

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.03.005

## 含聚醚基团阴离子表面活性剂对 PMMA 表面润湿性的影响

赵 濂<sup>1</sup>, 陈兴锋<sup>1,2</sup>, 张 磊<sup>1</sup>, 严 峰<sup>3</sup>, 张 路<sup>1</sup>

(1. 中国科学院理化技术研究所 光化学转换与功能材料重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 天津工业大学 化学学院, 天津 300387)

**摘要:** 为了探索同时具有聚氧异丙烯基团(PO)和聚氧乙烯基团(EO)的延展型表面活性剂分子在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)表面的润湿性调控机制, 对5种具有PO基团和EO基团的阴离子延展型表面活性剂十八烷基-(聚氧异丙烯)<sub>m</sub>-(聚氧乙烯)<sub>n</sub>-羧酸钠(C<sub>18</sub>PO<sub>m</sub>EO<sub>n</sub>COONa,  $m = 5, 10, 15$  和  $n = 5, 10, 15$ )溶液在PMMA表面的润湿性进行测试分析, 考察了PO基团、EO基团和表面活性剂浓度对表面张力( $\gamma_{LV}$ )和接触角( $\theta$ )的影响, 并计算黏附张力( $\gamma_{LV} \cos \theta$ )、黏附功( $W_A$ )和固液界面张力( $\gamma_{SL}$ )等吸附参数。结果表明: 表面活性剂浓度小于临界胶束浓度(CMC)时, C<sub>18</sub>PO<sub>m</sub>EO<sub>n</sub>COONa分子在溶液-空气界面和PMMA-溶液界面吸附, 导致 $\gamma_{LV}$ 降低, 疏水烷基链朝向水相, 导致 $\gamma_{SL}$ 升高, 两者共同作用导致 $\theta$ 不发生变化, 维持在约75°; 浓度大于CMC时, C<sub>18</sub>PO<sub>m</sub>EO<sub>n</sub>COONa分子在溶液-空气和PMMA-溶液界面同时达到饱和吸附, 吸附参数趋于稳定; 进一步增大浓度, C<sub>18</sub>PO<sub>m</sub>EO<sub>n</sub>COONa分子通过疏水相互作用在PMMA-溶液界面形成聚集体, 亲水基团朝向水相, 导致 $\gamma_{SL}$ 迅速减小,  $\theta$ 急剧降低, C<sub>18</sub>PO<sub>3</sub>EO<sub>15</sub>C的 $\theta$ 可降低至约43°。随着PO基团数量的增加, C<sub>18</sub>PO<sub>m</sub>EO<sub>n</sub>COONa在CMC时的 $\gamma_{LV}$ 和高浓度时的 $\theta$ 逐渐升高; 而随着EO基团数量的增加,  $\gamma_{LV}$ 和 $\theta$ 几乎不发生变化。

**关键词:** 延展型表面活性剂; 润湿性; 聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA); 聚氧异丙烯基团(PO); 聚氧乙烯基团(EO)

中图分类号: O647 文献标志码: A 文章编号: 1671-024X(2024)03-0032-08

### Effects of anionic surfactants containing polyether group on wettability of polymethyl methacrylate surface

ZHAO Sui<sup>1</sup>, CHEN Xingfeng<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, YAN Feng<sup>3</sup>, ZHANG Lu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Photochemical Conversion and Optoelectronic Materials, Technical Institute of Physics and Chemistry of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Chemistry, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** In order to explore the wettability regulation mechanism of extendable surfactant molecules with both polyoxyisopropyl(PO) and polyoxyethylene(EO) groups on the surface of polymethyl methacrylate(PMMA), the wettability of sodium octadecyl-(polyoxyisopropyl)<sub>m</sub>-(polyoxyethylene)<sub>n</sub>-carboxylate (C<sub>18</sub>PO<sub>m</sub>EO<sub>n</sub>COONa,  $m = 5, 10, 15$ , and  $n = 5, 10, 15$ ) solutions of five anionic extendable surfactants with PO and EO groups on the surface of PMMA was tested and analyzed. The effects of PO groups, EO groups, and surfactant concentrations on surface tension ( $\gamma_{LV}$ ) and contact angle ( $\theta$ ) were investigated and the adsorption parameters such as adhesion tension ( $\gamma_{LV} \cos \theta$ ), adhesion work ( $W_A$ ), and solid-liquid interfacial tension ( $\gamma_{SL}$ ) were calculated. The results show that when the concentration of surfactant is less than the critical micelle concentration (CMC), the C<sub>18</sub>PO<sub>m</sub>EO<sub>n</sub>COONa molecules adsorb at the solution-air interface and PMMA-solution interface, resulting in a decrease in  $\gamma_{LV}$ , hydrophobic alkyl chains facing the aqueous phase, and an increase in  $\gamma_{SL}$ . The  $\theta$  stays consistent at about 75° due to these two important considerations. When the concentration is greater than CMC, C<sub>18</sub>PO<sub>m</sub>EO<sub>n</sub>COONa molecules

收稿日期: 2023-01-05

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFA0708700)

第一作者: 赵 濂(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为胶体与界面科学。E-mail: zhaosui@mail.ipc.ac.cn

通信作者: 张 路(1969—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为胶体与界面科学。E-mail: luyiqiao@mail.ipc.ac.cn

form saturated adsorption films at both the solution-air and PMMA-solution interface, the interface adsorption parameters remain constant. As the level of concentration keeps increasing,  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  molecules continue adsorbing at the PMMA-solution interface and aggregate structure is formed through hydrophobic interaction. The hydrophilic group confronting the aqueous phase leads to a rapid decrease in  $\gamma_{SL}$  and  $\theta$ , the  $\theta$  of  $C_{18}PO_3EO_{15}COONa$  can be reduced to roughly  $43^\circ$ . The  $\gamma_{LV}$  at CMC and the  $\theta$  at high concentration gradually increase with the increase in the number of PO groups. However, the  $\gamma_{LV}$  and the  $\theta$  barely alter when the number of EO groups increases.

**Key words:** extendable surfactant; wettability; polymethyl methacrylate (PMMA); polyoxyisopropyl group (PO); polyoxyethylene group (EO)

润湿是固体与液体界面相互接触时产生的一种独特且重要的现象,在日常生活和工业生产中有着较为广泛的应用。例如去污洗涤<sup>[1]</sup>、农药喷洒<sup>[2-4]</sup>、浮选<sup>[5-6]</sup>、润滑和采油<sup>[7-9]</sup>等,均存在润湿现象。表面活性剂分子能通过固体-溶液界面和溶液-空气界面的吸附来影响固体表面的润湿性<sup>[9]</sup>,从而更好地对润湿现象加以应用。但表面活性剂溶液与固体表面之间的润湿机理因为涉及固体-溶液界面、固体-空气界面和溶液-空气界面而变得复杂<sup>[10-14]</sup>。利用杨式方程,可以通过溶液的表面张力和固体-溶液界面的接触角,计算得到黏附张力、黏附功等吸附参数,探索表面活性剂在固体表面的润湿吸附机理。

聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 固体表面因具有一CO、—OCH<sub>3</sub> 和—CH<sub>3</sub> 等官能团而表现为中性润湿的表面,不同类型的表面活性剂能通过氢键作用、极性相互作用或疏水相互作用等机制吸附在其表面上,从而改变固体表面的润湿性<sup>[15]</sup>。表面活性剂的类型、浓度和亲疏水官能团对 PMMA 表面的润湿改性有着较大影响。对于常规表面活性剂分子,如阳离子表面活性剂十二烷基三甲基溴化铵 CTAB<sup>[16]</sup>和十六烷基溴化吡啶 CPy<sup>[17]</sup>、阴离子表面活性剂月桂基硫酸钠 SDS<sup>[18]</sup>和 2-(4-氨基苯磺酰基)-5-氨基苯磺酰胺 SDDS<sup>[11]</sup>、非离子表面活性剂辛基苯基聚氧乙烯醚 (TX-100 和 TX-114<sup>[19-20]</sup>) 等在 PMMA-溶液界面的吸附机理均已有较为全面的研究。研究发现:随着体相浓度的升高,表面活性剂分子在溶液-空气界面的吸附量明显大于固体-溶液界面;在 PMMA 固体表面,表面活性剂分子能通过疏水相互作用形成亲水基朝向溶液的吸附层,从而增强固体表面的亲水性,接触角从  $74^\circ$  降低至  $53^\circ$ 。

相比于传统的表面活性剂,具有特殊结构的表面活性剂在 PMMA 固体表面的润湿性研究也得到了较多的关注。通过研究具有聚氧异丙烯基团 (PO) 的直链和支链延展型表面活性剂十二烷基-(聚氧异丙烯)<sub>4</sub>-硫酸钠 (L-C<sub>12</sub>PO<sub>4</sub>S<sup>[21]</sup> 和 G-C<sub>12</sub>PO<sub>4</sub>S<sup>[22]</sup>) 在 PMMA 表面的润湿性,发现浓度大于 CMC 时,延展型表面活性剂分

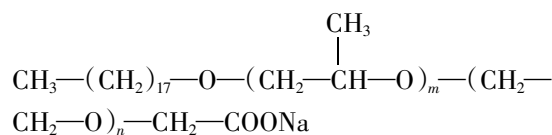
子容易在 PMMA-溶液界面形成聚集体,使接触角进一步降低,且直链型的表面活性剂分子有较强的亲水改性能力,而支链型的表面活性剂分子有较强的疏水改性能力。对于具有 EO 基团的延展型表面活性剂分子十六烷基-(聚氧乙烯)<sub>n</sub>-羧酸钠 (C<sub>16</sub>E<sub>n</sub>C)<sup>[23]</sup>,研究其在 PMMA 表面的润湿性后发现,C<sub>16</sub>E<sub>n</sub>C 分子通过极性相互作用吸附在 PMMA-溶液界面并形成双层结构,以此来降低接触角。而具有 EO 基团的两性离子表面活性剂十六烷基-(聚氧乙烯)<sub>3</sub>-羟丙基羧酸甜菜碱 (C<sub>16</sub>E<sub>3</sub>PB)<sup>[24]</sup> 在低浓度时能通过氢键相互作用吸附在 PMMA 表面;在高浓度时,表面活性剂分子通过 Lifshitz-van der Waals 作用吸附并形成聚集体,大幅度降低接触角。

对于仅含有 PO 基团或者 EO 基团的延展型表面活性剂的研究逐渐增多,但对于同时含有 PO 基团和 EO 基团的延展型表面活性剂在 PMMA 表面润湿性的研究相对较少。本文主要研究了实验室合成的延展型表面活性剂十八烷基-(聚氧异丙烯)<sub>m</sub>-(聚氧乙烯)<sub>n</sub>-羧酸钠 (C<sub>18</sub>PO<sub>m</sub>EO<sub>n</sub>COONa,  $m = 5, 10, 15$  和  $n = 5, 10, 15$ ) 在 PMMA 表面的润湿性。通过测试表面张力和接触角,计算得到黏附张力、黏附功和固液界面张力等吸附参数,综合分析并探索延展型表面活性剂分子在 PMMA-溶液界面的吸附机理,以期全面了解延展型表面活性剂中 PO 基团和 EO 基团对 PMMA 表面润湿性机理的影响提供依据。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料和设备

材料:PMMA,上海西格玛奥德里奇贸易有限公司产品;延展型表面活性剂饱和十八烷基-(聚氧异丙烯)<sub>m</sub>-(聚氧乙烯)<sub>n</sub>-羧酸钠 (C<sub>18</sub>PO<sub>m</sub>EO<sub>n</sub>COONa,  $m = 5, 10, 15$  和  $n = 5, 10, 15$ ),实验室自制<sup>[25]</sup>。分子结构为:



设备:DCAT21 型表面张力仪,德国 Dataphysics 公司产品;LAUDA Scientific GmbH 型接触角测量仪,德国 SurfaceMeter Machine 公司产品。

## 1.2 PMMA 固体表面预处理

PMMA 固体表面先经过机械抛光,用洗衣粉洗净,经大量水冲洗干净后烘干;再依次用蒸馏水、HCl 溶液(1:1)和超纯水清洗;最后在超纯水中超声清洗 30 min 后,用热风吹干固体表面,备用。

## 1.3 表面润湿性指标测试与计算

(1) 表面张力测定:在常压下,使用 DCAT21 型表面张力仪通过 Wilhelmy 平板法测试表面活性剂溶液的表面张力值。每次测量前将铂金片用超纯水清洗干净后在酒精火焰中灼烧,以彻底去除吸附在表面的杂质。所有浓度均连续测量 3 次,标准偏差不超过 0.5 mN/m,实验温度  $t$  为  $(27 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。

(2) 接触角测定:采用 LAUDA Scientific GmbH 型接触角测量仪,通过座滴法使进样器的注射针头形成 2  $\mu\text{L}$  的表面活性剂液滴,再与操作台上洁净的 PMMA 表面接触,通过摄像机拍摄液滴形状,经过软件处理,可得到不同浓度表面活性剂溶液在 PMMA 固体表面上形成的接触角  $\theta$ 。当液滴在 PMMA 表面平衡 60 s 后,立即测量并记录液滴两侧的接触角。在同一固体表面的其它部位重复测量多次,测试结果为 5 次测量的平均值,接触角值的标准偏差  $< 2^\circ$ 。

(3) 黏附张力、界面张力:通过杨式方程可知,在光滑且均质的固体表面<sup>[26-27]</sup>,固-液界面的黏附张力  $\gamma_{LV} \cos \theta$  与液-气界面的表面张力( $\gamma_{LV}$ )呈线性关系:

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_{LV} \cos \theta \quad (1)$$

$$a\gamma_{LV} + b = \gamma_{LV} \cos \theta \quad (2)$$

式中: $\gamma_{SV}$  为 PMMA 表面自由能(39.5 mN/m<sup>[28]</sup>); $\gamma_{LV}$  为溶液表面张力; $\gamma_{SL}$  为 PMMA-溶液界面张力值,可由式(1)计算获得; $a$  和  $b$  为常数,其中  $a$  由固体表面的性质决定。

(4) 饱和吸附量、饱和吸附面积:表面活性剂分子在界面上的吸附行为是影响表面张力、界面张力和接触角的主要因素之一。基于杨式方程和 Gibbs 方程, Lucassen-Reynders 提出了一个通过  $\gamma_{LV} \cos \theta$  和  $\gamma_{LV}$  分析表面活性剂分子在不同界面吸附行为的经验方程:

$$\frac{d(\gamma_{LV} \cos \theta)}{d\gamma_{LV}} = \frac{\Gamma_{SV} - \Gamma_{SL}}{\Gamma_{LV}} \quad (3)$$

$$\frac{\Gamma_{SL}}{\Gamma_{LV}} = |a| \quad (4)$$

式中: $\Gamma_{SV}$ 、 $\Gamma_{SL}$  和  $\Gamma_{LV}$  分别为不同界面上的饱和吸附量;因为延展型表面活性剂分子在 PMMA-空气界面没有吸附行为,所以  $\Gamma_{SV} = 0$ ;  $\Gamma_{SL}$  可由  $\gamma_{LV} \cos \theta - \gamma_{LV}$  曲

线斜率和  $\Gamma_{LV}$  计算得到。通过对表面张力随浓度变化曲线中 CMC 前的线性部分进行拟合,可以得到延展型表面活性剂的  $\Gamma_{SL}/\Gamma_{LV}$ 。最大饱和吸附量和最小饱和吸附面积  $A_{\min}$  通常作为描述表面活性剂分子在界面上吸附行为的参数,可由吉布斯吸附公式计算:

$$\Gamma_{\max} = - \left( \frac{1}{2.303nRT} \right) \left( \frac{d\gamma}{d \lg C} \right) \quad (5)$$

$$A_{\min} = \frac{1}{N_A \Gamma_{\max}} \times 10^{14} \quad (6)$$

式中: $\Gamma_{\max}$  为最大饱和吸附量 (mol/m<sup>2</sup>); $A_{\min}$  为最小饱和吸附面积(nm<sup>2</sup>); $\gamma$  为表面张力(mN/m); $C$  为表面活性剂浓度(mol/L); $R$  为常数(8.314 J/mol/K); $T$  为实验环境下的绝对温度(K); $N_A$  为阿伏伽德罗常数。

(5) 黏附功:黏附功是描述溶液从固体表面剥离难易程度的热力学参数,结合杨式方程,可以由  $\gamma_{LV} \cos \theta$  和  $\gamma_{LV}$  得到黏附功的计算方程:

$$W_A = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} + \gamma_{LV} = \gamma_{LV}(\cos \theta + 1) \quad (7)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 在溶液-空气界面的吸附

表面张力是影响 PMMA 表面润湿性的一个重要因素。浓度对延展型表面活性剂  $\text{C}_{18}\text{PO}_m\text{EO}_n\text{COONa}$  表面张力的影响如图 1 所示。

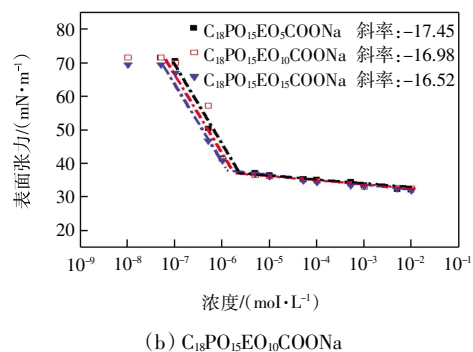
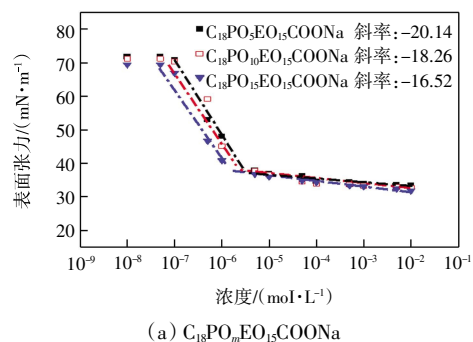


图 1 不同浓度条件下  $\text{C}_{18}\text{PO}_m\text{EO}_n\text{COONa}$  的表面张力  
Fig.1 Surface tension of  $\text{C}_{18}\text{PO}_m\text{EO}_n\text{COONa}$  with different concentrations

由图 1 可知,随着体相浓度的升高, $\gamma_{LV}$  逐渐降低,表面活性剂浓度小于临界胶束浓度(CMC)时, $\gamma_{LV}$ -浓度曲线呈线性变化;达到 CMC 后,表面张力几乎不发生变化。

不同结构延展型表面活性剂的 CMC、CMC 时的表面张力  $\gamma_{CMC}$  和  $A_{min}$  等吸附参数如表 1 所示。

表 1  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  的 CMC、 $\gamma_{CMC}$  和  $A_{min}$

Tab.1 CMC,  $\gamma_{CMC}$  and  $A_{min}$  of  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$

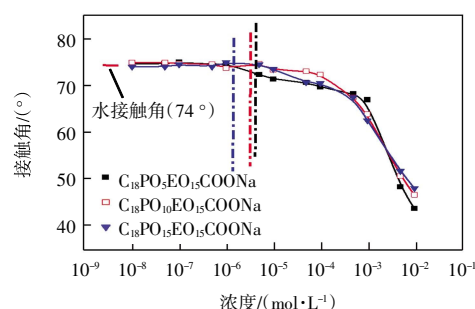
延展型表面活性剂	分子式	CMC/ ( $10^{-5}$ mol·L <sup>-1</sup> )	$\gamma_{CMC}/$ (mN· m <sup>-1</sup> )	$A_{min}/$ nm <sup>2</sup>
$C_{18}PO_3EO_{15}COONa$	$C_{18}H_{37}O(PO)_5(EO)_{15}CH_2COONa$	0.45	36.25	0.94
$C_{18}PO_{10}EO_{15}COONa$	$C_{18}H_{37}O(PO)_{10}(EO)_{15}CH_2COONa$	0.32	37.22	1.04
$C_{18}PO_{15}EO_5COONa$	$C_{18}H_{37}O(PO)_{15}(EO)_5CH_2COONa$	0.34	37.97	1.09
$C_{18}PO_{15}EO_{10}COONa$	$C_{18}H_{37}O(PO)_{15}(EO)_{10}CH_2COONa$	0.26	38.32	1.12
$C_{18}PO_{15}EO_{15}COONa$	$C_{18}H_{37}O(PO)_{15}(EO)_{15}CH_2COONa$	0.13	38.87	1.16

由表 1 可知, $C_{18}PO_{15}EO_nCOONa$  分子中,随着 EO 基团数量的增加,CMC 逐渐降低,而  $A_{min}$  逐渐升高; $C_{18}PO_mEO_{15}COONa$  分子中,随着 PO 基团数量的增多,CMC 也逐渐降低,且  $A_{min}$  逐渐升高。 $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子中 EO 基团和 PO 基团数量变化对 CMC 和  $A_{min}$  的影响与文献[29-31]中报道的一致。当 PO 基团数量固定为 15 时,随着 EO 基团数目的升高, $C_{18}PO_{15}EO_nCOONa$  分子的亲水性增强,并且在溶液表面吸附时的空间阻碍增强,表现为饱和吸附面积增大和 CMC 时的表面张力升高;当 EO 基团数量固定为 15 时,随着 PO 基团数目的升高, $C_{18}PO_mEO_{15}COONa$  分子的亲油性增强,有利于其在溶液表面的吸附,但长 PO 链产生的空间阻碍作用导致饱和吸附面积的增大和 CMC 时的表面张力升高。PO 基团数目的增加导致整个分子的疏水性增强,CMC 降低是合理的结果;有趣的是,随着 EO 基团链长的增加,分子亲水性增强,却同样造成 CMC 降低。这是因为弱极性的 EO 基团紧靠着阴离子头,离子头的部分负电荷会分散在 EO 链上,削弱分子间的静电斥力,从而使表面活性剂分子在体相中更容易发生聚集。EO 基团这种分散离子头电荷的作用,也是延展型表面活性剂抗盐能力的来源。

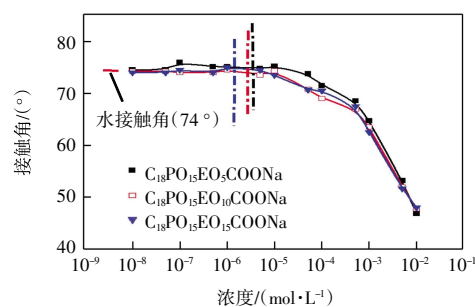
## 2.2 在 PMMA 表面的接触角

浓度对  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  溶液在 PMMA 表面接触角的影响如图 2 所示。

对于传统的表面活性剂如 SDS、CTAB 和 TX-100<sup>[32-33]</sup>,接触角随着浓度的升高逐渐减小,当浓度大于 CMC 后,接触角达到平台值并保持不变。而对于延展型表面活性剂  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  而言,由图 2 可知,浓度小于 CMC 时,接触角随着浓度的变化较小,浓度



(a)  $C_{18}PO_mEO_{15}COONa$



(b)  $C_{18}PO_{15}EO_mCOONa$

图 2 不同浓度的  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  溶液在 PMMA 表面的接触角

Fig.2 Contact angle of  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  solutions with different concentrations at surface of PMMA

大于 CMC 时,接触角开始随着浓度的升高逐渐降低,在高浓度时,接触角发生骤降。高浓度时,随着 PO 基团数量的升高,5 种延展型表面活性剂接触角逐渐增大;随着 EO 基团数量的升高,接触角的变化可忽略不计。由此说明,延展型表面活性剂因为具有不同数量的 PO 基团和 EO 基团而表现出与传统表面活性剂不同的接触角变化趋势。结合图 1 可知,体相中的表面活性分子在溶液-空气界面吸附并在 CMC 后达到饱和和吸附,表面张力值不发生变化;而接触角随着浓度的升高继续降低。这暗示着体相中的表面活性剂分子会继续在 PMMA 表面吸附,从而影响接触角的变化,因此,需要通过其它吸附参数进行分析才能得出表面活性剂分子在 PMMA 表面的吸附机理。

## 2.3 在 PMMA-溶液界面的黏附张力

图 3 为实验浓度范围内  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  溶液在 PMMA-溶液界面的黏附张力  $\gamma_{LV}\cos\theta$  随  $\gamma_{LV}$  的变化曲线。

由图 3 可以看出, $\gamma_{LV}\cos\theta$  随着  $\gamma_{LV}$  的降低而逐渐减小;当表面活性剂分子在气-液界面吸附饱和后, $\gamma_{LV}$  达到平台值几乎不发生变化,而  $\gamma_{LV}\cos\theta$  发生陡增。这表明  $\gamma_{LV}$  较高时, $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子吸附在溶液-空气界面的同时也在 PMMA-溶液界面进行吸附;随

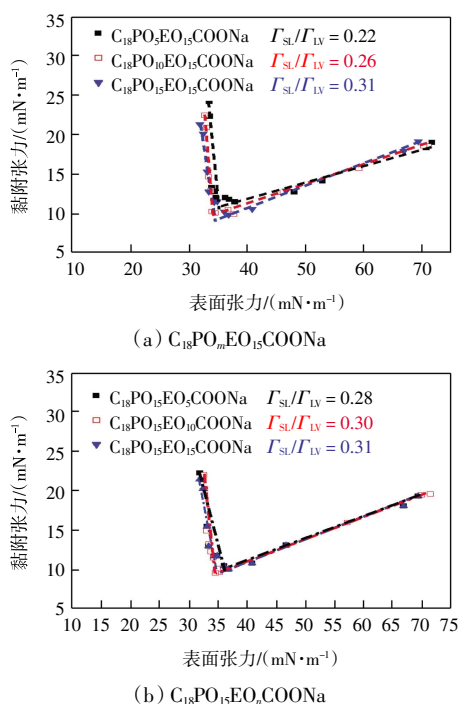


图 3  $C_{18}P_mE_nCOONa$  黏附张力随表面张力的变化曲线  
Fig.3 Variation of adhesion tension of  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  solutions with surface tension

着  $\gamma_{LV}$  逐渐降低,在达到 CMC 后, $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子继续在 PMMA-溶液界面吸附并对  $\gamma_{LV} \cos \theta$  产生较大的影响。

表 2 为不同类型表面活性剂的  $\Gamma_{SL} - \Gamma_{LV}$  和理论最小吸附面积  $A_{min,t}$

表 2 不同结构表面活性剂在 CMC 之前的  $\Gamma_{SL}/\Gamma_{LV}$  和  $A_{min,t}$   
Tab.2 Slops ( $\Gamma_{SL}/\Gamma_{LV}$ ) and  $A_{min,t}$  of several surfactants before CMC

表面活性剂	分子式	$\Gamma_{SL}/\Gamma_{LV}$	$A_{min,t}/nm^2$
$C_{18}PO_3EO_{15}COONa$	$C_{18}H_{37}O(PO)_3(EO)_{15}CH_2COONa$	0.22	4.27
$C_{18}PO_{10}EO_{15}COONa$	$C_{18}H_{37}O(PO)_{10}(EO)_{15}CH_2COONa$	0.26	4.00
$C_{18}PO_{15}EO_5COONa$	$C_{18}H_{37}O(PO)_{15}(EO)_5CH_2COONa$	0.28	3.89
$C_{18}PO_{15}EO_{10}COONa$	$C_{18}H_{37}O(PO)_{15}(EO)_{10}CH_2COONa$	0.30	3.73
$C_{18}PO_{15}EO_{15}COONa$	$C_{18}H_{37}O(PO)_{15}(EO)_{15}CH_2COONa$	0.31	3.70
AOT <sup>[34]</sup>	$C_{20}H_{37}NaO_2S$	-0.10	
$C_{12}$ (EDMAB) <sup>[35]</sup>	$CH_3(CH_2)_{11}[(CH_3)_2N^+(CH_2C_6H_5)]Br^-$	-0.30	
BDDAB <sup>[35]</sup>	$C_{26}H_{56}BrN$	-0.31	
CTAB+CPyB <sup>[16]</sup>	$C_{16}H_{33}(CH_3)_3NBr + C_{21}H_{38}BrN$	-0.34	
CTAB <sup>[16]</sup>	$C_{16}H_{33}(CH_3)_3NBr$	-0.34	

注:AOT 为二辛基磺基琥珀酸钠; $C_{12}$ (EDMAB)为十二烷基二甲基苄基氯化铵;BDDAB 为双十二烷基二甲基溴化铵;CTAB+CPyB 为十六烷基三甲基溴化铵+十六烷基吡啶盐溴化物;CTAB 为十六烷基三甲基溴化铵。

不同于亲水的高能石英表面<sup>[10]</sup>和疏水的低能PTFE 表面<sup>[36]</sup>,PMMA 作为中等能量表面,具有亲水和疏水基团的表面活性剂分子在 PMMA-溶液界面有着不同的

吸附行为。由表 2 可知,对于常规表面活性剂分子,其疏水部分通过疏水相互作用吸附在 PMMA-溶液界面,亲水离子头朝向溶液中,PMMA 表面被亲水改性。随着浓度的升高, $\gamma_{LV}$  逐渐降低而  $\gamma_{LV} \cos \theta$  逐渐升高,导致斜率( $\Gamma_{SL}/\Gamma_{LV}$ )呈现负值。与常规表面活性剂不同,延展型表面活性剂分子  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  同时具有疏水基团(PO)和亲水基团(EO),在 CMC 之前,EO 基团容易通过极性相互作用吸附在中性的 PMMA 表面,此时, $\gamma_{LV}$  和  $\gamma_{LV} \cos \theta$  随着浓度的升高而逐渐降低,斜率( $\Gamma_{SL}/\Gamma_{LV}$ )呈现正值<sup>[22]</sup>,且绝对值均小于 1,这意味着  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子在溶液-空气界面的吸附量大于 PMMA-溶液界面的吸附量。需要注意的是, $\Gamma_{SL}/\Gamma_{LV}$  随着 PO 和 EO 基团数量的增多而逐渐增大,且 PO 基团数量的增多对于  $\Gamma_{SL}/\Gamma_{LV}$  的影响明显比 EO 基团的影响大。

### 2.4 在溶液-PMMA 界面的界面张力

固液界面张力  $\gamma_{SL}$  是影响 PMMA 表面润湿性的重要因素,充分了解浓度对  $\gamma_{SL}$  的影响显得尤为必要。通过杨氏方程计算  $\gamma_{SL}$ ,可得浓度对  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  溶液-PMMA 界面张力的影响,结果如图 4 所示。

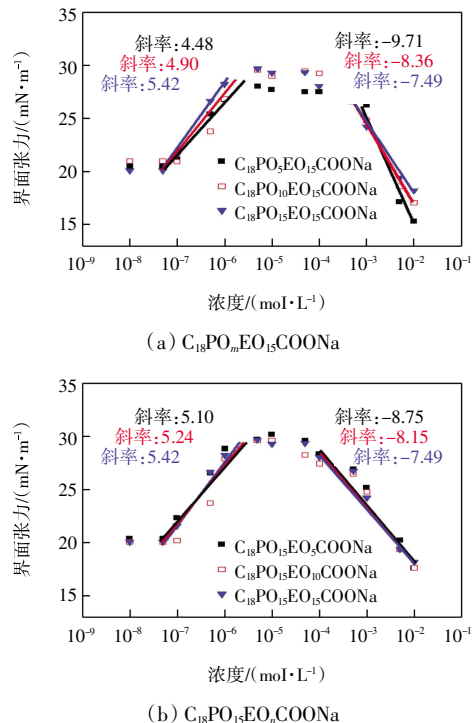


图 4  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  浓度对溶液-PMMA 界面张力的影响  
Fig.4 Effect of  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  concentration on solutions-PMMA interfacial tensions

由图 4 可知,在整个实验浓度范围内,界面张力随着浓度的升高先逐渐增大,在 CMC 附近维持一个

短暂的平台值,然后随浓度升高明显降低。浓度小于 CMC 时, $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子的 EO 基团通过极性作用少量吸附在 PMMA-溶液界面,疏水尾链翘起,中性润湿的 PMMA 表面逐渐疏水改性, $\gamma_{SL}$  随着浓度的升高逐渐增大;在 CMC 附近, $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子在 PMMA-溶液界面形成饱和吸附,体相中的表面活性剂分子开始形成胶团状的聚集体,此时  $\gamma_{SL}$  达到最大值并形成短暂的平台区域;浓度大于 CMC 时,体相中的  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子通过疏水相互作用继续吸附在 PMMA-溶液界面并形成聚集体,亲水头基朝向水相,将轻微疏水化的 PMMA 表面逐渐亲水改性, $\gamma_{SL}$  随着浓度的升高发生陡降。

通过对  $\gamma_{SL}$  随浓度变化的 2 个阶段进行线性拟合,分别得到 CMC 前后表面活性剂的  $\gamma_{SL}$  随浓度变化曲线的斜率,并计算得到不同表面活性剂分子在 PMMA-溶液界面的饱和吸附量和饱和吸附面积,如表 3 所示。

表 3  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  在 PMMA-溶液界面的吸附参数  
Tab.3 Interfacial adsorption parameters of  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  on PMMA-solutions interfacial tensions

表面活性剂	$\Gamma_a/(\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2})$	$A_a/\text{nm}^2$	$\Gamma_b/(\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2})$	$A_b/\text{nm}^2$
$C_{18}PO_3EO_{15}COONa$	0.39	4.23	0.85	1.95
$C_{18}PO_{10}EO_{15}COONa$	0.43	3.87	0.73	2.27
$C_{18}PO_{15}EO_5COONa$	0.45	3.72	0.77	2.17
$C_{18}PO_{15}EO_{10}COONa$	0.46	3.62	0.71	2.33
$C_{18}PO_{15}EO_{15}COONa$	0.47	3.51	0.66	2.53

注: $\Gamma_a, A_a$  分别为表面活性剂浓度小于 CMC 时在 PMMA-溶液界面的饱和吸附量、饱和吸附面积; $\Gamma_b, A_b$  分别为表面活性剂浓度大于 CMC 时在 PMMA-溶液界面的饱和吸附量、饱和吸附面积。

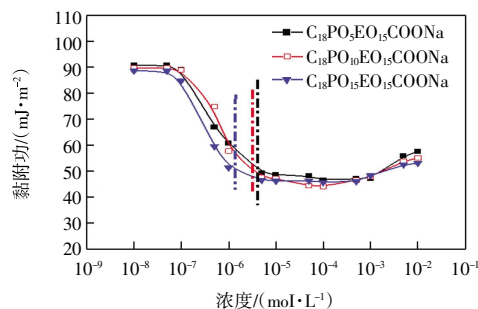
在之前的研究<sup>[23]</sup>中发现,在 CMC 前后,具有 EO 基团的延展型表面活性剂  $C_{16}EO_nC$  在 PMMA-溶液界面的饱和吸附面积近似相等,在 PMMA-溶液界面形成饱和吸附之后通过疏水相互作用形成双层结构的聚集体。而对于具有 PO 基团的延展型表面活性剂  $L-C_{12}PO_4S$  和  $S-C_{12}PO_4S$  等,在 CMC 之前的饱和吸附面积为 CMC 之后的 2~3 倍,表面活性剂分子通过疏水相互作用在界面形成聚集体<sup>[21-22]</sup>,将中性的 PMMA 表面亲水改性。

由图 4 和表 3 可知, $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子在 CMC 之后继续吸附在 PMMA-溶液界面,且饱和吸附量明显大于 CMC 前的吸附量,暗示随着浓度的升高,大于 CMC 后, $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子在界面形成了聚集体。在高浓度时,界面张力值随着 PO 基团和 EO 基团数量的升高而逐渐增大,且 PO 数量的升高对界面张力的影

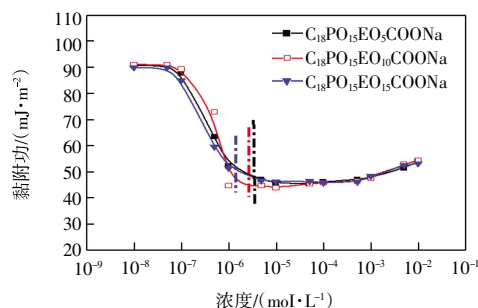
响明显大于 EO 基团对界面张力的影响;而在 CMC 附近,界面张力形成的平台现象随着 EO 基团数量的升高变得明显,这可能是因为 PO 基团的空间位阻和 EO 基团减弱离子头静电斥力所导致的结果。

## 2.5 在 PMMA-溶液界面的黏附功

浓度对延展型表面活性剂黏附功的影响如图 5 所示。



(a)  $C_{18}PO_mEO_{15}COONa$



(b)  $C_{18}PO_{15}EO_nCOONa$

图 5  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  溶液的黏附功随浓度的变化曲线  
Fig.5 Adhesion works of  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  solutions varies as function of concentration

由图 5 可知,在低浓度时, $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子在界面上的吸附量较小, $\gamma_{LV} \cos \theta$  和  $\gamma_{LV}$  变化较小,黏附功不变;随着浓度的升高,在 CMC 之前,体相中的  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子在溶液-空气界面和 PMMA-溶液界面吸附量增大, $\gamma_{LV} \cos \theta$  和  $\gamma_{LV}$  逐渐降低,此时黏附功的变化表现为两者共同作用的结果,迅速降低;在 CMC 附近, $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子在溶液-空气界面和 PMMA-溶液界面形成饱和吸附,黏附功再度达到平台值;而进一步增大浓度, $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子在 PMMA-溶液界面上大量吸附并形成聚集体,此时黏附功以  $\gamma_{LV} \cos \theta$  为主导,随着  $\gamma_{LV} \cos \theta$  的增大而逐渐升高。值得注意的是,高浓度时,随着 PO 基团数量的增多,黏附功逐渐降低;而 EO 数量的变化对黏附功的影响较小。

## 2.6 在 PMMA-溶液界面的吸附机理

综上所述,不同结构  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子在 PMMA-溶液界面的吸附机理是一致的。因此,以

$C_{18}PO_{10}EO_{15}COONa$  分子为代表,综合讨论其接触角、表面张力和 PMMA-溶液界面张力随浓度的变化规律,阐明其吸附机制。

图 6 为浓度对  $C_{18}PO_{10}EO_{15}COONa$  在 PMMA-溶液界面和溶液表面  $\theta$ 、 $\gamma_{LV}$  和  $\gamma_{SL}$  的影响趋势。

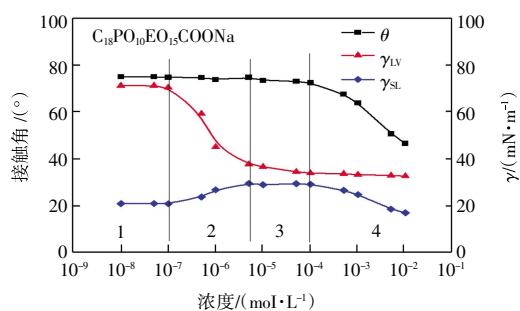


图 6 浓度对  $C_{18}PO_{10}EO_{15}COONa$  在 PMMA-溶液界面吸附参数的影响

Fig.6 Effect of concentration of  $C_{18}PO_{10}EO_{15}COONa$  on adhesion data at PMMA-solution interface

由图 6 可以看出,整个吸附过程分为 4 个阶段:

(1) 第 1 阶段 [ $10^{-8} \sim 10^{-7}$  mol/L], 浓度较低,  $C_{18}PO_{10}EO_{15}COONa$  分子在溶液-空气界面和 PMMA-溶液界面吸附量小, 吸附参数几乎不发生变化。

(2) 第 2 阶段 [ $10^{-7} \sim CMC$ ], 随着浓度的逐渐升高,  $C_{18}PO_{10}EO_{15}COONa$  分子在界面上的吸附量增大, 发生不饱和吸附, PMMA 表面逐渐被轻微疏水化, 表现为  $\gamma_{LV}$  降低而  $\gamma_{SL}$  增大。此时接触角应该随着  $\gamma_{LV}$  的降低而逐渐减小, 随着  $\gamma_{SL}$  的升高而逐渐增大, 两者共同作用导致接触角变化较小。

(3) 第 3 阶段 [ $CMC \sim 10^{-4}$  mol/L], 当浓度大于 CMC 时,  $C_{18}PO_{10}EO_{15}COONa$  分子在溶液-空气界面和 PMMA-溶液界面的吸附量达到最大并形成饱和吸附。此时  $\gamma_{LV}$  和  $\gamma_{SL}$  均达到平台值, 接触角几乎不变。

(4) 第 4 阶段 [ $10^{-4} \sim 10^{-2}$  mol/L],  $C_{18}PO_{10}EO_{15}COONa$  分子通过疏水相互作用形成聚集体, 使中性润湿的 PMMA 表面逐渐亲水改性。此时  $\gamma_{LV}$  保持不变而  $\gamma_{SL}$  降低, 表现为接触角急剧减小。

### 3 结论

本文研究含有不同数量 PO 基团和 EO 基团的延展型表面活性剂  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  对 PMMA 表面润湿性的影响, 通过表面张力和接触角测量, 计算得到黏附张力、固液界面张力和黏附功等吸附参数, 阐释表面活性剂分子在 PMMA-溶液界面的吸附机理。结果表明:

(1) 浓度在 CMC 之前,  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子同时在 PMMA-溶液界面和溶液-空气界面上吸附, PMMA 表面被轻微疏水改性, 接触角在表面张力和固液界面张力的作用下保持不变; 此时表面黏附张力和表面张力呈线性关系, 且  $\Gamma_{SL}/\Gamma_{LV} < 1$ , 分子在溶液-空气界面的吸附量明显大于 PMMA-溶液界面的吸附量。

(2) 浓度在 CMC 之后,  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子在溶液-空气界面和 PMMA-溶液界面达到饱和吸附, 表面张力、固液界面张力和接触角均暂时保持不变。

(3) 浓度进一步升高, EO 基团对带电离子头的静电斥力有抑制作用,  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  分子通过疏水相互作用在 PMMA-溶液界面形成聚集体, PMMA 表面被明显亲水改性, 接触角进一步降低。

(4) 对于中性润湿的 PMMA 表面, 由于 PO 基团相比于 EO 基团有较大的空间位阻, 当浓度达到 CMC 时,  $C_{18}PO_mEO_nCOONa$  的表面张力值和高浓度时的接触角随着 PO 基团数量的增多逐渐升高; 而 EO 基团数量的增多对吸附参数的影响较小。

### 参考文献:

- [1] LUO S Q, CHEN Z D, DONG Z C, et al. Uniform spread of high-speed drops on superhydrophobic surface by live-oligomeric surfactant jamming[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(41): 1904475.
- [2] RAO D N. Fluid-fluid and solid-fluid interfacial interactions in petroleum reservoirs[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2001, 19(1/2): 157-188.
- [3] NEWCOMBE G, RALSTON J. Wetting dynamics studies on silica surfaces of varied hydrophobicity[J]. *Langmuir*, 1992, 8(1): 190-196.
- [4] MENNELLA A, MORROW N R, XIE X N. Application of the dynamic Wilhelmy plate to identification of slippage at a liquid-liquid-solid three-phase line of contact[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1995, 13(3/4): 179-192.
- [5] GHARABAGHI M, AGHAZADEH S. A review of the role of wetting and spreading phenomena on the flotation practice[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2014, 19(4): 266-282.
- [6] CHWASTIAK S. Calculation of contact angles from surfactant adsorption isotherms[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, 339(1): 196-201.
- [7] ZDZIENICKA A, JAŃCZUK B, WÓJCIK W. Wettability of polytetrafluoroethylene by aqueous solutions of two anionic surfactant mixtures[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, 268(1): 200-207.
- [8] LI R, MANICA R, LU Y, et al. Role of surfactants in spontaneous displacement of high viscosity oil droplets from solid sur-

- faces in aqueous solutions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 579: 898–908.
- [9] 胡渤,刘丹丹,徐志成,等. 石英表面阳离子吸附膜结构的 AFM 研究. *天津工业大学学报*, 2021, 40(1): 42–47.  
HU B, LIU D D, XU Z C, et al. Study on structure of adsorbed cationic surfactant film on quartz surface by AFM[J]. *Journal of Tiangong University*, 2021, 40(1): 42–47 (in Chinese).
- [10] WANG Z L, LI Z Q, ZHANG L, et al. Wettability of a quartz surface in the presence of four cationic surfactants[J]. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2010, 26(24): 18834–18840.
- [11] ZDZIENNICKA A, JAŃCZUK B. The relationship between the adhesion work, the wettability and composition of the surface layer in the systems polymer/aqueous solution of anionic surfactants and alcohol mixtures[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 257(3): 1034–1042.
- [12] SZYMCZYK K. Wettability of polymeric solids by ternary mixtures composed of hydrocarbon and fluorocarbon nonionic surfactants[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, 363(1): 223–231.
- [13] ZDZIENNICKA A, JAŃCZUK B. Wettability of quartz by aqueous solution of cationic surfactants and short chain alcohols mixtures[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2010, 124(1): 569–574.
- [14] BISWAL N R, PARIJA S. Wetting of PTFE and glass surfaces by aqueous solutions of cationic and anionic double-chain surfactants[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(30): 10172–10178.
- [15] 赵滢,江琴,杜悦春,等. 支链化延展型阴离子表面活性剂在聚甲基丙烯酸甲酯表面的吸附行为[J]. *天津工业大学学报*, 2022, 41(1): 39–46.  
ZHAO S, JIANG Q, DU Y C, et al. Adsorption behavior of branched extended anionic surfactants on polymethylmethacrylate surface[J]. *Journal of Tiangong University*, 2022, 41(1): 39–46 (in Chinese).
- [16] SZYMCZYK K, ZDZIENNICKA A, JAŃCZUK B, et al. The wettability of polytetrafluoroethylene and polymethyl methacrylate by aqueous solution of two cationic surfactants mixture[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 293(1): 172–180.
- [17] ZDZIENNICKA A, JAŃCZUK B. Behavior of cationic surfactants and short chain alcohols in mixed surface layers at water-air and polymer-water interfaces with regard to polymer wettability I: Adsorption at water-air interface[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, 349(1): 374–383.
- [18] SZYMCZYK K, JAŃCZUK B. Wettability of polymeric solids by aqueous solutions of anionic and nonionic surfactant mixtures[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2011, 25(19): 2641–2657.
- [19] ZDZIENNICKA A. The wettability of polytetrafluoroethylene and polymethylmethacrylate by aqueous solutions of Triton X-100 and propanol mixtures[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(6): 3801–3810.
- [20] KRAWCZYK J, SZYMCZYK K, ZDZIENNICKA A, et al. Wettability of polymers by aqueous solution of binary surfactants mixture with regard to adhesion in polymer-solution system II: Critical surface tension of polymers wetting and work of adhesion[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2013, 45: 106–111.
- [21] JIANG Q, DU Y C, ZHANG L, et al. Wettability of a polymethylmethacrylate surface by extended anionic surfactants: Effect of branched chains[J]. *Molecules*, 2021, 26(4): 863.
- [22] DU Y C, ZHOU Z H, GAO M, et al. Adsorption and wettability of extended anionic surfactants with different PO numbers on a polymethylmethacrylate surface[J]. *Soft Matter*, 2021, 17(26): 6426–6434.
- [23] CHEN X F, XU Z C, GONG Q T, et al. Adsorption of extended anionic surfactants at the water-polymethylmethacrylate interface: The effect of polyoxyethylene groups [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 656: 130395.
- [24] LIU D D, XU Z C, ZHAO Q, et al. Adsorption behavior of cationic and zwitterionic surfactants on Poly(methyl methacrylate)[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2013, 29(3): 569–575.
- [25] FERNÁNDEZ A, SCORZZA C, USUBILLAGA A, et al. Synthesis of new extended surfactants containing a carboxylate or sulfate polar group[J]. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2005, 8(2): 187–191.
- [26] BARGEMAN D, VAN VOORST VADER F. Effect of surfactants on contact angles at nonpolar solids[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1973, 42(3): 467–472.
- [27] ECKMANN D M, CAVANAGH D P, BRANGER A B. Wetting characteristics of aqueous surfactant-laden drops[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2001, 242(2): 386–394.
- [28] FAN R J, ZHANG X X, ZHOU L, et al. Research on the wettability of peach leaf surfaces by OWRK method[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2011, 13(1): 79–83.
- [29] WU Z, LI Y L, LI J, et al. Interaction and properties of the synthesized anionic surfactant with CTAB: An experimental and theoretical investigation[J]. *Chemistry Select*, 2020, 5(5): 1663–1670.
- [30] LIU K X, YIN H J, ZHANG L, et al. Effect of EO group on the interfacial dilational rheology of fatty acid methyl ester solutions[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 553: 11–19.
- [31] LIN L H, LAI Y C, CHEN K M, et al. Oxyethylene chain

- 分析及治理方案[J]. 中国稀土学报, 2021, 39(2): 218-231.
- GUO M, WU H L, LUO Z S. Ecological environment analysis and treatment scheme of ion adsorption rare earth ore mineral area[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2021, 39(2): 218-231 (in Chinese).
- [16] 李永绣. 离子吸附型稀土资源与绿色提取[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- LI Y X. Ion Adsorption Rare Earth Resources and Their Green Extraction[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014 (in Chinese).
- [17] SOHN H Y, WADSWORTH M E. Rate Processes of Extractive Metallurgy[M]. New York: Springer, 2012.
- [18] NIE W R, ZHANG R, HE Z Y, et al. Research progress on leaching technology and theory of weathered crust elution-deposited rare earth ore[J]. Hydrometallurgy, 2020, 193: 105295.
- [19] LI M, ZHANG X W, LIU Z G, et al. Kinetics of leaching fluoride from mixed rare earth concentrate with hydrochloric acid and aluminum chloride[J]. Hydrometallurgy, 2013, 140: 71-76.
- [20] KANDIL A T, ALY M M, MOUSSA E M, et al. Column leaching of lanthanides from Abu Tartur phosphate ore with kinetic study[J]. Journal of Rare Earths, 2010, 28(4): 576-580.
- [21] PARHI P K, PARK K H, SENANAYAKE G. A kinetic study on hydrochloric acid leaching of nickel from Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> spent catalyst[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2013, 19(2): 589-594.
- [22] DA SILVA I J, DE VEREDAS V, CARPES M J S, et al. Chromatographic separation of bupivacaine enantiomers by HPLC: Parameters estimation of equilibrium and mass transfer under linear conditions[J]. Adsorption, 2005, 11(2): 123-129.
- [23] DAI C Z, XIANG Z Y. Research into character of chromatographic eluting curve by plate theory[J]. Acta Chimica Sinica, 1994, 52: 64-70.
- [24] FEDOTOV P S, STATKUS M A, TSIZIN G I. Study of the mass transfer of elements in their dynamic leaching from soils and bottom sediments[J]. Journal of Analytical Chemistry, 2007, 62(8): 721-725.
- [25] KIM S E, THAI H T, LEE J. Buckling analysis of plates using the two variable refined plate theory[J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(4): 455-462.

#### 本文引文格式:

冯健, 吴晓燕, 薛永萍, 等. 基于草酸沉淀稀土母液直接复用工艺的风化壳淋积型稀土矿浸取[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(3): 40-49.

FENG J, WU X Y, XUE Y P, et al. Leaching process of weathered crust elution-deposited rare earth ore based on direct reuse of oxalic acid precipitated rare earth mother liquor[J]. Journal of Tiangong University, 2024, 43(3): 40-49 (in Chinese).

(上接第39页)

- length affects the physicochemical properties of sugar-based anionic surfactants with phosphates groups[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2015, 485: 118-124.
- [32] SZYMCZYK K, JAŃCZUK B. The wettability of polytetrafluoroethylene by aqueous solution of cetyltrimethylammonium bromide and Triton X-100 mixtures[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 303(1): 319-325.
- [33] CHAUDHURI R G, PARIJA S. Dynamic contact angles on PTFE surface by aqueous surfactants solution in absence and presence of electrolytes[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 337(2): 555-562.
- [34] HARKOT J, JAŃCZUK B. The role of adsorption of sodium bis(2-ethylhexyl) sulfosuccinate in wetting of glass and poly(methyl methacrylate) surface[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(9): 2825-2830.
- [35] HARKOT J, JAŃCZUK B. The role of adsorption of dodecylethyldimethylammonium bromide and benzyldimethyldodecylammonium bromide surfactants in wetting of polytetrafluoroethylene and poly(methyl methacrylate) surfaces[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(6): 3623-3628.
- [36] DU Y C, ZHANG Q, ZHU Y Y, et al. Adsorption of extended surfactants at the water-PTFE interface: The effect of PO number[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 348: 118465.

#### 本文引文格式:

赵滩, 陈兴锋, 张磊, 等. 含聚醚基团阴离子表面活性剂对 PMMA 表面润湿性的影响[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(3): 32-39, 49.

ZHAO S, CHEN X F, ZHANG L, et al. Effects of anionic surfactants containing polyether group on wettability of polymethyl methacrylate surface[J]. Journal of Tiangong University, 2024, 43(3): 32-39, 49 (in Chinese).