键词 氟醚表面活性剂; 磷酸胆碱; 表面张力; 临界胶束浓度; 泡沫; 接触角

Synthesis and Properties of Fluoroether Phosphocholine

Liao, Chenyu^{a,b} Guo, Shanwei^{a,b} Huang, Meiwei^{*,b} Guo, Yong^{*,b}
Chen, Qing-Yun^b Liu, Chao^{*,a} Zhang, Yunwen^c

(^a School of Chemical and Environment Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418)

(^b Key Laboratory of Fluorine and Nitrogen Chemistry and Advanced Materials, Shanghai Institute of Organic Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032)

(^c Sanming Hexafluoro Chemicals Company, Ltd., Sanming, Fujian 365200)

Abstract Amphoteric phosphocholine as a family of mild surfactants are widely used in biology due to their phosphate structure related to naturally occurring membrane lipids. Changing its hydrophobic part to the fluorocarbon counterparts, it was found that the interfacial properties of phosphocholine surfactants exhibit significant differences. Currently, the research on fluorinated phosphocholine surfactants is limited and lacks types of fluorinated hydrophobic structures. We found that oxygen atoms exhibit specificity in fluorinated surfactants in our previous works. In this work, a kind of phosphocholine containing a fluoroether hydrophobic chain was synthesized, and its interfacial properties, foam properties, and wetting properties were studied. At the beginning, we conducted a substitution reaction using fluoroether alcohols and 2-chloro-2-oxo-1,3,2-dioxaphospholane as raw materials, triethylamine as a base, and tetrahydrofuran (THF) as a solvent under ice bath. Then, the intermediate C72-P is obtained through distillation, which is a transparent viscous liquid with a yield of 70%. The next step is to dissolve the C72-P with trimethylamine (2 mol/L in THF) in acetonitrile at 70 °C for 48 h. Finally, a fluoroether phosphocholine surfactant was obtained and purified through column chromatography to give C72-MPB in 90% yield. Under the same conditions, a fluorinated linear phosphocholine surfactant 6:2-MPB was prepared using perfluorohexyl ethanol, which is a white solid with a overall yield of 60%. The phosphocholine fluorinated surfactants C72-MPB and 6:2-MPB were diluted with distilled water to obtain various concentrations of solutions, the surface properties were measured by surface tension instrument Krüss K100C, and the surface tension was measured by Wilhelmy platinum plate method. On the other hand, the performance of foam under two different concentrations of C72-MPB was tested by bubbling method, and the morphology of foam was observed. C72-MPB solution was dropped onto the surface of polytetrafluoroethylene (PTFE), contact angle on PTFE was measured, and its wettability at different time was recorded. The results show that the new fluoroether phosphocholine surfactant has good solubility, low surface tension, good wettability, good foam stability. Fluoroether phosphocholine surfactants have potential utility value in the field of life sciences and medicine. It is a kind of surfactant with excellent application prospects.

Keywords fluoroether surfactants; phosphocholine; surface tension; critical micelle concentration; foam; contact angle

* E-mail: hmw@sioc.ac.cn; yguo@sioc.ac.cn; chaoliu@sit.edu.cn

Received September 22, 2023; published December 4, 2023.

Supporting information for this article is available free of charge via the Internet at <http://sioc-journal.cn>.

Project supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFF0701700), the project of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality in China (No. 21010503800), the National Natural Science Foundation of China (No. 21871283), Science and Technology Department of Fujian Province (No. 2023T3066).

项目受国家重点研发计划(No. 2021YFF0701700)、上海市科委项目(No. 21010503800)、国家自然科学基金(No. 21871283)和福建省科学技术厅(No. 2023T3066)资助.

表1 第一步反应条件筛选

Table 1 Selection of the optimum condition of the first step reaction

Entry ^a	<i>n</i> (1) : <i>n</i> (C72-OH) (molar ratio)	Time/h	Conversion of 1 ^b /%
1	1 : 1	2	50
2	1.5 : 1	2	78
3	2 : 1	2	100
4	2 : 1	1	72

^a The raw material C72-OH is 7.0 mmol, and the reaction temperature is from 0 °C to room temperature. ^b The reaction conversion rate is determined by ¹H NMR.

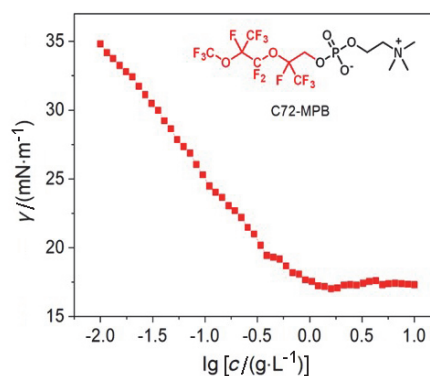
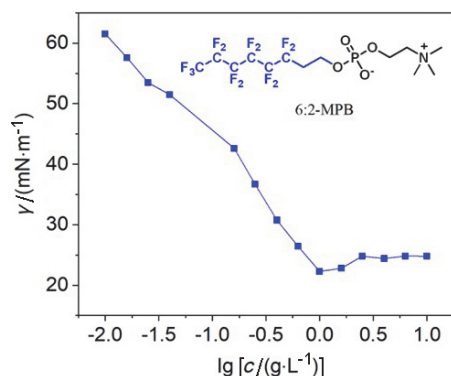
图3 6:2-MPB 和 C72-MPB 的 γ -lg *c* 曲线Figure 3 γ -lg *c* curves for 6:2-MPB and C72-MPB

表2 文献中报道的磷酸胆碱表面活性剂

Table 2 Phosphocholine surfactants reported in literature

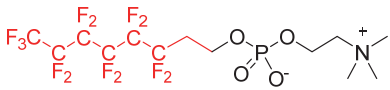
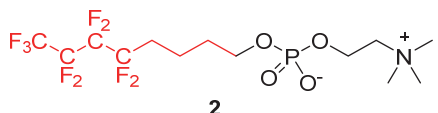
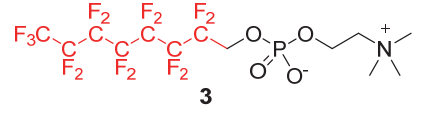
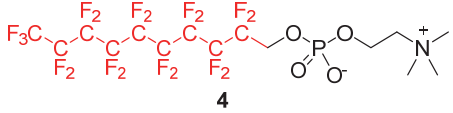
Compound	$\gamma_{\text{cmc}}/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	cmc/		Ref.
		(mmol·L ⁻¹)	(g·L ⁻¹)	
 6:2-MPB	22.6	2.1	1.1	本文
 2	28.7	21.0	9.6	[2]
 3	22.1	0.6	0.3	[2]
 4	18.1	0.11	0.07	[2]

表3 磷酸胆碱氟表面活性剂的表面活性数据

Table 3 Surface activity data of phosphocholine fluorosurfactants

Compound	$\gamma_{\text{cmc}}/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$	cmc/		$\Gamma_{\text{max}}/(\times 10^{-10} \text{ mol}\cdot\text{cm}^{-2})$	$A_{\text{min}}/\text{nm}^2$	<i>T</i> /°C
		(mmol·L ⁻¹)	(g·L ⁻¹)			
6:2-MPB	22.6	2.1	1.1	4.5	0.4	25.0
C72-MPB	17.1	2.0	1.1	1.6	1.1	25.0

我们将文献中的氟磷酸胆碱进行对比, 如表 2 所示, 6:2-MPB 与化合物 2、3、4 对比, 疏水链段含氟量越高 ($2 < 6:2\text{-MPB} < 3 < 4$), 降低表面张力的能力越强, 即 γ_{cmc} 越低. 然而, 对比化合物 4 与带有氟醚疏水链段的 C72-MPB, 发现化合物 4 的含氟量大于 C72-MPB, 但 4 ($\gamma_{\text{cmc}} = 18.1 \text{ mN/m}$) 的 γ_{cmc} 却大于 C72-MPB ($\gamma_{\text{cmc}} = 17.1 \text{ mN/m}$). 含有氟醚链段的 C72-MPB 降低表面张力的能力更强, 我们认为氧原子的插入使胶束结构排布发生改变, 是影响表面张力的主要因素.

2.3 表面性能的探究

我们进一步探究了 C72-MPB 与化合物 6:2-MPB 表面性能的差异, 使用 Gibbs 方程对 Γ_{cmc} 的值进行计算, 由 Γ_{cmc} 进一步计算在 cmc 处每个分子在空气-水界面的表面活性剂所占面积, 即 A_{min} :

$$\Gamma_{\text{max}} = -\frac{1}{2.303 \times nRT} \times \frac{d\gamma}{d \log c}$$

$$A_{\text{min}} = \frac{10^{14}}{N_A \Gamma_{\text{max}}}$$

氟磷酸胆碱为两性表面活性剂, 其 n 值为 1, R 为气体常数 ($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T 为绝对温度, γ 和 c 分别为表面活性剂的表面张力和水溶液浓度. N_A 是阿伏加德罗常数 ($6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$).

结果表明: 两个化合物虽然疏水碳链长度相似, 但 Γ_{max} 和 A_{min} 差异很大. 6:2-MPB 的 A_{min} 与 Γ_{max} (0.4 nm^2 , $4.5 \times 10^{-10} \text{ mol/cm}^2$) 与 C72-MPB (1.1 nm^2 , $1.6 \times 10^{-10} \text{ mol/cm}^2$) 变化一倍左右, 进一步说明氧原子的插入改变了分子在水-空气界面上的排列方式. 因此, 两种含氟链段的磷酸胆碱呈现出截然不同的表面活性, 因此它们在实际应用中也会各有所长. C72-MPB 表现出更强的降低表面张力的能力, 因此我们进一步对 C72-MPB 的泡沫性能进行探究.

2.4 泡沫性能的探究

泡沫发泡性和稳定性是表征泡沫性能的重要参数^[10]. 我们配制了不同质量分数的 C72-MPB 水溶液, 对其泡沫性能进行测试.

2.4.1 泡沫发泡倍数的测定

泡沫的发泡倍数、泡沫高度、泡沫体积是评价泡沫性能的重要指标. 发泡倍数 α 的计算公式为:

$$\alpha = \frac{V_1}{V_0}$$

其中 V_1 为表面活性剂溶液的最大发泡体积, V_0 为表面活性剂溶液的初始体积.

实验结果表明, 1 g/L 的 C72-MPB 和 2 g/L 的 C72-MPB 的表面活性剂溶液发泡倍数分别为 3.3 和 3.5 (见表 4), 属于低倍泡沫液, 不同浓度下泡沫高度与泡沫体积随时间变化见图 4a, 4b.

2.4.2 泡沫体积稳定性(FVS)

采用泡沫体积稳定性(FVS)参数对泡沫行为进行探究. FVS 的计算公式如下:

$$FVS(t) = \frac{V_{t(\text{foam})}}{V_{f(\text{foam})}} \times 100\%$$

其中 $V_{t(\text{foam})}$ 是某一时间的泡沫体积, $V_{f(\text{foam})}$ 是发泡结束后的泡沫体积.

我们与文献中结构相似的三种碳氢链段磷酸酯甜菜碱进行了对比^[11], 它们的疏水链段分别为十二烷基、十四烷基和十六烷基, 在质量分数为 0.25% 时, 三种化合物 5 min 时的 FVS 分别为 98.1%, 98.9%, 99.4%. 0.2% 浓度下 C72-MPB 在 5 min 时的 FVS 为 99.2%, 表明了 C72-MPB 长脂肪链的磷酸胆碱的 FVS 效果相当.

在实验过程中我们观测到 7500 s 之前, 1 g/L 和 2 g/L 浓度下 C72-MPB 泡沫高度接近. 1 g/L 浓度的 C72-MPB 泡沫高度随时间平稳下降, 而 2 g/L 浓度的 C72-MPB 泡沫高度随时间骤降. 测试结果显示 2 g/L 浓度的 C72-MPB 泡沫的半衰期 ($t_{\text{FVS}50\%}$) 为 8215 s, 而 1 g/L 浓度的 C72-MPB 泡沫的半衰期超过 11770.1 s, 远大于 2 g/L 浓度. 表明 C72-MPB 在 1 g/L 浓度下的泡沫稳定性优于 2 g/L.

2.4.3 泡沫综合值 F

泡沫综合值 F 通过泡沫体积和半衰期来计算, 公式如下:

$$F = V_0 \times t_{\text{FVS}50\%}$$

通过测试得到 1 g/L 和 2 g/L 的 C72-MPB 的泡沫半衰期 (见表 4), 计算出泡沫综合值 F 分别为 $1.9 \times 10^6 \text{ mL} \cdot \text{s}$ 和 $1.4 \times 10^6 \text{ mL} \cdot \text{s}$ (见表 4), 结果显示 1 g/L C72-MPB 溶液的泡沫综合性能更佳.

2.4.4 泡沫液体稳定性(FLS)测试

泡沫液体稳定性(FLS)体现了泡沫维持液体和泡沫脱水的能力, 计算公式如下:

$$FLS(t) = \frac{V_{i(\text{liq})} - V_{t(\text{liq})}}{V_{i(\text{liq})} - V_{f(\text{liq})}}$$

其中, $V_{i(\text{liq})}$ 是在气体通过表面活性剂溶液生成泡沫前溶液的初始体积, $V_{f(\text{liq})}$ 是气体通过表面活性剂溶液生成泡沫后的体积, $V_{t(\text{liq})}$ 是在一定的时间内的溶液体积. $FLS = 75\%$ 时所需时间即 $t_{\text{FLS}75\%}$, 是指从泡沫形成开始到泡沫析出 25% 液体所需的时间, 该值过小或者过大均会影响灭火效果: 太小会导致泡沫迅速失水变成干泡, 影响流动性能; 太大则表明析水缓慢, 导致油面温度下降变慢. 实验结果显示质量分数为 1 g/L 和 2 g/L 的 C72-MPB 溶液的 $t_{\text{FLS}75\%}$ 分别为 40.1 s 和 45.3 s (见表 4). 1 g/L 和 2 g/L 浓度的 C72-MPB 的液体含量见图 4c.

2.4.5 平均气泡面积

平均气泡面积($\overline{MBA}$)显示了表面活性剂水溶液中泡沫尺寸随时间的变化趋势. 测试结果显示, 1 g/L 和 2 g/L 浓度的 C72-MPB 溶液初始时的平均气泡面积分别为 $15604 \mu\text{m}^2$ 和 $10515 \mu\text{m}^2$, 在 1 g/L 浓度下 10000 s 时的平均气泡面积为 $2.4 \times 10^6 \mu\text{m}^2$, 相同时间时 2 g/L 浓度下 C72-MPB 溶液的平均气泡面积为 $2.9 \times 10^6 \mu\text{m}^2$ (见表 4). 1 g/L 和 2 g/L 浓度的 C72-MPB 的 $\overline{MBA}$ 随时间

变化见图 4d, 不同时间下的气泡形态如图 5.

2.5 润湿性研究

当液体放置在固体表面时, 可以直接观察到其静态接触角, 当接触角越小, 其润湿性越好^[12]. 测试质量分数为 1 g/L 浓度的 C72-MPB 和蒸馏水在 PTFE 表面上的接触角, 实验结果分别为 47° 和 124° , 说明在 PTFE 上, 1 g/L 浓度下 C72-MPB 有较好的润湿性. 观察 C72-MPB 液滴形态随时间变化, 如图 6 所示.

表 4 C72-MPB 的泡沫性能参数

Table 4 Foam performance parameters of C72-MPB

浓度/(g·L ⁻¹)	α	$t_{\text{FLS}75\%}/\text{s}$	$t_{\text{FVS}50\%}/\text{s}$	$F/(\text{mL}\cdot\text{s})$	$\overline{MBA}_{\text{initial}}/\mu\text{m}^2$	$\overline{MBA}_{10000\text{ s}}/\mu\text{m}^2$
1	3.27	40.1	11775 (54%)	1.9×10^6	1.6×10^4	2.4×10^6
2	3.47	45.3	8215	1.4×10^6	1.1×10^4	2.9×10^6

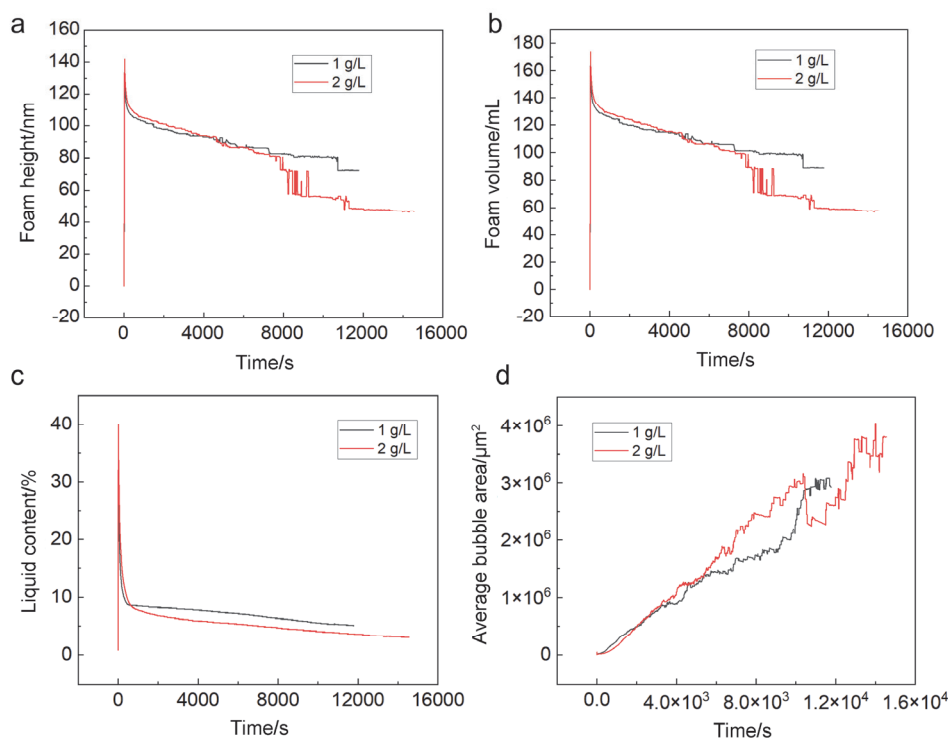


图 4 表面活性剂水溶液中泡沫性能表征. (a) 泡沫高度的比较. (b) 泡沫体积比较. (c) 表面活性剂中液体含量的比较. (d) 平均气泡面积的比较
Figure 4 Characterization of foam properties in aqueous surfactant solutions. (a) Comparison of foam heights. (b) Comparison of foam volumes. (c) Comparison of liquid content in surfactants. (d) Comparison of the average bubble area

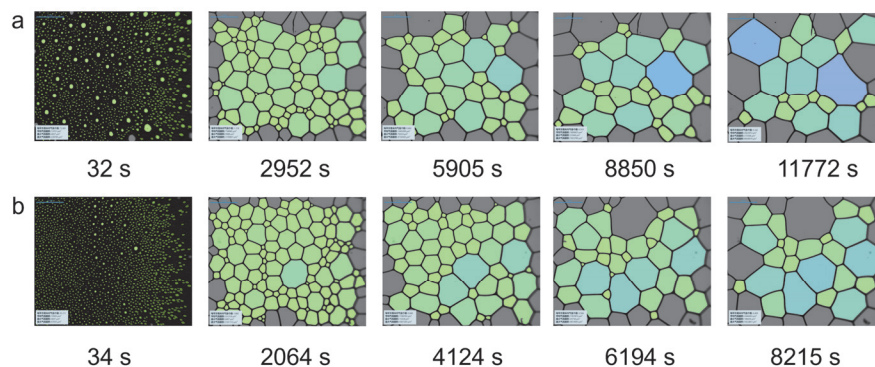


图 5 (a) 1 g/L C72-MPB 和 (b) 2 g/L C72-MPB 表面活性剂溶液从泡沫峰值高度后的不同时间的泡沫形态

Figure 5 Foam morphology of (a) 1 g/L C72-MPB and (b) 2 g/L C72-MPB surfactant solutions at different times after the foam peak height

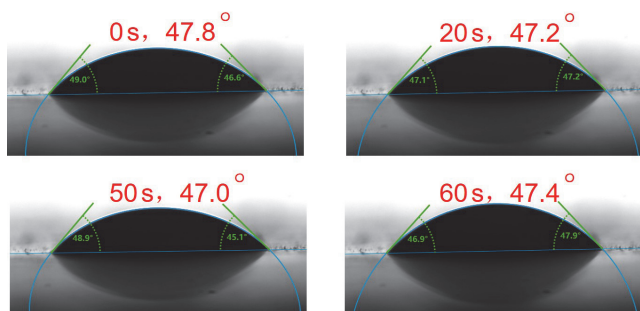


图6 1 g/L 的 C72-MPB 水溶液在 PTFE 上不同时间的润湿状态
Figure 6 Wetting image of 1 g/L C72-MPB aqueous solution on PTFE at different time

2.6 等电点、热重分析和差示扫描量热

通过 zeta 电位法测试 C72-MPB 氟磷酸胆碱的等电点为 pH=5.61 (zeta 电位为 0 时的 pH 值).

我们分别使用差示扫描量热仪(DSC)和热重分析法(TGA)测定 C72-MPB 氟磷酸胆碱热量和重量相关量随温度升高的变化(图 7 和图 8).

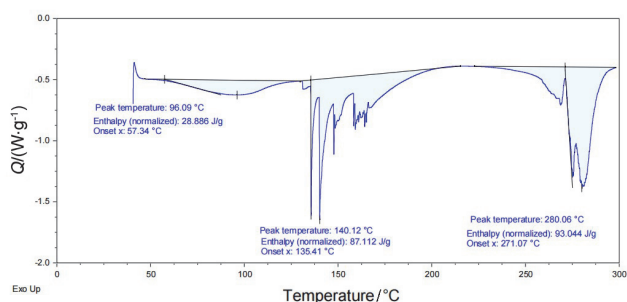


图7 C72-MPB 热通量随温度的变化
Figure 7 The heat flow of the C72-MPB varies with temperature

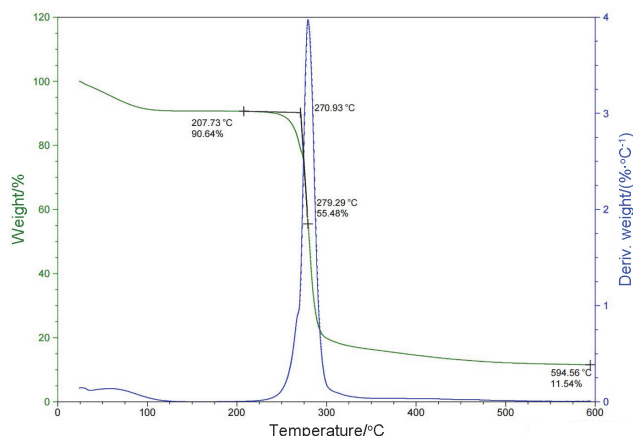


图8 C72-MPB 重量百分比随温度的变化
Figure 8 The weight percentage of the C72-MPB changes with temperature

TGA 图中可以看到样品的失重主要集中在 100 °C 以下和 250 °C 到 300 °C, DSC 图中可以看出样品的吸热主要有三个区域, 分别在 100 °C 以下, 140~170 °C

和 260~300 °C. 结合 TGA 和 DCS 来看, 在温度 100 °C 以下部分是少量溶剂及产物中的水蒸发, 温度达到 140 °C 时, DSC 中有吸热峰, 但 TGA 曲线没有变化, 说明产物发生相变, 从固体转变为液体, 直到 250 °C 左右开始失重, 最终仍有 11.54% 固体剩余证明一定存在分解现象并产生固体产物, 结合 DSC 图中有多个吸热峰来看推测是产物有多步分解, 也不排除存在部分的汽化失重的可能性.

3 结论

本文设计合成了一种 C72-MPB 氟醚磷酸胆碱表面活性剂, 测试了其在水溶液中的一系列表面活性性能、泡沫性能、润湿性能、等电点、DSC 和 TGA 等. 实验结果表明 C72-MPB 氟醚磷酸胆碱具有表面张力低、泡沫性能与润湿性能好等一系列优势, 为氟醚磷酸胆碱在生物医药领域和日化品领域的应用提供理论基础.

4 实验部分

4.1 试剂来源

C72-OH 由三明市海斯福化工有限责任公司提供, 纯度为 99%; 2-氯-2-氧-1,3,2-二氧磷杂环戊烷购于上海迈瑞尔生化科技有限公司; 三甲胺购于上海梯希爱化成工业发展有限公司, 其余试剂均为分析纯试剂.

4.2 化合物的合成

4.2.1 化合物 C72-P 的合成

将 100 mL 干燥的反应瓶抽换氮气 3 次, 在氮气保护下依次加入原料 C72-OH (10 g, 26 mmol, 1 equiv.) 和超干四氢呋喃 40 mL, 保持冰浴, 加入三乙胺 (3.4 g, 34 mmol, 1.3 equiv.), 最后缓慢滴加原料 1 (4.8 g, 34 mmol, 1.3 equiv.). 在冰浴条件下反应 2 h, 反应结束. 过滤, 收集滤液, 旋转蒸发, 减压蒸馏 (95 °C/133 Pa), 最后得到无色粘稠液体 8.5 g, 产率 70%.

4.2.2 化合物 C72-MPB 的合成

在冰浴条件下, 将化合物 C72-P (5 g, 10 mmol, 1 equiv.)、乙腈 10 mL、三甲胺的四氢呋喃溶液 (10 mL, 20 mmol, 2 equiv.) 依次加入至 50 mL 耐压瓶中, 升温至 70 °C, 反应 48 h. 反应结束, 过滤取滤渣, 将滤渣溶解在甲醇中, 加入适量碳酸钠室温搅拌 5 min, 再次过滤, 将滤液旋干后, 粗产物通过硅胶柱快速过滤, 得到白色固体 9.8 g, 产率 90%.

4.3 测试仪器及方法

表面张力的测定: 使用 KRÜSS 公司表界面张力仪进行测定, 仪器型号 K100C, 测试方法为 Wilhelmy 吊片法, 温度为 25 °C.

泡沫性能的测定: 使用 KRÜSS 公司的泡沫分析仪, 型号 DFA100, 测试方法为鼓泡法, 分别配制 1 g/L 和 2

g/L 浓度的 C72-MPB 水溶液, 测量其泡沫高度、泡沫中液体含量随时间的变化。

接触角测定: 使用 KRÜSS 公司的液滴分析仪, 型号 DSA25。配制 1 g/L 浓度的 C72-MPB 水溶液, 用微量进样器取 2 μ L 溶液注射于 PTFE 表面, 观察其接触角的变化(在 0~60 s 之间), 重复测量 3 次, 取平均值。

等电点测定: 使用 Malvern ZETA 电位测量仪, 型号 ZEN3600。配制 1 g/L 浓度的 C72-MPB 水溶液, 将溶液调节至不同 pH, 当 Zeta 电位为零时的 pH 值即为等电点(25 $^{\circ}$ C), 数据来自英格尔检测技术服务(上海)有限公司。

差示扫描量热测定: 使用差示扫描量热仪, 美国 TA Instruments, 型号 Q2500。记录从室温下, 每分钟上升 10 $^{\circ}$ C 至 300 $^{\circ}$ C 时样品与参比物之间的能量差。

热重分析测定: 使用热重分析仪, 美国 TA Instruments, 型号 Q500。记录从室温下, 每分钟上升 10 $^{\circ}$ C 至 600 $^{\circ}$ C 时样品的重量变化。

References

- [1] (a) Xu, Y.; Takai, M.; Ishihara, K. *Ann. Biomed. Eng.* **2010**, *38*, 1938. (b) Cheng, Y.-Q.; Du, T.-T.; Niu, C.-R.; Xue, L.-N.; Jin, Z.-W.; Feng, Z. *Fine Chemicals* **2019**, *36*, 190 (in Chinese). (程玉桥, 杜婷婷, 牛春荣, 薛莉娜, 晋战稳, 冯喆, 精细化工, **2019**, *36*, 190.) (c) Zheng, Y.; Yang, Y.-F.; Li, H.; Tan, G.-H. *Electronics Process Technology* **2015**, *36*, 89 (in Chinese). (郑毅, 杨艺峰, 李华, 谭国华, 电子工艺技术, **2015**, *36*, 89.) (d) Wu, W.-B.; Zhao, L.; Zhang, H.-T.; Xu, B.-C. *China Surfactant Detergent & Cosmetics* **2016**, *46*, 75 (in Chinese). (吴望波, 赵莉, 张华涛, 徐宝财, 日用化学工业, **2016**, *46*, 75.) (e) Kashgary, A.; Sontrop, J. M.; Li, L. H.; Al-Jaishi, A. A.; Habibullah, Z. N.; Alsolaimani, A. R.; Clark, W. F. *BMC Nephrol.* **2016**, *17*, 104. (f) Han, G. S.; He, C.; Zhao, J. F.; Liao, X. C.; Wu, X. L. *Chin. J. Org. Chem.* **2011**, *31*, 1848 (in Chinese). (韩国胜, 何成, 赵军峰, 廖新成, 武现丽, 有机化学, **2011**, *31*, 1848.) (g) Liu, S.; Cheng, Q.; Wei, T.; Yu, X. L.; Johnson, L. T.; Farbiak, L.; Siegwart, D. J. *Nat. Mater.* **2021**, *20*, 701.
- [2] Kissa, E. *Fluorinated Surfactants and Repellents*, Marcel Dekker Inc., New York, **2001**, pp. 1~21.
- [3] Baba, T.; Takagi, T.; Sumaru, K.; Kanamori, T. *Chem. Phys. Lipids* **2020**, *227*, 104870.
- [4] (a) Krafft, M.-P.; Rolland, J.-P.; Vierling, P.; Riess, J. G. *New J. Chem.* **1990**, *14*, 869. (b) Krafft, M.-P. *Biochimie* **2012**, *94*, 11.
- [5] Zhou, L.; Triozzi, A.; Figueiredo, M.; Emrick, T. *ACS Macro Lett.* **2021**, *10*, 1204.
- [6] Wang, X.; Huang, M. W.; Su, Z. B.; Qian, L. B.; Guo, Y.; Chen, Q.-Y.; Wu, C. Y.; Lv, T.; Su, Q.; Shen, Q.; Ma, J. *Chin. Chem. Lett.* **2023**, *34*, 107961.
- [7] Dai, L. H.; Guo, Y.; Su, Z. B.; Huang, M. W.; Chen, Q.-Y.; Zhao, Z.-G.; Wu, C. Y.; Su, Q.; Shen, Q. *J. Fluorine Chem.* **2021**, *246*, 109793.
- [8] Krafft, M. P.; Riess, J. G. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* **2015**, *20*, 192.
- [9] (a) Pan, Y. T.; Zhang, H. X.; Cui, Q. Q.; Sheng, N.; Yeung, L.; Guo, Y.; Sun, Y.; Dai, J. Y. *Environ. Sci. Technol.* **2017**, *51*, 9553. (b) Cui, Q.-Q.; Pan, Y. T.; Zhang, H. X.; Sheng, N.; Wang, J. S. Guo, Y.; Dai, J. Y. *Environ. Sci. Technol.* **2018**, *52*, 982. (c) Pan, Y. T.; Zhang, H. X.; Cui, Q. Q.; Sheng, N.; Yeung, L.; Guo, Y.; Sun, Y.; Dai, J. Y. *Environ. Sci. Technol.* **2018**, *52*, 7261.
- [10] Sakai, T.; Kaneko, Y. *J. Surfactants Deterg.* **2004**, *7*, 291.
- [11] Liu, J. J.; Xu, H. J. *China Surfactant Detergent & Cosmetics* **2020**, *7*, 446 (in Chinese). (刘佳佳, 许虎君, 日用化学工业, **2020**, *7*, 446.)
- [12] Kovalchuk, N. M.; Trybala, A.; Starov, V.; Matar, O.; Ivanova, N. *Adv. Colloid Interface Sci.* **2014**, *210*, 65.

(Cheng, B.)