

CdTe-QDs/g-C₃N₄ 的合成 及其高效可见光光催化产氢研究

曾丹丹¹, 许第发², 周 艺^{1*}, 赵 珍¹, 张世英²

(1.长沙理工大学电力与交通材料保护湖南省高校重点实验室, 湖南 长沙 410114;

2.长沙学院环境光催化应用技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410003)

摘要: CdTe 量子点在可见光下具有优异的光催化制氢活性, 将 CdTe 量子点修饰到石墨相氮化碳 (g-C₃N₄) 表面可以进一步提高其产氢活性。采用一步水热法合成了 CdTe QDs/g-C₃N₄ 复合光催化剂, 并用 XRD、TEM、DRS、FT-IR 和 PL 对其进行分析。在以 CoCl₂ 为助催化剂和抗坏血酸 (H₂A) 为牺牲剂的条件下, 得到的复合光催化剂在可见光照射下比纯 CdTe QDs 和 g-C₃N₄ 表现出更高的产氢活性。其中质量分数为 20% CdTe QDs/g-C₃N₄ 的复合材料的 H₂ 生成量为 4.8 mmol, 是纯 CdTe QDs 的 2.4 倍。

关键词: CdTe QDs; 产氢; g-C₃N₄; 光催化剂; 光生载流子

中图分类号: O649

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2019)08-0110-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2019.08.023

Synthesis of CdTe quantum dots decorated g-C₃N₄ and its application in efficient photocatalytic production of hydrogen under visible light

ZENG Dan-dan¹, XU Di-fa², ZHOU Yi^{1*}, ZHAO Zhen¹, ZHANG Shi-ying²

(1. Hunan Provincial Higher Educational Key Laboratory of Power and Traffic Material Protection, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Applied Technology for Environment Photocatalysis, Changsha University, Changsha 410003, China)

Abstract: CdTe quantum dots (QDs) exhibits high photocatalytic hydrogen production under visible light irradiation. By decorating CdTe QDs onto the surface of graphitic carbon nitride (g-C₃N₄), its activity in generating hydrogen can be further improved. In this work, CdTe QDs/g-C₃N₄ composite photocatalysts are fabricated by one-step hydrothermal method and characterized by XRD, TEM, DRS, FT-IR and PL. In the case of employing CoCl₂ and ascorbic acid (H₂A) as co-catalyst and sacrificial agent, respectively, the obtained composite photocatalysts reveal higher activity in hydrogen production under visible light irradiation than pure CdTe QDs or pure g-C₃N₄. The optimal composite with 20wt% of CdTe QDs can help to produce 4.8 mmol of hydrogen, which is 2.4 times that over pure CdTe QDs.

Key words: CdTe QDs; hydrogen production; carbon nitride; photocatalyst; photo-generated carrier

近年来,有机聚合物半导体石墨相氮化碳高分子材料(g-C₃N₄)受到人们的广泛关注^[1-5]。首先, g-C₃N₄ 的导带和价带电位分别为 -1.1 eV 和 +1.6 eV (vs. NHE, pH=0), 跨越了水的氧化和还原电位, 可以实现全分解水制氢; 其次, g-C₃N₄ 的带隙较窄(2.7 eV), 可以吸收可见光; 另外, g-C₃N₄ 还具有合成简单、成本低廉、光化学稳定性高和环境友好等特点。然而, g-C₃N₄ 依然存在光吸收范围窄和光生电荷容易复合等难题, 而且, 在没有助催化剂存在的条件下, g-C₃N₄ 表现出很低的产氢活性。

量子点具有可调节的带隙、丰富的表面特性和大的比表面积等优点吸引了人们的广泛研究。在光催化制氢研究中, 报道了具有较高产氢效率的是 CdS、CdSe、CdTe 等硫族化合物量子点^[6-9]。Hensel 等^[10]利用 CdSe QDs 对 TiO₂ 进行敏化, 被 CdSe QDs 敏化后的 TiO₂ 的光吸收范围发生红移拓展至 400~600 nm, 并表现出较高的可见光产氢活性。Li 等^[11]采用有机合成法并通过调节油酸用量和反应时间制备了不同粒径的 CdS-QDs, 粒径为 2.8 nm 的 pt-CdS QDs 量子点效率最高可达 17.3%。Wu 等^[12-13]构

收稿日期: 2019-03-06; 修回日期: 2019-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(21871030, 21671026); 湖南省自然科学基金项目(2018JJ2456)

作者简介: 曾丹丹(1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向为光催化纳米材料, 1197375361@qq.com; 周艺(1963-), 女, 博士, 教授, 研究方向为光催化纳米材料, 通讯联系人, zhoyih@163.com。

筑了 Ni_h-CdTe QDs 和具有核壳结构的 Ni_h-CdSe/CdS QDs 光催化制氢体系,产氢速率分别为 21 μmol/(h·mg) 和 153 μmol/(h·mg)。Wu 和 Li 等^[14]在 CdSe QDs 上采用原位法生长 ZnSe QDs,形成无机纳米簇,以抗坏血酸(H₂A)为牺牲剂,ZnSe/CdSe QDs 的产氢速率可以达到 30 000 μmol/(h·g),是纯 CdSe QDs 的产氢速率的 180 倍。量子点敏化不仅提高了宽带隙半导体对可见光的响应性能,而且在其界面间还可能形成各种异质结,从而进一步促进光生载流子的分离。

笔者采用水热法将 CdTe QDs 和 g-C₃N₄ 复合在一起,研究了 CdTe QDs 的质量分数对于 CdTe QDs/g-C₃N₄ 光催化分解水产氢速率的影响,为高可见光活性光催化剂的合成提供新思路。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

巯基丙酸、碲粉、硼氢化钠、氯化镉等,均为分析纯。

光催化制氢装置为 Labsolar-IIIAG 光解水制氢系统(泊菲莱);商业照明灯(400~800 nm,光强 200 mW/cm²);马弗炉(SX-5-12 型);磁力搅拌器;真空干燥箱(DZ-1A 型);光催化制氢反应器(自制);X 射线衍射仪(德国 Bruker);透射电子显微镜(TEC1NAIG2,美国)。

1.2 CdTe-QDs 的制备

称取 0.127 6 g 碲(Te)粉和 0.2 g 硼氢化钠(NaBH₄),置于装有 3 mL 去离子水的小试剂瓶中,于 0℃ 保存 8 h,得到前驱体(NaHTe)溶液;再称取 0.456 7 g 氯化镉(CdCl₂·5/2H₂O),溶解于装有 500 mL 去离子水的三口烧瓶中,持续搅拌下加入 3-巯基丙酸(MPA),并用 1 mol/L 的 NaOH 调节混合溶液 pH 至 10;在 N₂ 保护下持续搅拌,将 NaHTe 溶液用针管快速地注入到溶液中继续搅拌 30 min。最后将上述溶液转移至 150 mL 反应釜中,将其置于恒温烘箱 120℃ 反应 3 h,自然冷却至室温,所得样品用无水乙醇沉淀 12 h,以 10 000 r/min 的转速离心 10 min 得到沉淀物,最后将得到的沉淀物于 60℃ 真空干燥 24 h,得到红色样品粉末。

1.3 CdTe-QDs/g-C₃N₄ 的制备

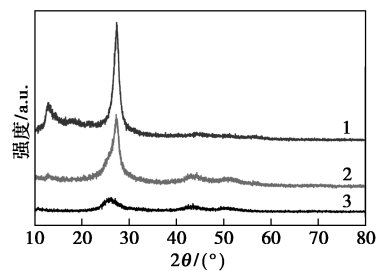
根据文献^[15]中所述的方法制备 g-C₃N₄。称取 10 g 三聚氰胺于马弗炉内,在空气气氛中以 5℃/min 的升温速率升温到 500℃,并在此温度下保

温煅烧 2 h,再加热至 520℃ 保温 2 h,即可得 g-C₃N₄ 纳米片。将 5 mg g-C₃N₄ 和 0.456 7 g 氯化镉(CdCl₂·5/2H₂O)加入 500 mL 去离子水中,磁力搅拌 1 h,再加入 3-巯基丙酸(MPA)搅拌 10 min 混合均匀,用 1 mol/L 的 NaOH 调节混合溶液 pH 至 10;全程 N₂ 保护,持续搅拌 30 min 后将提前制备好的 NaHTe 溶液用针管快速注入到混合溶液中继续搅拌 30 min。最后将上述溶液转移至 150 mL 反应釜中,置于烘箱 120℃ 反应 3 h,待自然冷却至室温,所得样品用无水乙醇(1:1)沉淀 12 h 得到悬浊液,再将悬浊液以 10 000 r/min 的转速离心 10 min 得到沉淀物,重复洗涤、离心操作 3 次,将得到的沉淀物在 60℃ 下真空干燥 24 h,得到 CdTe-QDs/g-C₃N₄。

2 结果与讨论

2.1 结构与形貌

g-C₃N₄、CdTe QDs 和 CdTe QDs/g-C₃N₄ 的 X 射线衍射谱图如图 1 所示。



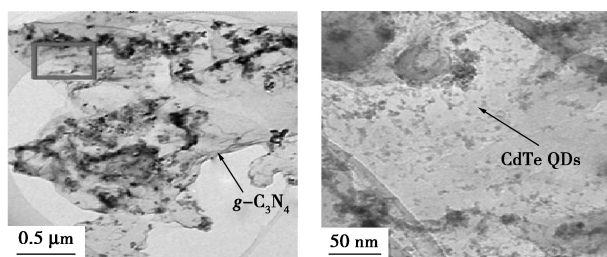
1—g-C₃N₄; 2—CdTe-QDs/g-C₃N₄; 3—CdTe-QDs

图 1 纯 g-C₃N₄、纯 CdTe-QDs、CdTe-QDs/g-C₃N₄ 的 XRD 图

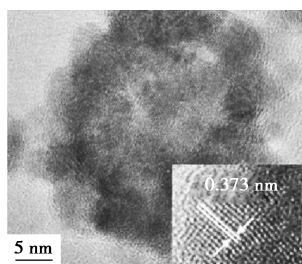
从图 1 中可以看出,g-C₃N₄ 在 13.04° 和 27.4° 处有 2 个主要特征衍射峰,分别与四方晶系的 g-C₃N₄(JCPDS No.87-1526)的(001)和(002)晶面对应^[16-17]。CdTe QDs 在 26.4° 和 43.5° 有 2 个特征峰,分别对应于立方晶系 CdTe 的(111)和(220)晶面^[18]。CdTe QDs/g-C₃N₄ 样品中能同时观察到属于 CdTe QDs 和 g-C₃N₄ 的特征峰,说明复合物中包含了 CdTe QDs 和 g-C₃N₄。

CdTe QDs/g-C₃N₄ 的 TEM 图和 CdTe QDs 的 HRTEM 图如图 2 所示。

由图 2(a)、图 2(b)可以看出,g-C₃N₄ 有着类似于石墨烯的层状二维结构,粒径为 3~5 nm 左右的 CdTe 量子点在静电吸引力的作用下均匀且牢固地附着在层状 g-C₃N₄ 表面。由图 2(c)中可以看



(a) CdTe QDs/g-C₃N₄ 的 TEM 图 (b) CdTe QDs/g-C₃N₄ 的局部 TEM 放大图



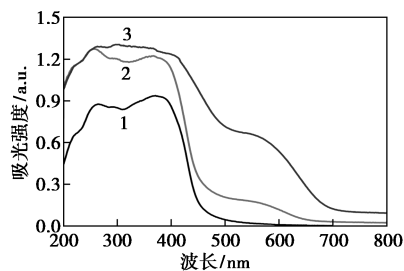
(c) CdTe QDs 的 HRTEM 图

图 2 CdTe QDs/g-C₃N₄ 的形貌图

出, CdTe QDs 的结晶性能良好, 可见明显的晶格条纹, 晶格间距为 0.373 nm, 对应于 CdTe 的 (111) 晶面。

2.2 紫外-可见光光谱

制备的 CdTe QDs/g-C₃N₄ 样品的紫外-可见漫反射光谱图如图 3 所示。



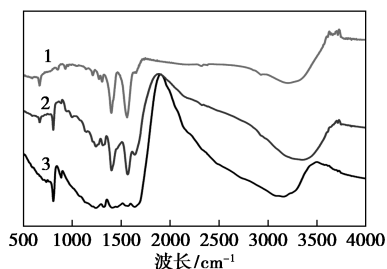
1—CdTe QDs/g-C₃N₄; 2—CdTe QDs; 3—纯 g-C₃N₄

图 3 CdTe QDs/g-C₃N₄ 样品的紫外-可见漫反射光谱图

由图 3 可以看出, 纯 g-C₃N₄ 的吸收边缘的波长为 460 nm, 对应的带隙是 2.7 eV。纯 CdTe QDs 的吸收边界在 650 nm, 所对应的带隙为 1.8 eV。g-C₃N₄ 和 CdTe QDs 复合后, 复合体系的吸收边发生了红移并拓宽其可见光响应范围至 600~650 nm, 这使得复合体系更加有效地使用太阳光产生光生电子和空穴。

2.3 红外光谱分析

样品 CdTe QDs、CdTe QDs/g-C₃N₄ 和纯 g-C₃N₄ 的红外光谱图如图 4 所示。



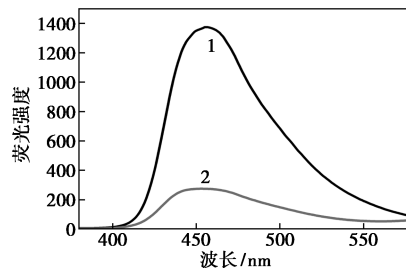
1—CdTe QDs; 2—CdTe QDs/g-C₃N₄; 3—纯 g-C₃N₄

图 4 样品 CdTe QDs、CdTe QDs/g-C₃N₄ 和纯 g-C₃N₄ 的红外光谱图

由图 4 中纯 g-C₃N₄、纯 CdTe QDs 和 CdTe QDs/g-C₃N₄ 复合物之间红外光谱对比可以看出, 特征带主要在 1 200~1 750 cm⁻¹ 光谱范围内的几个峰 1 235、1 322、1 423、1 572 cm⁻¹ 和 1 640 cm⁻¹ 属于 CN 杂环的拉伸振动; 三嗪单元的特征峰在 806 cm⁻¹; 此外, 3 000~3 500 cm⁻¹ 的宽峰属于氨基中的 N—H 键和吸附水中的 O—H 键的伸缩振动^[16,19]。对于纯 CdTe 而言, 2 900~3 400 cm⁻¹ 的宽峰为羧酸官能团中的—OH 伸缩振动峰, 1 720 cm⁻¹ 附近的强峰为 C=O 的伸缩振动峰, 2 565 cm⁻¹ 附近没有观察到—SH 的特征峰^[20], 说明在量子点合成中, 巯基丙酸中的—SH 与量子点表面的 Cd²⁺ 发生了配位, 形成了巯基丙酸稳定的 CdTe QDs^[21]。CdTe QDs/g-C₃N₄ 复合物的 FT-IR 光谱分析结果表明, CdTe QDs 已经成功附着在 g-C₃N₄ 纳米片上, 形成了纳米复合物。

2.4 光生电荷分离效率

为了进一步证实电子传输速率的快慢, 利用稳态荧光光谱和瞬态荧光光谱从动力学角度分析电子转移过程, 结果分别如图 5、图 6 所示。



1—g-C₃N₄; 2—CdTe/g-C₃N₄

图 5 样品的稳态荧光光谱(激发波长 375 nm)

荧光峰强度的降低主要是电子的转移所引起, 促进电子和空穴的分离效率, 导致荧光的淬灭^[22]。由图 5 可以看出, 在激发波长 375 nm 的激发下, g-C₃N₄ 的最强荧光峰在 459 nm; CdTe QDs 和 g-C₃N₄

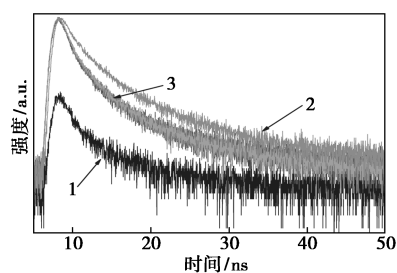
1—CdTe; 2—g-C₃N₄; 3—CdTe/g-C₃N₄

图6 样品的瞬态荧光光谱(激发波长325 nm)

复合后,其荧光峰发生了淬灭,表明在 CdTe QDs/g-C₃N₄ 复合物中,CdTe QDs 和 g-C₃N₄ 之间确实产生了电荷转移,并且其电子空穴复合率低于 g-C₃N₄。瞬态荧光光谱可以计算出荧光的平均寿命,并间接推测光生载流子的分离效率。由图6可以看出,样品的瞬态荧光寿命大小为: CdTe QDs > g-C₃N₄ > CdTe QDs/g-C₃N₄, 纯 g-C₃N₄ 和 CdTe QDs 拥有较长的平均荧光寿命, CdTe QDs/g-C₃N₄ 具有较短的平均荧光寿命。样品的荧光平均寿命变短,说明 CdTe QDs/g-C₃N₄ 具有最高的光生载流子的分离效率。

通过测试样品 CdTe QDs、g-C₃N₄ 和 CdTe QDs/g-C₃N₄ 的瞬时光电流和电化学阻抗谱^[23],进一步考察 CdTe QDs 与 g-C₃N₄ 之间电子转移速率的情况。样品的瞬时光电流如图7所示。

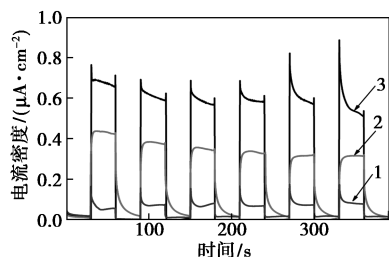
1—CdTe-QDs; 2—g-C₃N₄; 3—CdTe-QDs/g-C₃N₄

图7 样品的瞬时光电流

由图7可以看出,开光后,样品的光电流迅速增加,之后光电流缓慢下降至平衡;闭光后,光电流下降。CdTe QDs/g-C₃N₄ 的瞬时光电流大于 g-C₃N₄, 进一步证明荧光光谱的结论,在 CdTe QDs/g-C₃N₄ 中电子的迁移速率快于 g-C₃N₄。

根据电化学阻抗谱图可以进一步比较电子迁移速率的大小。样品的电化学阻抗谱如图8所示。

由图8可以看出, g-C₃N₄ 的圆弧半径大于 CdTe QDs/g-C₃N₄, 即前者的电荷传递电阻大于后者。由此表明, CdTe QDs/g-C₃N₄ 的电子迁移率快

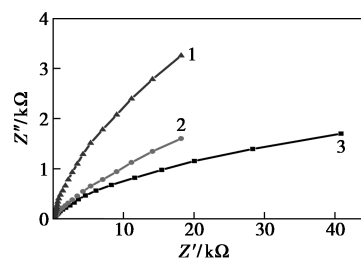
1—CdTe; 2—g-C₃N₄; 3—CdTe/g-C₃N₄

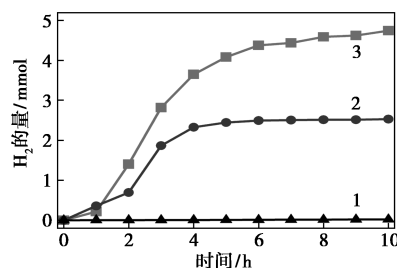
图8 样品的电化学阻抗谱

于 g-C₃N₄, 此结果和瞬态荧光光谱的分析结果一致,进一步验证 CdTe QDs/g-C₃N₄ 具有快速的电子传输速率和高的电子空穴分离率。

综上所述,从热力学和动力学上可以推出 CdTe QDs/g-C₃N₄ 具有快的电子转移速率,有效促进光生电子-空穴的分离,提高光催化制氢活性。

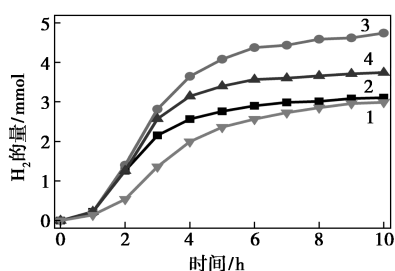
2.5 光催化活性和稳定性分析

纯 CdTe QDs 和纯 g-C₃N₄ 以及 CdTe QDs/g-C₃N₄ 复合物在可见光照射下的光催化产氢活性如图9所示。

1—g-C₃N₄; 2—CdTe QDs; 3—CdTe QDs/g-C₃N₄图9 样品 CdTe QDs、g-C₃N₄ 和 CdTe QDs/g-C₃N₄ 的可见光催化分解水产氢活性

在以 CoCl₂·6H₂O (62.5 mg/L) 为助催化剂、抗坏血酸(25 g/L)为电子牺牲剂、pH 为 4.65 的反应条件下,可见光光照 10 h,纯 g-C₃N₄ 的产氢量基本为零,纯 CdTe QDs 的氢气产量为 2.5 mmol,而 80 mL CdTe QDs/g-C₃N₄ 溶液的氢气产量为 4.8 mmol,几乎是纯 CdTe QDs 氢气产量的 2 倍。从中可以看出,当 CdTe QDs 加入到 g-C₃N₄ 中, g-C₃N₄ 光催化产氢活性有了很大的提高。因此, CdTe QDs 是提高纯 g-C₃N₄ 光催化活性的关键因素,这是因为 CdTe QDs 有更大的比表面积和较高的电子流动性,有利于电子的传输和提高光生载流子的分离速率。

不同质量分数的 CdTe QDs/g-C₃N₄ 的产氢活性对比如图10所示。

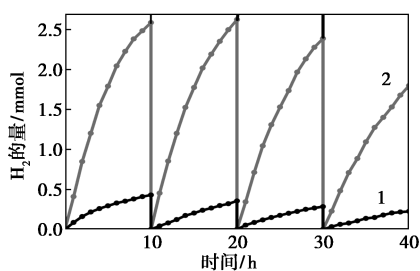


1—10% CdTe/CN; 2—15% CdTe/CN; 3—20% CdTe/CN;
4—25% CdTe/CN

图 10 不同质量分数的 CdTe QDs/g-C₃N₄ 的产氢活性比较

从图 10 中可以看出,在 10 h 的光照下 20% CdTe QDs/g-C₃N₄ 的产氢活性最好。

为了考察样品的光催化稳定性,对样品的光催化循环活性进行了测试,结果如图 11 所示。



1—CdTe QDs; 2—CdTe QDs/g-C₃N₄

图 11 样品 CdTe QDs/g-C₃N₄ 和 CdTe QDs 光催化产氢的循环实验

由图 11 可以看出,产氢活性测试 40 h,系统每 10 h 循环 1 次,经过 4 次重复使用后,CdTe QDs/g-C₃N₄ 复合物的光解水制氢性能虽有所降低,但其循环稳定性远高于纯 CdTe QDs 样品,原因是长时间的反应,量子点在溶液中溶解,说明 g-C₃N₄ 的复合不仅提高了 CdTe QDs 的光催化制氢性能,而且还增强了其光催化稳定性。原因是 CdTe QDs 与 g-C₃N₄ 之间形成了异质结,从而抑制了电荷的复合并延长了电荷的稳态寿命,从而使更多的电子参与分解水制氢的反应。

3 结论

通过一步水热法合成了一系列 CdTe QDs/g-C₃N₄ 复合光催化材料。结果表明,在 LED 灯照射下,所制备的 CdTe QDs/g-C₃N₄ 光催化材料表现出优异的光催化分解水产氢活性和理想的光催化稳定性,主要是因为 CdTe QDs 和 g-C₃N₄ 之间形成了异质结,有利于光生载流子的有效分离。其中 CdTe

QDs 最佳的质量分数为 20%,所对应的产氢效率为 4.89 μmol/h,是纯的 CdTe QDs 的 2.4 倍。该方法为制备 CdTe QDs 复合碳材料提供了普适性方法,为高效利用太阳能光解水制氢的实际应用提供理论依据。

参考文献

- [1] Wang X C, Maeda K, Thomas A, *et al.* A metal-free polymeric photocatalyst for hydrogen production from water under visible light [J]. *Nature Materials*, 2009, 8: 76-80.
- [2] Cao S W, Yu J G. Carbon-based H₂-production photocatalytic materials [J]. *Journal of Photochemistry & Photobiology C Photochemistry Reviews*, 2016, 27: 72-99.
- [3] Zhang J W, Wang Y H, Jin J, *et al.* Efficient visible-light photocatalytic hydrogen evolution and enhanced photostability of core/shell CdS/g-C₃N₄ nanowires [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2013, 5: 10317-10324.
- [4] Cao S W, Yuan Y P, Fang J, *et al.* In-situ growth of CdS quantum dots on g-C₃N₄ nanosheets for highly efficient photocatalytic hydrogen generation under visible light irradiation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38: 1258-1266.
- [5] Chen X F, Zhang J S, Fu X Z, *et al.* Fe-g-C₃N₄-catalyzed oxidation of benzene to phenol using hydrogen peroxide and visible light [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131: 11658-11659.
- [6] Yu S H, Wu Y S, Yu J A. Novel solventothermal synthetic route to nanocrystalline CdE (E=S, Se, Te) and morphological control [J]. *Chemistry of Materials*, 1998, 10(9): 2309-2312.
- [7] Yu W W, Qu L, Guo W Z, *et al.* Experimental determination of the extinction coefficient of CdTe, CdSe, and CdS nanocrystals [M]. *Mediation in International Relations: St. Martin's Press in Association with the Society for the Psychological Study of Social Issues*, 2003.
- [8] Qian X, Yue D, Tian Z, *et al.* Carbon quantum dots decorated Bi₂WO₆ nanocomposite with enhanced photocatalytic oxidation activity for VOCs [J]. *Applied Catalysis B Environmental*, 2016, 193: 16-21.
- [9] Michael A H, Tory K T, Frank E O. Quantum confinement controlled photocatalytic water splitting by suspended CdSe nanocrystals [J]. *Chemical Communications*, 2012, 48(3): 371-373.
- [10] Hensel J, Wang G M, Li Y, *et al.* Synergistic effect of CdSe quantum dot sensitization and nitrogen doping of TiO₂ nanostructures for photoelectrochemical solar hydrogen generation [J]. *Nano Letters*, 2010, 10: 478-483.
- [11] Lei W, Jaeckel F. Size-controlled electron transfer rates determine hydrogen generation efficiency in colloidal Pt-decorated CdS quantum dots [J]. *Nanoscale*, 2018, 10: 16153-16158.
- [12] Li Z J, Fan X B, Li X B, *et al.* Visible light catalysis-assisted assembly of Ni₁-QD hollow nanospheres in situ via hydrogen bubbles [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2014, 136: 8261-8268.

(下转第 119 页)

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^[13]。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 ¹H 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 3.16×10^{-4} mol/L,临界表面张力 γ_{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 8.52×10^{-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-C₃N₄ 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-C₃N₄ under visible light irradiation[J]. *Langmuir*, 2010, 26(6): 3894-3901.
- [17] Ge L. Synthesis and photocatalytic performance of novel metal-free g-C₃N₄ 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

2004, (2): 98-103.

- [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. ■
- nanocrystals: An alternative to organometallic synthetic routes[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2002, 106(29): 7177-7185.
- [19] Xiang Q, Yu J, Jaroniec M. Preparation and enhanced visible-light photocatalytic H₂-production activity of graphene/C₃N₄ 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/TiO₂ 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 TiO₂/CdSe QDs under visible light[J]. *New Journal of Chemistry*, 2018, 42(7): 4811-4817. ■