

# PANI 载的孔状 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 的界面聚合法制备与光催化性能研究

李宪华<sup>1</sup>, 张雷刚<sup>1</sup>, 王雪雪<sup>1</sup>, 于清波<sup>2</sup>

(安徽理工大学 1. 机械工程学院; 2. 材料科学与工程学院, 淮南 232001)

**摘要:** 在孔状石墨型氮化碳( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ )存在下, 通过苯胺单体的界面聚合成功制备了孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /聚苯胺(PANI)复合催化剂。采用 XRD、FTIR、SEM、TGA、UV-Vis 和电化学阻抗谱等对样品的结构、形貌、性能以及可见光催化降解亚甲基蓝的催化活性进行表征。结果表明: PANI 组装在孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  片上, 此种复合结构不仅利于孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  对 PANI 链段运动的限制, 提高孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /PANI 复合催化剂的稳定性; 而且增强材料的可见光利用率、氧化能力和电子输运性能, 利于可见光催化性能的改善。

**关键词:** 孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ; PANI; 热稳定性; 界面聚合; 光催化性能

中图分类号: TQ174 文献标识码: A

## Synthesis of Porous $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Loaded With Highly Dispersed PANI by Interfacial Polymerization and Its Photocatalytic Performance

LI Xian-Hua<sup>1</sup>, ZHANG Lei-Gang<sup>1</sup>, WANG Xue-Xue<sup>1</sup>, YU Qing-Bo<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Department of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Polyaniline (PANI) was successfully loaded on porous graphitic carbon nitride (porous  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) by interfacial polymerization of aniline monomers. The structure, morphology and properties of the prepared samples were characterized by XRD, FTIR, SEM, TGA, UV-Vis and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). Photocatalytic degradation of methylene blue was investigated to determine the photoactivity of the catalyst. The porous  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  showed good dispersion and interfacial adhesion to PANI, which improved the photocatalytic degradation of methylene blue and thermal stability. The improved photocatalytic activity could be attributed to the improved visible light utilization, oxidation power and electron transport property.

**Key words:** porous  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ; PANI; thermal stability; interfacial polymerization; photocatalytic performance

石墨型氮化碳( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ )具有特殊的半导体特性(禁带值 2.7 eV), 以及高稳定、无毒、易制备等特点, 近年来在可见光催化领域的研究备受关注<sup>[1]</sup>。与其他有机 $\pi$ 共轭材料相比,  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  是一种拥有层状结构的晶态材料, 这有利于电子转移。然而单一相的  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  存在层间电阻和可见光边缘吸收问题, 限制了它在可见光催化领域的应用<sup>[2-4]</sup>。与其他半导体材料复合成为提高  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  可见光催化性能的常

用方法<sup>[5]</sup>。

聚苯胺(PANI)在可见光范围内具有高的吸收系数和良好的电子转移性能, 近年来在光催化和太阳能转换领域逐渐引起人们的注意<sup>[6]</sup>。PANI 和  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  都具有 $\pi$ 共轭结构, 使其有可能成为最易相容的复合材料。Ge 工作组<sup>[7]</sup>已经通过本体聚合法制备 PANI/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$  复合材料, 并发现相比于单相  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ , PANI/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$  复合材料对亚甲基蓝的可见光催化性能

有所提高。Wang 课题组<sup>[6]</sup>最近用同样的方法制备了多级 PANI/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$  复合材料, 结果表明复合材料同样具有增强的可见光催化性能。但是上述研究都未涉及当 PANI 这种相对弱的热稳定性材料引进后, 复合材料的稳定性将如何变化。在商业应用方面, 复合材料的热稳定性更具有重要意义<sup>[8]</sup>。另外, 由于 PANI 和  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  是不相容的, 使  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  趋向于呈聚集态, 所以通过普通方法不能得到高分散的 PANI/ $g\text{-C}_3\text{N}_4$  复合材料。

本工作采用界面聚合法成功制备了聚苯胺生长在分散的孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  上的复合催化剂。这种特殊结构不仅发展了孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /PANI 的可见光催化性能, 而且保持了孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  的热稳定性。

## 1 实验方法

### 1.1 试剂与仪器

实验所涉及试剂均为分析纯, 购买于国药试剂。根据文献[9]方法合成孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 。所用仪器: LabX-6000 型 X 射线衍射仪(XRD), TENSOR27 型傅里叶红外光谱仪(FTIR), Lamda-900 型紫外-可见-近红外光谱仪(UV-Vis), S-4800 型扫描式电子显微镜, TG209F1 型热重分析仪(TGA), CHI 660E 型电化学工作站。

### 1.2 孔状 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /PANI 复合催化剂的制备

20 mL 盐酸(0.5 mol/L)中加入 3 mg 的孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ , 同时将 1.4 mmol 的苯胺单体溶解在 10 mL 的四氯化碳中, 将二者混合后超声处理以达到良好分散的效果。混合物冷却到 0℃ 后加入 0.285 g 过硫酸胺, 并在 0℃ 反应 24 h, 反应物用丙酮沉淀、过滤后, 分别用水与乙醇洗, 最后真空蒸干, 所得样品记为 CNP1。改变苯胺单体的加入量分别为 1 mmol 和 2 mmol, 所得样品分别记为 CNP2 和

CNP3。为了进行比较, 聚苯胺纳米棒通过相似的方法制备。

### 1.3 光催化实验

光催化实验采用 300 W 氙灯作为光源, 使光通过波长大于 420 nm 的滤波片以过滤掉紫外光部分。以浓度为 10 mg/L、体积为 50 mL 的亚甲基蓝溶液为目标降解物, 加入 5 mg 催化剂。催化反应前, 先暗处搅拌 20 min 以确保达到吸附平衡(图 1)。每隔一段时间, 收集 3 mL 样品, 利用紫外分光光度计检测亚甲基蓝浓度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 孔状 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /PANI 复合催化剂的表征

为了证明 PANI 生长在分散的孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  上, 利用 XRD、FTIR 和 SEM 进行了表征。图 2(a-2)为单相 PANI 的 XRD 图谱, 它至少有 3 个峰, 在  $2\theta$  为 20.42° 和 25.38° 处是 PANI 的特征峰, 在  $2\theta$  为 15° 处衍射峰显示 PANI 具有晶体结构<sup>[10]</sup>。图 2(a-1)为单相

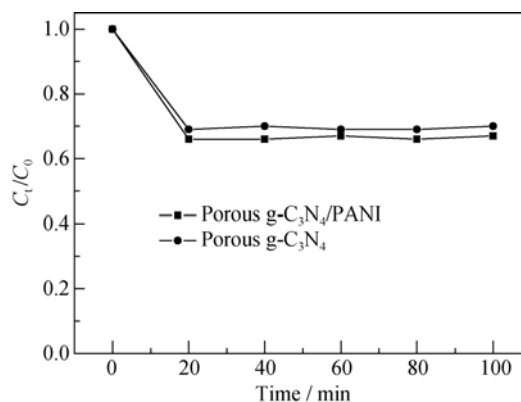


图 1 暗处样品的吸附曲线

Fig. 1 Adsorption of samples under dark conditions

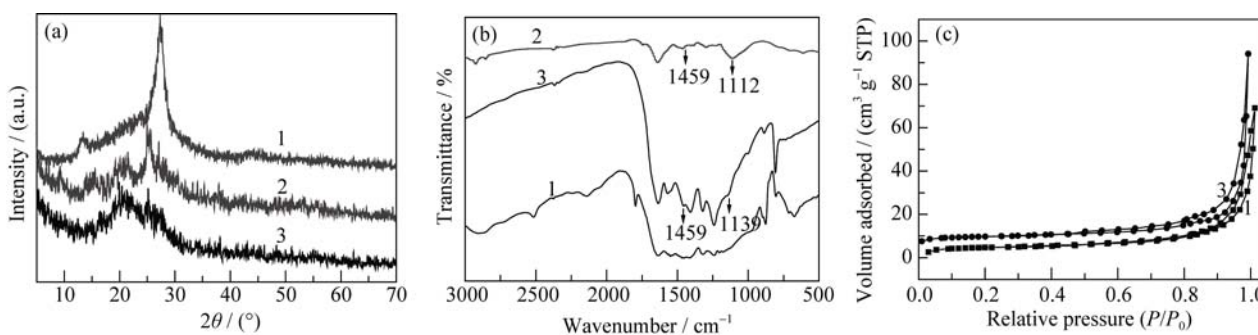


图 2 孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (1)、PANI(2)和孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /PANI 复合材料(3)的 XRD(a), FTIR (b)图谱和氮气吸附曲线(c)

Fig. 2 (a) XRD, (b) FTIR spectra and (c) nitrogen adsorption-desorption isotherms of porous  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  (1), PANI (2), and the porous  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /PANI composite (3)

孔状  $g-C_3N_4$  的 XRD 图谱, 在  $2\theta$  为  $27.5^\circ$  和  $13.1^\circ$  处出现特征衍射峰, 分别对应于 (002) 和 (100) 晶面, 说明产物具有类似石墨的层状结构。对于孔状  $g-C_3N_4$ /PANI 复合材料(图 2(a-3)), 在  $2\theta = 20.12^\circ$  和  $25.26^\circ$  处出现的两个宽广的特征峰, 几乎与聚苯胺的特征峰位置相同。而孔状  $g-C_3N_4$  对应的层状堆垛结构的特征峰消失, 说明孔状  $g-C_3N_4$  没有聚集, 完全作为聚苯胺的基底与其复合。

图 2(b-1) 为单相的孔状  $g-C_3N_4$  红外谱图, 在  $1249\sim 1630\text{ cm}^{-1}$  范围内的吸收峰对应于 C-N 芳环的伸缩振动,  $807\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰对应于 C-N 环的面外伸展振动<sup>[9]</sup>。与单相的孔状  $g-C_3N_4$  相比, 孔状  $g-C_3N_4$ /PANI 复合材料(图 2(b-3)) 的红外谱图中出现两个新峰: 一个在  $1459\text{ cm}^{-1}$  处, 与单相 PANI 中 C=C 伸缩振动位置几乎相同(图 2(b-2)); 另一个在  $1139\text{ cm}^{-1}$  处, 与单相 PANI 中 C-H 伸缩振动相比, 向短波方向移动<sup>[7]</sup>。同时, 孔状  $g-C_3N_4$  中的 C-N 环的面外伸展振动峰变强了。这些结果表明孔状  $g-C_3N_4$  与聚苯胺间存在相互作用。

孔状  $g-C_3N_4$  及其复合材料的氮气吸附曲线如图 2 (c) 所示, 其比表面积分别为  $45.6$  和  $54.3\text{ m}^2/\text{g}$ , 即两者的比表面积相差不大, 这也是两者的吸附性能所差无几的原因(图 1), 因此可以认为孔状结构对复合材料催化性能改善方面没有太大影响。

图 3 为孔状  $g-C_3N_4$ 、聚苯胺和孔状  $g-C_3N_4$ /PANI 复合材料的 SEM 照片。其中孔状  $g-C_3N_4$  的孔状结构存在于每个  $g-C_3N_4$  片上(图 3a, c)。而单相聚苯胺则是一种在  $40\sim 60\text{ nm}$  范围内的棒状结构(图 3b)。当

PANI 与孔状  $g-C_3N_4$  耦合后, 聚苯胺组装在孔状  $g-C_3N_4$  上, 而且不存在单独的孔状  $g-C_3N_4$ , 这说明 PANI 与孔状  $g-C_3N_4$  间存在相互作用<sup>[11]</sup>。这一结果与 XRD 和 FTIR 的表征是一致的。

对于孔状  $g-C_3N_4$ /PANI 复合材料的形成机理可以用图 4 加以说明: 首先, 氧化剂过硫酸铵和孔状  $g-C_3N_4$  存在于水相, 苯胺单体溶解在有机相; 然后, 苯胺开始聚合, 在界面上形成苯胺低聚物, 并逐渐扩散到水相中。由于苯胺低聚物与孔状  $g-C_3N_4$  间的  $\pi-\pi$  相互作用使聚苯胺组装到多孔的  $g-C_3N_4$  上<sup>[12-13]</sup>。当苯胺低聚物进一步聚合, 分子间相互作用变强, 形成了面链接的聚苯胺纳米棒阵列与孔状  $g-C_3N_4$  复合材料。

## 2.2 孔状 $g-C_3N_4$ /PANI 复合催化剂的性能

孔状  $g-C_3N_4$ 、聚苯胺和孔状  $g-C_3N_4$ /聚苯胺复合材料在 Ar 气氛下的 TGA 曲线如图 5(a) 所示。对于聚苯胺(图 5(a-1)) 曲线, 第一失重阶段低于  $100^\circ\text{C}$ , 归因于物理吸附的水分子蒸发。Akhtar 课题组<sup>[14]</sup> 也报道了聚苯胺/金纳米复合材料具有类似的趋势, 在  $100\sim 400^\circ\text{C}$  范围内的失重是由于水分、吸附在聚苯胺上的掺杂剂分子以及低聚物的降解所引起的; 高于  $400^\circ\text{C}$  的失重则主要来源于聚合物分子链的分解。在氩气气氛中, 孔状  $g-C_3N_4$  展现单一的降解过程(图 5(a-3))。与此结果相比, 孔状  $g-C_3N_4$ /聚苯胺复合材料(图 5(a-2)) 不仅比单相 PANI 更耐热, 而且比单相 PANI 和孔状  $g-C_3N_4$  存在更多的焦渣( $883^\circ\text{C}$ )。一些文献介绍了高宽比和高表面物质存在于复合材料中, 可以为气体扩散提供复杂的扩散路径, 从而减少材

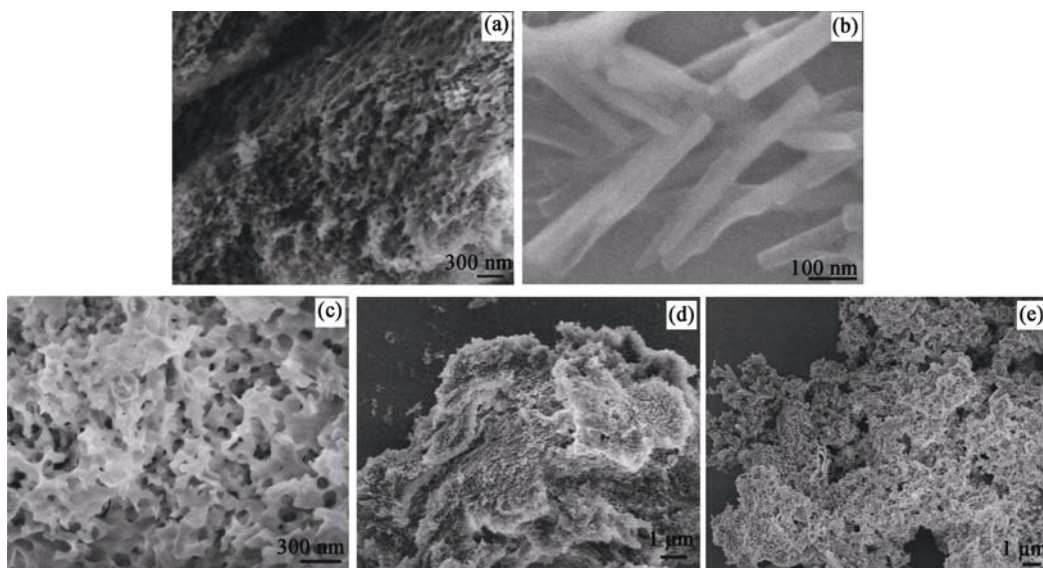
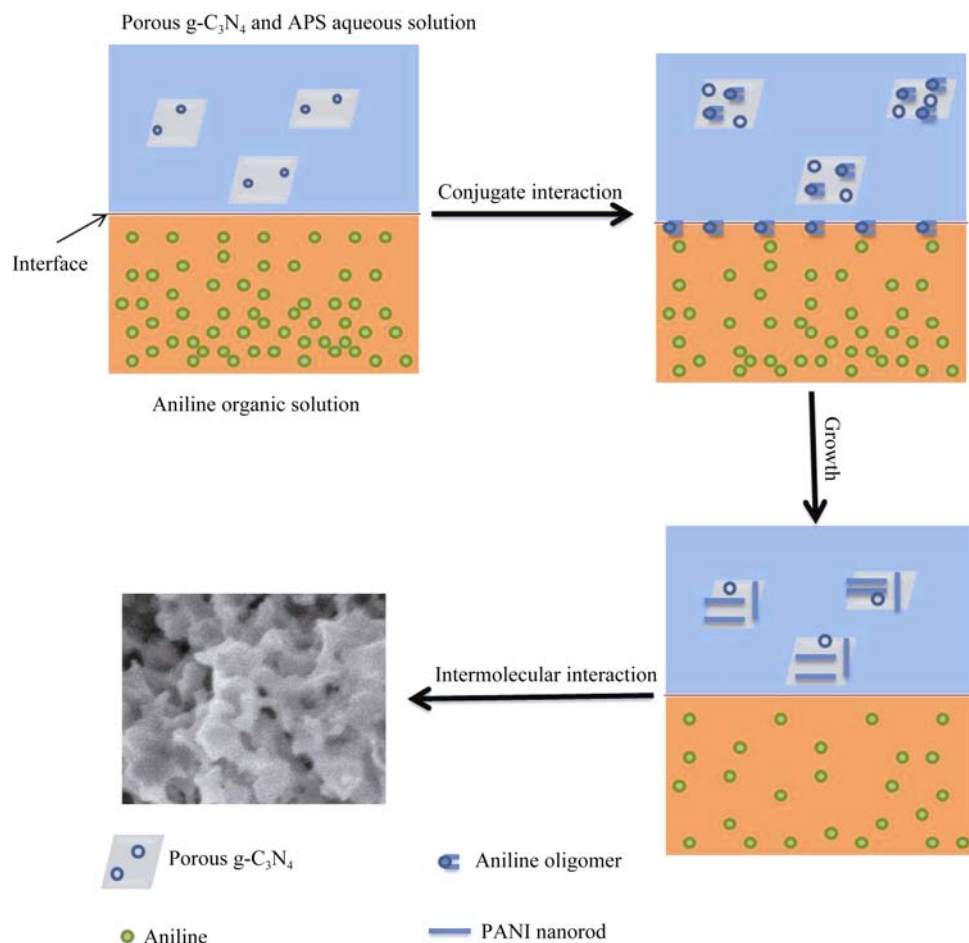


图 3 孔状  $g-C_3N_4$  (a 高倍; d 低倍)、PANI (b) 和孔状  $g-C_3N_4$ /PANI 复合材料(c 高倍; e 低倍)的 SEM 照片  
Fig. 3 Typical SEM images of porous  $g-C_3N_4$  at (high (a) and low (d) magnification), PANI (b), and the porous  $g-C_3N_4$ /PANI composite at (high (b) and low (e) magnification)

图 4 孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /PANI 复合材料的形成过程Fig. 4 Schematic presentation for fabrication of porous  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /PANI composite

料的气体渗透速率<sup>[15]</sup>。而本实验通过界面聚合方法制备的孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /聚苯胺复合材料, 其中孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  以薄片状分散形式存在, 从而起到物理屏障和延迟降解的作用<sup>[16]</sup>。另外, 共轭的相互作用也可以限制聚合物链的热运动, 增加孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /聚苯胺复合材料热降解活化能<sup>[17]</sup>。而孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  又具有较高的热稳定性。因此, 孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /聚苯胺复合材料具有良好的热稳定性。

图 5(b)为样品的可见吸收光谱。与孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  相比(图 5(b-3)), 孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /聚苯胺复合材料(图 5b-2)在整个波长范围内都具有高的光吸收, 这是 PANI 的典型吸收特性<sup>[6]</sup>。复合材料的禁带宽度由 2.41 eV 减少到 2.28 eV(图 5(c))。因此可以推断出, 聚苯胺的引入有利于复合材料吸收更多的可见光, 并可能会改善孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /聚苯胺复合材料的催化活性。

图 5(d)为孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  和 PANI 的莫特-肖特基曲线。两者的导带位置分别为 -1.31 eV 和 -2.11 eV。这说明光生电子可以从 PANI 传到孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ , 即

PANI 的引入利于复合材料的电子分离, 提高催化性能。

孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  和孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /聚苯胺复合材料的瞬态光电流如图 6(a)所示。在每个光照瞬间, 两种样品都表现出迅速的光电流响应, 并有较好的重现性。当辐射被切断, 光电流迅速下降到几乎为零(稳态值)。孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  的瞬态光电流密度小于  $1.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (图 6(a-2)), 而孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /聚苯胺复合材料的超过  $4.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (图 6(a-1)), 比多孔  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  高约 2.58 倍。这一结果表明聚苯胺的引入可以显著改进电荷传输并能抑制复合, 即聚苯胺作为电子传输通道, 转移孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  光生电子<sup>[18]</sup>。

为了进一步了解孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  和孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /聚苯胺复合材料的电荷传输行为, 测量了其电化学阻抗谱(图 6(b))。图中每个圆弧半径表示电荷转移过程。一个更大的半径对应于一个更高的电荷转移电阻<sup>[17]</sup>。对于孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ /聚苯胺复合材料表现出更小的电荷传递电阻, 表明孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  和 PANI 之间的更快的电荷转移。

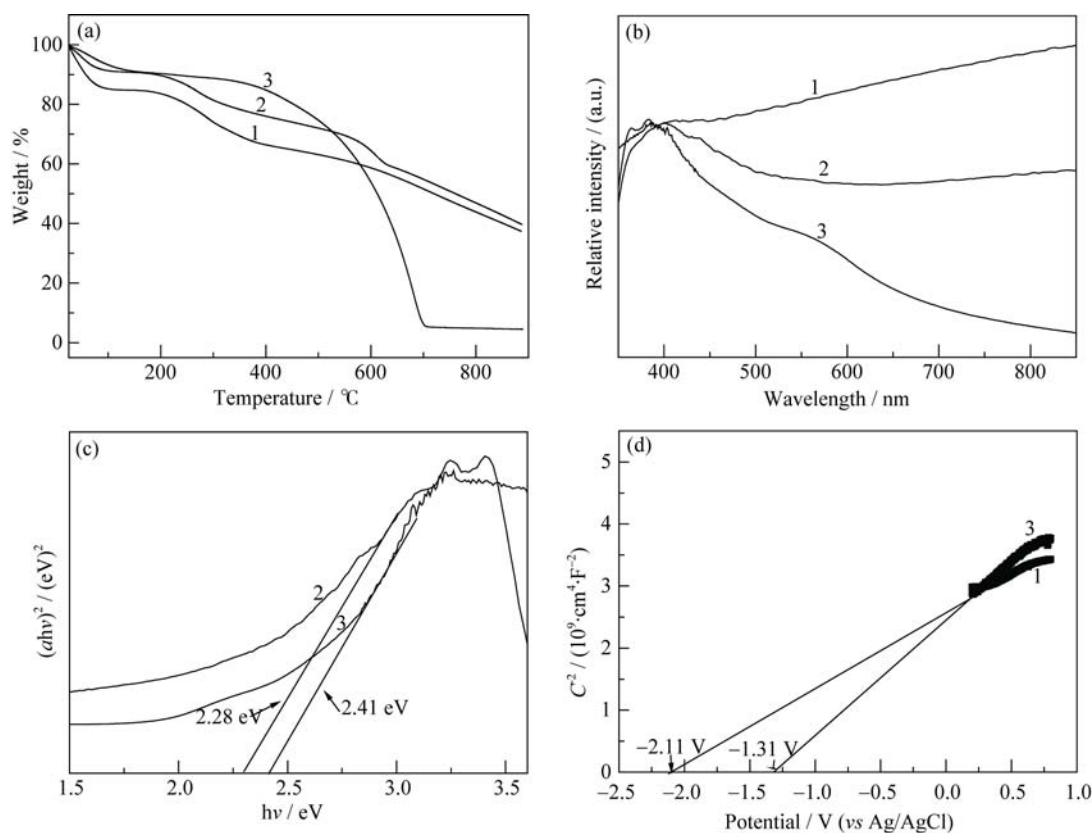


图 5 PANI(1)、孔状  $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{PANI}$  复合材料(2)和孔状  $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (3)的 TGA(a)、UV-Vis(b)、禁带宽度(c)和莫特-肖特基曲线(d)  
Fig. 5 (a) TGA curves, (b) UV-Vis absorption spectrum, (c) plots of  $(\alpha h\nu)^2$  vs photon energy ( $h\nu$ ) for the band gap energy, and (d) Mott-Schottky plots for PANI nanorods (1), porous  $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{PANI}$  composite (2), and porous  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  (3)

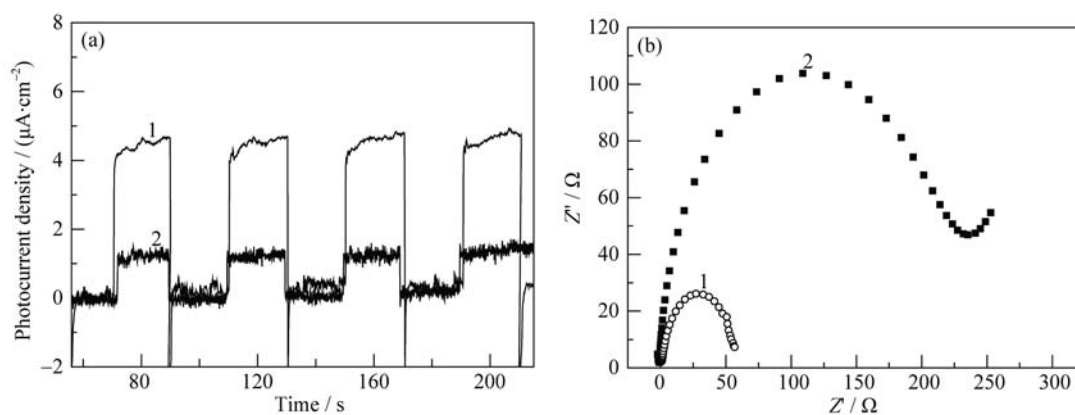


图 6 孔状  $\text{g-C}_3\text{N}_4$ (2)和孔状  $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{PANI}$  复合材料(1)的瞬态光电流(a)和电化学阻抗谱(b)  
Fig. 6 Photocurrent densities (a) and EIS spectra (b) of porous  $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{PANI}$  composite (1) and porous  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  (2)

### 2.3 可见光催化活性

为了评价所合成的催化剂的光催化性能, 在可见光( $>400\text{ nm}$ )照射下, 使用亚甲基蓝溶液作为模拟污染物进行光催化降解实验(图 7(a))。无任何催化剂时, 亚甲基蓝照射 180 min 后的分解率为 5%, 这是由于亚甲基蓝的自然光降解; 当以孔状  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  作为催化剂时, 光照射 120 min 后, 大约 30% 亚甲基蓝降解; 而利用孔状  $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{聚苯胺}$  作为光催化剂时,

70% 亚甲基蓝降解。这种光催化性能的增强, 应归因于孔状  $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{聚苯胺}$  复合材料的增强的可见光利用率、氧化能力和电子输运性能。

两种催化剂对亚甲基蓝降解速率曲线如图 7(b) 所示, 反应都属于一级动力学过程。图中孔状  $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{聚苯胺}$  复合材料对亚甲基蓝的降解速率是孔状  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  的 3.3 倍。这又说明复合材料的有效光吸收增强了其光催化活性。

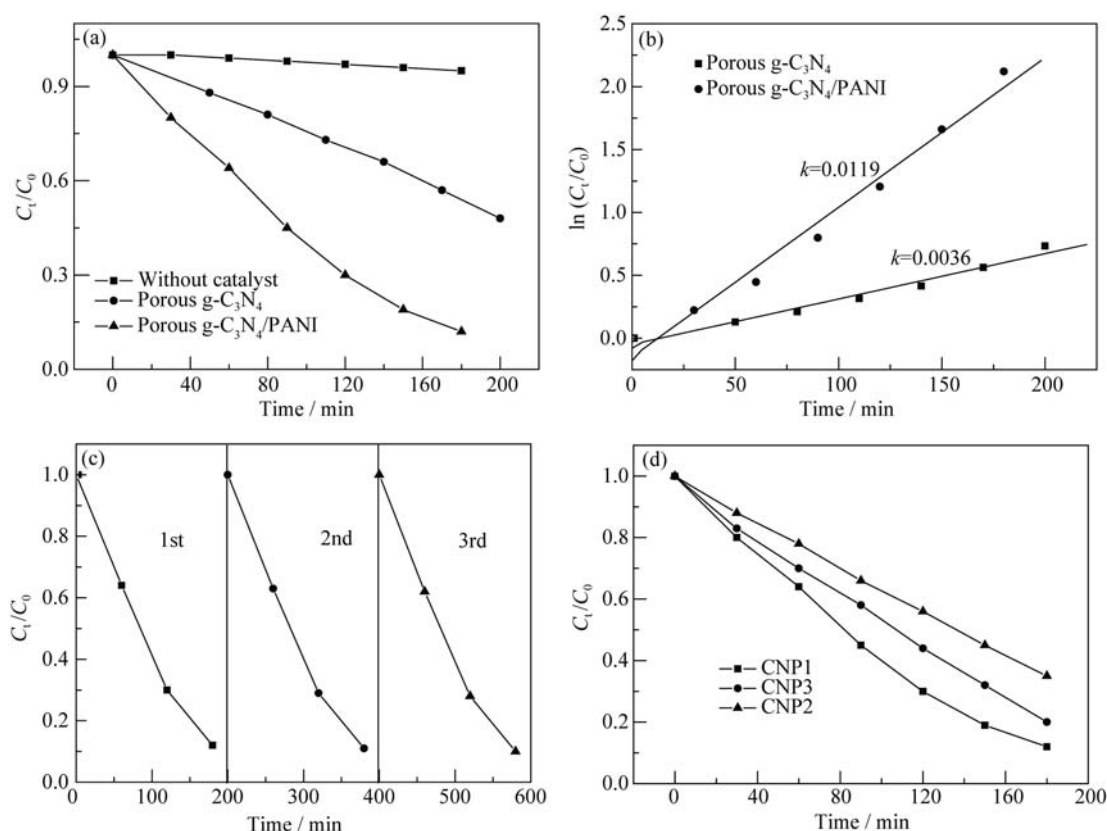


图 7 样品对亚甲基蓝的降解(a)及其  $\ln(C_0/C_t)-t$  曲线(b), 孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{PANI}$  复合材料的光催化稳定性(c), 不同含量的孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{PANI}$  复合催化剂的光催化性能(d)

Fig. 7 Photocatalytic effect of the samples process of photocatalytic degradation of MB under visible light irradiation ( $\lambda > 400 \text{ nm}$ ), (b) first-order plots for the photodegradation of MB, (c) recycle test of porous  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{PANI}$  composite catalyst, and (d) photocatalytic degradation of MB in the presence of different ratio of porous  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{PANI}$

图 7(c)展示了孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{PANI}$  复合材料的光催化稳定性, 每个相同的条件下, 复合材料的光催化性能变化不大, 三次循环后只有小幅下降(2%)。

不同含量的孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{PANI}$  复合催化剂的光催化性能如图 7(d) 所示。所有复合催化剂的催化性能都高于孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ , 然而过多的苯胺单体加入并没有带来更优越的催化性能。这与文献[7]报道的类似, 可能由于苯胺单体的聚集引起电子传导能力的下降, 从而降低了催化性能。

### 3 结论

实验通过界面聚合法合成了孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{PANI}$  复合材料。材料中孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  以薄片状分散, 并在界面上与聚苯胺纳米棒粘附。这种孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{PANI}$  复合结构有利于孔状  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  对 PANI 链段运动的限制及对其降解产物的物理屏蔽, 从而可以提高复合催化剂的热稳定性。此种紧密连接的复合结构也有利于增强材料的可见光利用率、氧化能力和 PANI 的电子输运性能, 提高材料的催化性能。

### 参考文献:

- [1] WANG X, MAEDA K, THOMAS A, *et al.* A metal-free polymeric photocatalyst for hydrogen production from water under visible light. *Nat. Mater.*, 2009, **8**(1): 76–80.
- [2] ZHAN YJ, MORI T, NIU L, *et al.* Non-covalent doping of graphitic carbon nitride polymer with graphene: controlled electronic structure and enhanced optoelectronic conversion. *Energ. Environ. Sci.*, 2011, **4**(11): 4517–4521.
- [3] ZHANG XD, XIE X, WANG H. Enhanced photoresponsive ultra-thin graphitic-phase  $\text{C}_3\text{N}_4$  nanosheets for bioimaging. *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, **135**(1): 18–21.
- [4] WANG XC, CHEN XF, THOMAS A, *et al.* Metal-containing carbon nitride compounds: a new functional organic-metal hybrid material. *Adv. Mater.*, 2009, **21**(16): 1609–1612.
- [5] WANG YJ, SHI R, LIN J, *et al.* Enhancement of photocurrent and photocatalytic activity of ZnO hybridized with graphite-like  $\text{C}_3\text{N}_4$ . *Energ. Environ. Sci.*, 2011, **4**(8): 2922–2929.
- [6] ZHANG S, ZHAO L, ZENG M, *et al.* Hierarchical nanocomposites of polyaniline nanorods arrays on graphitic carbon nitride

- sheets with synergistic effect for photocatalysis. *Catal. Today*, 2014, **224(4)**: 114–121.
- [7] GE L, HAN C, LIU J. *In situ* synthesis and enhanced visible light photocatalytic activities of novel PANI-g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite photocatalysts. *J. Mater. Chem.*, 2012, **22(23)**: 11843–11850.
- [8] HU HAI-XIAN, YUAN CHANG-SONG, CHEN XIANG-YANG. Study on the thermal performance of a bicomponent high performance epoxy resin for advanced composites. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)*, 2012, **34(1)**: 39–42.
- [9] YU Q, LI X, ZHANG M. One-step fabrication and high photocatalytic activity of porous graphitic carbon nitride synthesised via direct polymerisation of dicyandiamide without templates. *Micro Nano Lett.*, 2014, **9(1)**: 1–5.
- [10] POUGET J P, JOZEFOWICZ M E, EPSTEIN A J, *et al.* X-ray structure of polyaniline. *Macromolecules*, 1991, **24(3)**: 779–789.
- [11] RAFIEE M A, RAFIEE J, WANG Z, *et al.* Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content. *ACS Nano*, 2009, **3(12)**: 3884–3890.
- [12] YAN J, WEI T, SHAO B, *et al.* Preparation of a graphene nanosheet/polyaniline composite with high specific capacitance. *Carbon*, 2012, **48(2)**: 487–493.
- [13] XU J J, WANG K, ZU S Z, *et al.* Nanocomposites of polyaniline nanowire arrays on graphene oxide sheets with synergistic effect for energy storage. *ACS Nano*, 2010, **4(9)**: 5019–5026.
- [14] AFZAL A B, AKHTAR M J, NADEEM M, *et al.* Investigation of structural and electrical properties of polyaniline/gold nanocomposites. *J. Phys. Chem. C*, 2009, **113(40)**: 17560–17565.
- [15] KIM H, ABDALA A A, MACOSKO C W. Graphene/polymer nanocomposites. *Macromolecules*, 2010, **43(16)**: 6515–6530.
- [16] BAO C, GUO Y, SONG L, *et al.* Poly(vinyl alcohol) nanocomposites based on graphene and graphite oxide: a comparative investigation of property and mechanism. *J. Mater. Chem.*, 2011, **21(36)**: 13942–13950.
- [17] WANG W, ZHONG Q X. Improved thermal stability of whey protein-maltodextrin conjugates at pH 5.0 by D-Glucose, sucrose, D-cellobiose, and lactose. *Food Hydrocolloids*, 2014, **41(12)**: 257–264.
- [18] HOU Y, ZUO F, DAGG A, *et al.* A three-dimensional branched cobalt-doped a-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanorod/MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> heterojunction array as a flexible photoanode for efficient photoelectrochemical water oxidation. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2013, **52(4)**: 1248–1252.

## 勘 误

掺锶羟基磷灰石的制备与性能研究. 无机材料学报, 2011, **26(1)**: 49-54. 图 5, 不同 Sr 掺杂量样品的 FTIR 图谱应为下图, 特此更正。

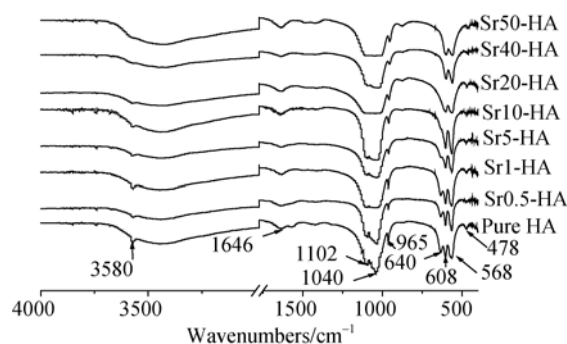


图 5 不同 Sr 掺杂量样品的 FTIR 图谱

Fig. 5 FTIR spectra of samples with various Sr mole fractions