

# 酰胺基羧酸盐型 Gemini 表面活性剂的合成与性能

金礼俊<sup>1,2</sup>, 唐善法<sup>1,2\*</sup>, 崔琰奇<sup>1,2</sup>, 胡睿智<sup>1,2</sup>, 郑雅慧<sup>1,2</sup>

(1. 长江大学石油工程学院, 湖北 武汉 430100;  
2. 长江大学非常规油气湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430100)

**摘要:**以对苯二胺、棕榈酰氯、氯乙酸钠等为主要原料, 经取代和酰化反应合成了具有新型结构的酰胺基 Gemini 羧酸盐型表面活性剂 DC16-P-16。通过 FT-IR 和 <sup>1</sup>H NMR 对中间体和目标产物进行结构表征, 并对其表/界面活性、增黏性、泡沫性能以及乳化性能进行测定。结果表明, DC16-P-16 具有比传统表面活性剂低 1~2 个数量级的临界胶束浓度 ( $3.16 \times 10^{-4}$  mol/L), 表面张力为 31.36 mN/m; 0.5% DC16-P-16 可将油/水界面张力降低至超低界面水平 ( $8.52 \times 10^{-3}$  mN/m); 65℃ 下, 0.5% DC16-P-16 在低剪切速率时黏度为 3.95 mPa·s, 有较好增黏性; 泡沫性能和乳化性能测试结果表明, 0.1% DC16-P-16 溶液起泡高度为 31.2 cm, 稳泡性接近于 100%; DC16-P-16 乳化系统中, 油水分离时间达到 735 s, 在相同条件下与十六烷基羧酸钠相比具有很好的泡沫性能和乳化性能。

**关键词:** 表面活性剂; 表面张力; 油/水界面张力; 应用性能

**中图分类号:** TH3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2019)08-0115-05

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2019.08.024

## Synthesis and properties of carboxylate gemini surfactants with amide groups

JIN Li-jun<sup>1,2</sup>, TANG Shan-fa<sup>1,2\*</sup>, CUI Yan-qi<sup>1,2</sup>, HU Rui-zhi<sup>1,2</sup>, ZHENG Ya-hui<sup>1,2</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 430100, China;  
2. Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

**Abstract:** Amide-based Gemini carboxylate surfactant DC16-P-16 with novel structure is synthesized by substitution and acylation reactions with *p*-phenylenediamine, palmitoyl chloride and sodium chloroacetate as main raw materials. The intermediates and target products are characterized by FT-IR and <sup>1</sup>H NMR, and their surface/interface activity, viscosity increasing performance, foaming properties and emulsifying properties are determined. The results show that DC16-P-16 has a critical micelle concentration (cmc of  $3.16 \times 10^{-4}$  mol·L<sup>-1</sup>), which is 1-2 orders of magnitude lower than that of traditional surfactant, and its surface tension ( $\gamma_{cmc}$ ) is 31.36 mN·m; 0.5% DC16-P-16 can reduce the oil/water interfacial tension to an ultra-low interface level ( $8.52 \times 10^{-3}$  mN/m); At 65℃, the viscosity of 0.5% DC16-P-16 is 3.95 mPa·s at a low shear rate ( $7 \text{ s}^{-1}$ ), representing a good viscosity increasing performance. Tests for foaming properties and emulsifying properties show that the foaming height of 0.1% DC16-P-16 solution is 31.2 cm, and the foam stability is close to 100%. In a DC16-P-16 emulsification system, the oil-water separation time reaches 735 s. Under the same conditions, DC16-P-16 has better foaming properties and emulsifying properties compared with sodium cetyl carboxylate.

**Key words:** surfactant; surface tension; oil/water interfacial tension; application performance

Gemini 表面活性剂由于其独特的分子结构具有比传统表面活性剂更高表/界面活性、更低 Krafft 点、更易聚集成胶束等<sup>[1]</sup>, 成为当前胶体与界面化学的研究热点<sup>[2]</sup>。而绿色表面活性剂已逐渐成为当今表面活性剂的发展趋势。研究表明, 含有酰胺官能团的 Gemini 表面活性剂因酰胺官能团的引入, 具有很好的生物降解性、温和性和热稳定性, 是国内外近年来的研究热点<sup>[3]</sup>。目前, 国内合成酰胺型双子表面活性剂主要集中在季铵盐型和磺酸盐型表面活性剂的研究, 对酰胺基羧酸盐型双子表面活性剂

研究报道较少<sup>[4]</sup>。王亚魁等<sup>[5]</sup>以月桂酸、*N,N'*-二甲基-1,3-丙二胺和 1,3-二氯-2-丙醇为原料合成了双酰胺基季铵盐型 Gemini 表面活性剂, 结果发现该生物易降解表面活性剂具有高的表/界面活性和优良的耐盐性能。秦文龙等<sup>[6]</sup>以二聚酸、*N*-甲基牛磺酸钠为主要原料合成了一种以乙二醇为连接链的酰胺基磺酸盐型双子表面活性剂, 结果表明该绿色表面活性剂具有高的表面活性和良好的泡沫性能。李妮妮等<sup>[7]</sup>以双十二烷基乙二胺与丁二酸酐进行酰胺化反应, 制备了一种高表面活性的羧酸盐型表

收稿日期: 2018-11-28; 修回日期: 2019-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774049); 国家自然科学基金项目(51474035)

作者简介: 金礼俊(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为油气田应用化学, 1140329048@qq.com; 唐善法(1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向为油气田应用化学, 通讯联系人, tangsf2005@126.com。

面活性剂,但其仅对合成产物表面活性进行了研究,缺乏关于产物应用性能的探究。

笔者以对苯二胺、棕榈酰氯、氯乙酸钠等为原料,经取代、酰化反应制备了一种以刚性链为联接基的新型酰胺基羧酸盐型双子表面活性剂,通过 FT-IR、<sup>1</sup>HNMR 对合成产物进行了结构表征,并对其表/界面活性、增黏性、泡沫性能以及乳化性能进行了测试。

## 1 实验

### 1.1 试剂及仪器

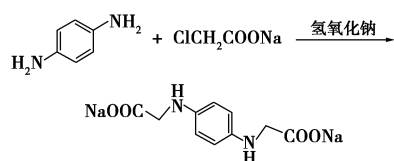
对苯二胺(质量分数 ≥ 98.5%),天津市河东区红岩试剂厂生产;棕榈酰氯(质量分数 ≥ 96%),中国医药上海化学试剂公司生产;氯乙酸钠(质量分数为 98%),济南润鑫鹏浩化工有限公司生产;氢氧化钠、盐酸、丙酮、无水乙醇,均为分析纯,上海国药化学试剂有限公司生产;十二烷基磺酸钠、十二烷基三甲基溴化铵、十六烷基羧酸钠,工业级,江苏飞翔化工有限公司生产;石蜡油, BR 级,上海抚生实业有限公司生产;实验用油为吉林油田地面原油。

磁力加热搅拌器,金坛市科兴仪器厂生产;Vector-33 型红外光谱仪,德国布鲁克仪器公司生产;Avance300 型核磁共振仪,瑞士 Bruker 公司生产;QBZY 型全自动表面张力仪,上海方瑞仪器有限公司生产;Texas-500 型旋滴界面张力仪,德国 Kruss 公司生产;DV3T 旋转式黏度计,上海精析仪器制造有限公司生产。

### 1.2 *N,N'*-双棕榈酰基对苯二胺二乙酸钠的合成

#### 1.2.1 中间体对苯二胺 *N,N'*-二乙酸钠的制备

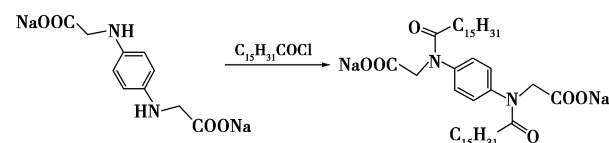
向反应器中加入对苯二胺水溶液,磁力搅拌下缓慢滴加氯乙酸钠水溶液,在 20℃ 反应 12 h,然后加入 40% 氢氧化钠水溶液并升温至 60℃ 继续反应 2 h。旋转蒸发除去溶剂,再用 35% 盐酸溶液调节 pH 为 1~2,有白色沉淀析出,最后抽滤并用蒸馏水洗涤 2~3 次,烘干得 *N,N'*-对苯二胺双乙酸钠。反应式如下:



#### 1.2.2 *N,N'*-双棕榈酰基对苯二胺二乙基磺酸钠的合成

向反应器中加入中间体 *N,N'*-对苯二胺双乙基磺酸钠水溶液、丙酮及氢氧化钠溶液,溶剂为水,在

冰水浴条件下缓慢滴加棕榈酰氯,并用氢氧化钠水溶液保持反应体系 pH 为 8,升温至 40℃ 继续反应 10 h,除去水溶剂后用热无水乙醇萃取,干燥得 *N,N'*-双棕榈酰基对苯二胺二乙酸钠,总收率为 76.8%。反应式如下:



### 1.3 活性物质量分数的测定

向具塞量筒中加入 25 mL 质量分数为 0.1% 表面活性剂溶液、25 mL 亚甲基蓝、15 mL 氯仿和 10 mL 蒸馏水,用十六烷基三甲基溴化铵标准溶液 (0.004 mol/L) 滴定。塞好瓶塞后剧烈摇动,静置分层。观察颜色变化,当两层的颜色相同时停止。计算合成的双子表面活性剂纯度  $\omega$ :

$$\omega = \{[(V/1\ 000) \times 0.002 \times M] / 0.025\} \times 100\%$$

式中:  $M$  为双子表面活性剂的相对分子质量;  $V$  为十六烷基三甲基溴化铵标准溶液所用体积, mL。

### 1.4 结构表征与性能测定

结构表征:采用 KBr 压片法对中间体及最终产物进行 FT-IR 测试,波数范围为 400~4 000  $\text{cm}^{-1}$ ;以  $\text{CDCl}_3$  为溶剂, TMS 为内标物,通过核磁共振仪进行 <sup>1</sup>HMR 结构分析。

表面张力:利用全自动表面张力仪测定不同浓度 ( $C$ ) DC16-P-16 溶液表面张力 ( $\gamma$ ),绘制  $\gamma$ -lg  $C$  曲线。

油/水界面张力:利用 Texas-500 旋滴界面张力仪测定原油与 DC16-P-16 溶液的油/水界面张力。

增黏性:利用 DV3T 旋转式黏度计测定不同条件下 DC16-P-16 溶液在剪切速率 7  $\text{s}^{-1}$  的黏度。

泡沫性能:量取 10 mL 的 0.1% DC16-P-16 溶液至 50 mL 具塞量筒中,上下剧烈振荡 20 次, 25℃ 下静置 1 h,记录初始泡沫高度 ( $H_1$ , cm) 和 5 min 后泡沫高度 ( $H_2$ , cm),稳泡性计算式为:

$$\text{稳泡性}(\%) = (H_2/H_1) \times 100\%$$

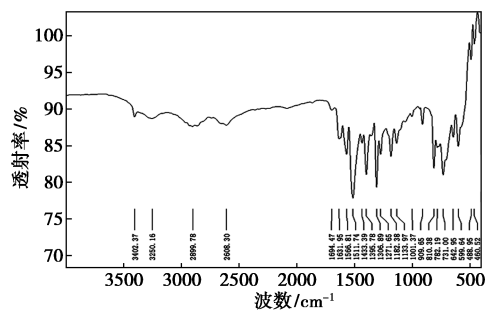
乳化性能:量取 20 mL 0.1% DC16-P-16 溶液至 50 mL 具塞量筒中,再加入 20 mL 石蜡油, 25℃ 反复振荡 20 次,记录分出 5 mL 水相的时间 ( $s$ )。

## 2 结果与讨论

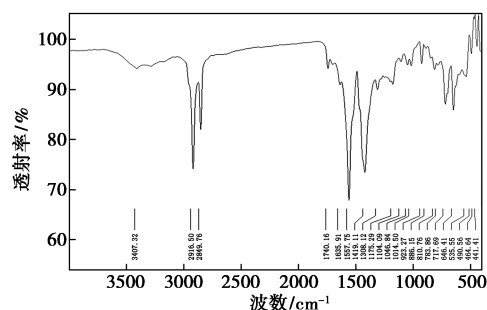
经两相滴定法测定 DC16-P-16 中活性物质量分数为 96.2%,即所合成物具有很高纯度,满足以下表征及性能测定要求。

## 2.1 结构表征

对中间体和 DC16-P-16 进行 FT-IR 和  $^1\text{H}$ NMR 表征,结果分别如图 1、图 2 所示。

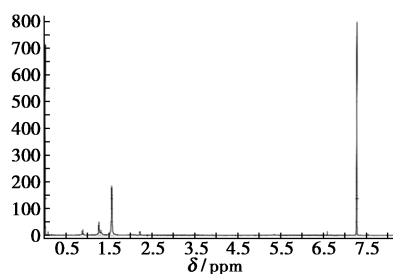


(a) 中间体

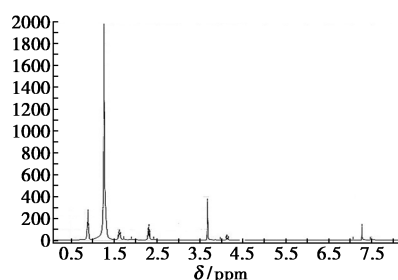


(b) 终产物 DC16-P-16

图 1 中间体和终产物红外光谱图



(a) 中间体



(b) 终产物 DC16-P-16

图 2 中间体和终产物核磁共振氢谱

由图 1(a)可以看出,3 402.37  $\text{cm}^{-1}$  为—NH—的伸缩振动吸收峰;1 433.39  $\text{cm}^{-1}$  为—N—C—的弯曲振动吸收峰;2 899.78  $\text{cm}^{-1}$  为亚甲基—CH<sub>2</sub>—的伸缩振动吸收峰;3 325、1 694  $\text{cm}^{-1}$  为羧基—COO<sup>-</sup>—特征吸收峰;3 301.73、1 631.95  $\text{cm}^{-1}$  和

1 511.74  $\text{cm}^{-1}$  为苯环的特征峰;782.19  $\text{cm}^{-1}$  为苯环的取代物特征峰。表明中间体中 N—H 键、C 键、—COO<sup>-</sup>—、亚甲基、苯环、苯环取代物的存在。

由图 1(b)可以看出,2 916.50、2 849.76  $\text{cm}^{-1}$  分别为饱和碳链—CH<sub>3</sub> 和—CH<sub>2</sub>—特征吸收峰;1 419.11  $\text{cm}^{-1}$  是羰基—C=O 对称伸缩峰;3 325、1 694  $\text{cm}^{-1}$  为羧基—COO<sup>-</sup>—特征吸收峰;1 557.75  $\text{cm}^{-1}$  是酰胺基—CO—N—伸缩振动峰,3 407.32、1 557.75  $\text{cm}^{-1}$  为苯环特征峰;783.86  $\text{cm}^{-1}$  为苯环取代物特征峰。与中间体红外特征峰相比,DC16-P-16 谱图中在—N—C—键和羧基—COO<sup>-</sup>—的基础上增加了饱和碳链—CH<sub>3</sub>、羰基—C=O—、酰胺基—CO—N—,与目标产物一致。

由图 2(a)可以看出, $\delta = 6.59 \sim 7.27$  (m, 4H, —C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>—),  $\delta = 2.22 \sim 2.23$  (m, 4H, —2CH<sub>2</sub>—COO<sup>-</sup>),  $\delta = 0.88 \sim 0.89$  (d, 2H, —CH<sub>2</sub>—),  $\delta = 1.22 \sim 1.27$  (d, 2H, —CH<sub>2</sub>—),  $\delta = 1.57$  (d, 2H, —NH—),  $^1\text{H}$ NMR 谱认证了目标产物中苯二胺联结基和氨基、羧酸亲水基团的存在及位置。

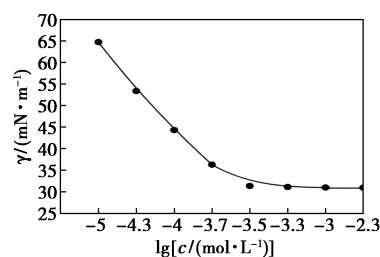
由图 2(b)可以看出, $\delta = 7.27$  (m, 4H, —C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>—),  $\delta = 2.22 \sim 2.23$  (m, 4H, —2CH<sub>2</sub>—COO<sup>-</sup>),  $\delta = 0.88 \sim 0.89$  (d, 2H, —CH<sub>2</sub>—),  $\delta = 1.26 \sim 1.31$  (d, 2H, —CH<sub>2</sub>—), 与中间体氢谱对比,—NH—的消失符合 DC16-P-16 分子结构。

通过红外光谱和核磁氢谱的表征,证实所合成产物为 DC16-P-16。

## 2.2 应用性能测试

### 2.2.1 表面活性

终产物 DC16-P-16 的  $\gamma$ -lg C 曲线如图 3 所示。

图 3 双子表面活性剂 DS16-P-16 的  $\gamma$ -lg C 曲线

由图 3 可以看出,随着浓度升高,溶液表面张力急剧下降后稳定不变。由图中曲线转折点可得 DC16-P-16 的 cmc 为  $3.16 \times 10^{-4}$  mol/L, 对应表面张力( $\gamma_{\text{cmc}}$ )为 31.36 mN/m。

采用同样方法测定了常规表面活性剂十二烷基磺酸钠和十二烷基三甲基溴化铵的 cmc 和  $\gamma_{\text{cmc}}$ , 结果如表 1 所示。

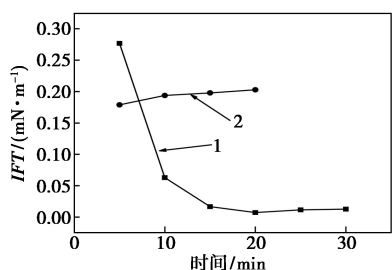
表 1 几种表面活性剂的表面活性

表面活性剂	$C_{cmc}/(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	$\gamma_{cmc}/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$
DC16-P-16	$3.16\times 10^{-4}$	31.36
$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_3\text{Na}$	$8.0\times 10^{-3}$	38.00
$\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{N}(\text{CH}_3)_3\text{Br}$	$1.6\times 10^{-2}$	40.00

由表 1 可以看出,与传统表面活性剂十二烷基磺酸钠和十二烷基三甲基溴化铵相比,DC16-P-16 的 cmc 低 1~2 个数量级。这是由于联结基削弱了 2 个亲水头基间的静电斥力;并且分子内的酰胺键会形成氢键,使得 DC16-P-16 在水溶液中更易形成胶束,从而有低的 cmc。通常来说, $\gamma_{cmc}$  大小取决于表面活性剂在溶液表面饱和吸附时的排列紧密程度,DC16-P-16 因为联结基的存在,相比传统单链表面活性剂在溶液表面排列更为致密,但由于联结基的刚性特征使得 DC16-P-16 的疏水链间在溶液表面仍存在间隙,导致 DC16-P-16 的  $\gamma_{cmc}$  相比传统单链表面活性剂降低有限<sup>[8]</sup>。

### 2.2.2 油/水界面活性

对 DC16-P-16 与十六烷基羧酸钠降低油/水界面张力的能力进行测试,结果如图 4 所示,测试质量分数为 0.5%。



1—DC16-P-16;2—十六烷基羧酸钠

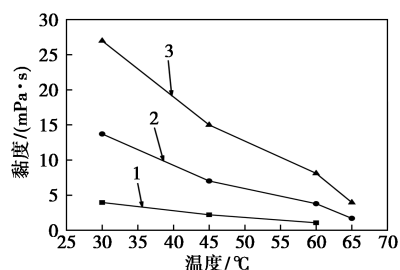
图 4 2 种不同表面活性剂的油/水界面张力与时间的关系

由图 4 可以看出,0.5% DC16-P-16 仅需 20 min 即可将油水界面张力降至  $8.52\times 10^{-3}$  mN/m,而同等条件下十六烷基羧酸钠却只能降低至 0.204 mN/m。可见 DC16-P-16 界面活性高于十六烷基羧酸钠 2 个数量级,且能够长时间保持较高界面活性,而十六烷基羧酸钠随时间增大界面张力出现上涨趋势,不利于实际应用。因此,产物在提高洗油效率方面有可观的应用前景。

### 2.2.3 增黏性能

表面活性剂的黏度可扩大波及体积,提高原油的采收率<sup>[9]</sup>。因此考察了不同质量分数 DC16-P-

16 溶液在不同温度时的黏度,结果如图 5 所示。



1—0.1%;2—0.3%;3—0.5%

图 5 DC16-P-16 质量分数和温度对 DC16-P-16 溶液黏度的影响

由图 5 可以看出,相同温度下随着 DC16-P-16 质量分数增加,溶液黏度出现明显的上涨趋势。原因是随着表面活性剂质量分数的增大,表面活性剂分子在水溶液中的聚集体结构发生显著改变,线性胶束相互缠绕形成了网状结构,从而大幅增加了溶液黏度<sup>[10]</sup>。温度是影响表面活性剂溶液黏度大小的重要因素,溶液中的胶束结构会随着温度的升高而在一定程度上遭到破坏<sup>[11]</sup>。因此,产物溶液的黏度随着温度的升高逐渐降低,65℃ 时极低质量分数(0.5%)的 DC16-P-16 溶液黏度为 3.95 mPa·s,具有一定的耐温增黏性。

### 2.2.4 泡沫性能

在相同条件下测定了 DC16-P-16 和十六烷基羧酸钠的泡沫高度和稳泡性,结果如表 2 所示。

表 2 2 种表面活性剂的泡沫高度和稳定性

	DC16-P-16	十六烷基羧酸钠
0 min 泡沫高度/cm	31.2	17.6
5 min 泡沫高度/cm	30.8	10.4
稳泡性/%	98.7	59.0

由表 2 可以看出,DC16-P-16 的起泡性和稳泡性都优于传统表面活性剂,其中 DC16-P-16 泡沫高度在测量前后基本没变,表明其稳泡率接近于 100%。这是由于联结基降低了 2 个离子头基间的排斥作用以及酰胺基团可形成分子间氢键,使得分子在空气/水界面上排列更加紧密,能更有效地降低水的表面张力,提高界面膜弹性,起泡性好和稳泡性增强<sup>[12]</sup>。同时该表面活性剂的联结基为刚性结构,这使得分子在界面的排布更为规整,气/液界面吸附膜强度提高,同样也增强了泡沫的稳定性。

### 2.2.5 乳化性能

在相同条件下测定 DC16-P-16 和十六烷基羧

酸钠的乳化能力,分出水的时间越长,乳化能力越好。质量分数为 0.1% 的 DC16-P-16 和十六烷基羧酸钠分出 5 mL 水相的时间分别为 735 s 和 289 s。可见,DC16-P-16 乳化性能远高于十六烷基羧酸钠。研究发现,普通乳状液的液珠聚集成更大的液珠并最终导致乳状液破裂的速率取决于多种因素,其中,界面膜强度是影响普通乳状液稳定性的主要因素之一,表面活性剂也通过降低体系的界面张力来稳定乳状液<sup>[13]</sup>。这也正是 DC16-P-16 乳化性强于传统表面活性剂的原因所在。

### 3 结论

(1) 经取代和酰胺化两步反应,合成了 *N,N'* 双棕榈酰基对苯二胺二乙酸钠,通过 FT-IR 和 <sup>1</sup>H NMR 对其结构进行表征,确定合成产物为目标产物。

(2) DC16-P-16 的 cmc 为  $3.16 \times 10^{-4}$  mol/L,临界表面张力  $\gamma_{cmc}$  为 31.36 mN/m。

(3) 0.5% 的 DC16-P-16 可将油/水间界面张力降低至  $8.52 \times 10^{-3}$  mN/m; 并且 0.5% 的 DC16-P-16 溶液在 65℃ 时黏度仍有 3.95 mPa·s。

(4) 与十六烷基羧酸钠(起泡高度为 17.6 cm, 59.0%) 相比,DC16-P-16 起泡高度为 31.2 cm, 稳泡率接近于 100%; 与十六烷基羧酸钠(分出 5 mL 水的时间为 289 s) 相比,在乳液体系中分出 5 mL 水的时间可达 735 s。

### 参考文献

[1] 王云斐,刘云.Gemini 型表面活性剂的合成进展[J].精细化工,

(上接第 114 页)

- [13] Li Z J, Wang J J, Li X B, *et al.* An exceptional artificial photocatalyst, Nih-CdSe/CdS core/shell hybrid, made in situ from CdSe quantum dots and nickel salts for efficient hydrogen evolution[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25: 6613-6618.
- [14] Wu L Z, Huang M Y, Li X B, *et al.* Surface stoichiometry manipulation enhances solar hydrogen evolution of CdSe quantum dots[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(14): 6015-6021.
- [15] Yan S C, Li Z S, Zou Z G. Photodegradation performance of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> fabricated by directly heating melamine[J]. *Langmuir*, 2009, 25(17): 10397-10401.
- [16] Yan S C, Li Z S, Zou Z G. Photodegradation of rhodamine B and methyl orange over Boron-doped g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> under visible light irradiation[J]. *Langmuir*, 2010, 26(6): 3894-3901.
- [17] Ge L. Synthesis and photocatalytic performance of novel metal-free g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photocatalysts[J]. *Materials Letters*, 2011, 65(17-18): 2652-2654.
- [18] Gaponik N, Talapin D V, Rogach A L, *et al.* Thiol-capping of CdTe

nanocrystals: An alternative to organometallic synthetic routes[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2002, 106(29): 7177-7185.

- [2] Zana R, Xia J. Gemini surfactants: synthesis, interfacial and solution phase behavior, and applications[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2003, 272(2): 502-502.
- [3] Murguia M C, Cristaldi M D, Porto O A, *et al.* Synthesis, surface-active properties, and antimicrobial activities of new neutral and cationic trimeric surfactants[J]. *Journal of Surfactants & Detergents*, 2008, 11: 41-48.
- [4] 王军,李军舰,初红涛,等.微波辐射下 2-苯并咪唑的绿色合成[J]. *化学研究与应用*, 2013, (3): 423-426.
- [5] 王亚魁,姜亚洁,耿涛,等.双酰胺基 Gemini 阳离子表面活性剂的合成及应用性能[J]. *精细化工*, 2019, 36(1): 44-50.
- [6] 秦文龙,刘旋,肖曾利,等.长链酰胺基磺酸盐型双子表面活性剂的合成及性能研究[J]. *日用化学工业*, 2014, (1): 6-9.
- [7] 李妮妮,高欢泉,查青青,等.新型羧酸盐类双子阴离子表面活性剂合成工艺及表面性能研究[J]. *日用化学品科学*, 2014, (1): 32-35.
- [8] 王丽艳,何显优,白丽明,等.含酰胺键表面活性剂的合成及其性能[J]. *精细化工*, 2018, (6): 941-948.
- [9] 刘丽娟.表面活性剂在低渗透油藏降压增注机理研究[D].成都:西南石油大学,2014.
- [10] 赵成洋,唐善法,田磊,等.羧酸盐双子表面活性剂溶液黏度行为研究[J]. *现代化工*, 2017, (2): 125-128.
- [11] 皮银银,张磊,刘忠运,等.硫酸酯盐双子表面活性剂溶液流变性能研究[J]. *石油天然气学报*, 2011, (6): 135-138.
- [12] 祝丽丽,康保安,杨卉艳,等.壬基酚聚氧乙烯醚丙基磺酸钠的表面活性及应用性能[J]. *精细化工*, 2012, (12): 1176-1180.
- [13] Noori S, Naqvi A Z, Ansari W H, *et al.* Synthesis and investigation of surface active properties of counterion coupled gemini surfactants[J]. *Journal of Surfactants & Detergents*, 2014, 17(3): 409-417. ■
- [19] Xiang Q, Yu J, Jaroniec M. Preparation and enhanced visible-light photocatalytic H<sub>2</sub>-production activity of graphene/C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composites[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2011, 115(15): 7355-7363.
- [20] 鹿霞,钟文英,于俊生.高量子产率水溶性 CdTe 量子点的制备与表征[J]. *分析试验室*, 2009, (1): 36-40.
- [21] 秦元斌,杨曦,于俊生.巯基乙胺稳定的水溶性 CdTe 纳米粒子的合成与表征[J]. *无机化学学报*, 2016, 22(5): 851-855.
- [22] Wang W, Li F, Zhang D, *et al.* Photoelectrocatalytic hydrogen generation and simultaneous degradation of organic pollutant via CdSe/TiO<sub>2</sub> nanotube arrays[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 362: 490-497.
- [23] Chen W W, Yu S, Zhong Y Q, *et al.* Effect of electron transfer on the photocatalytic hydrogen evolution efficiency of faceted TiO<sub>2</sub>/CdSe QDs under visible light[J]. *New Journal of Chemistry*, 2018, 42(7): 4811-4817. ■