

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2019.04.007

宽光谱吸收 TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 制备 及甲苯降解研究

王少莽^{1,2}, 关 媛³, 陆 武¹, 翁 彭¹, 刘 亮², 李忠玉^{1,3}

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州大学 怀德学院, 江苏 靖江 214500; 3. 常州大学 石油化工学院, 江苏 常州 213164)

摘要: 高效光催化分解挥发性有机化合物的关键在于提高催化剂光生载流子的分离效率。采用 TaON 修饰 BiO_{1.2}I_{0.6}, 获得了一种新型宽光谱吸收富氧缺碘材料 5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6}。研究发现, 5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 显示出优异的光催化分解典型 VOCs 甲苯的活性。经过 300 W 氙灯 24 h 照射, 0.2 g 5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 可以将约 74% 的甲苯降解, 其降解效率为 BiO_{1.2}I_{0.6} 的 1.4 倍。5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 中光生载流子的分离效率显著高于 BiO_{1.2}I_{0.6}, 这极大地增强了它的光催化活性。

关键词: 光催化; 净化; 甲苯

中图分类号: O 611.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2019)04-0045-07

Preparation of TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} with Wide Spectrum Absorption for Purification of Toluene

WANG Shaomang^{1,2}, GUAN Yuan³, LU Wu¹, WENG Peng¹, LIU Liang², LI Zhongyu^{1,3}

(1. School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Changzhou University Huaide College, Jingjiang 214500, China; 3. School of Petrochemical and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: The key to efficient photocatalytic decomposition of volatile organic compounds is to improve carrier separation-efficiency of the photocatalyst. In this work, TaON was used to modify BiO_{1.2}I_{0.6}, thereby obtaining 5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} composites with wide spectrum absorption and oxygen enrichment and iodine deficiency. The 5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} exhibited the optimal photocatalytic activity. About 74% of toluene was degraded over 0.2 g of 5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} after 24 h of irradiation using a

收稿日期: 2018-12-06。

基金项目: 中国博士后基金项目(2017M611784); 江苏省自然科学基金项目(BK20161277); 江苏省高校自然科学基金项目(16KJB610002)。

作者简介: 王少莽(1980—), 男, 江苏淮安人, 博士, 讲师。E-mail: gywsm@cczu.edu.cn

引用本文: 王少莽, 关媛, 陆武, 等. 宽光谱吸收 TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 制备及甲苯降解研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2019, 31(4): 45-51.

300 W xenon lamp, which was 1.4 times that over $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$. Compared to $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$, the distinctly enhanced photocatalytic activity of 5% TaON/ $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ was basically attributed to efficient separation of photo-generated carriers.

Key words: photocatalytic; purification; toluene

随着中国社会经济的高速发展,排放到大气中的 VOCs(挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds))的种类和浓度逐年增加。进入空气中的 VOCs,即使在浓度很低的情况下,其危害程度也非常大,它被喻为人类健康的“隐形杀手”^[1-3]。采用光催化技术净化 VOCs,具有可望利用太阳能、反应条件温和等优点,引起了研究人员的关注^[4-6]。缺少宽光谱吸收高效光催化材料是该技术治理 VOCs 所面临的关键技术问题。

近年来,一种宽光谱吸收的催化剂碘氧化铋(BiOI),在降解有机污染物方面显示出了较高的催化活性和稳定性^[7-9]。 BiOI 带隙约为 1.9 eV,吸收可以覆盖从紫外线到可见光很宽的光谱范围。此外, BiOI 的价带边电位较高约为 2.4 V,具有很强的氧化能力。研究人员后来发现富氧缺碘 $\text{BiO}_x\text{I}_{(3-2x)}$ ($1 < x < 1.5$),如 $\text{Bi}_7\text{O}_9\text{I}_3$ ^[10], $\text{Bi}_4\text{O}_5\text{I}_2$ ^[11], $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}$ ^[12],其光催化活性可以显著增强。本课题组前期采用热分解 BiOI 法成功制备出了一种新型富氧缺碘 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$,其对水中苯胺具有良好的光催化降解活性^[13]。尽管富氧缺碘 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 显示出了良好的光催化活性,但是单一的 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 仍难以高效地降解气相挥发性有机污染物。

许多研究显示,构筑导价带电位匹配的异质结体系可以显著促进光生载流子分离,极大地提高材料的光催化活性。 TaON 是一种良好的可见光响应催化剂,其导带边电位约为 -0.2 V,还原能力强于与 BiOI 导带边电位(约 0.5 V)接近的 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$,而 TaON 的价带边电位(约 2.1 V)又比与 BiOI 价带边电位(约 2.4 V)更深的 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 小,可以和 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 构成带边电位匹配的异质结体系^[14-16]。因此,采用 TaON 与 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 复合,有望获得一种宽光谱吸收高效光催化材料,从而实现对 VOCs 深度净化。

本研究选择 TaON 修饰 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$,构筑一种新型宽光谱吸收富氧缺碘异质光催化材料 $\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 。以典型 VOCs 甲苯为目标污染物,考察 $\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 光催化降解甲苯的活性,探究 $\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 光催化活性增强的机理。

1 实验部分

1.1 材料制备

称取 1 g Ta_2O_5 放入氧化铝坩埚并将其置于管式炉,以 80 mL/min 流量通入 NH_3 ,并以 10 °C/min 的升温速率加热至 850 °C,氮化 10 h,自然冷却至室温,获得土黄色 TaON 。

称取 0.05 g TaON ,将其加入 40 mL 含 1.51 g $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 的乙二醇溶液中,磁搅拌 0.5 h 后,向其中滴入 40 mL 含 0.52 g KI 的乙二醇溶液,继续磁搅拌反应 0.5 h。接着,将其转入 100 mL 高压反应釜并置于烘箱中,160 °C 反应 12 h。自然冷却至室温,样品经过滤、洗涤、80 °C 干燥后放入坩埚,并将其置于马弗炉中,以 5 °C/min 的升温速率加热至 400 °C,焙烧 5 h,自然冷却至室温,获得 5% $\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 。调变 TaON 含量获得不同比例的 $\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 异质光催化材料。

称取 1.55 g $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$,将其加入 40 mL 乙二醇溶液中,磁搅拌 0.5 h 后,向其中滴入 40 mL 含 0.55 g KI 的乙二醇溶液,继续磁搅拌反应 0.5 h。接着,将其转入 100 mL 高压反应釜并置于烘箱中,160 °C 反应 12 h。自然冷却至室温,样品经过滤、洗涤、80 °C 干燥后放入坩埚,并将其置于马弗炉中,以 5 °C/min 的升温速率加热至 400 °C,焙烧 5 h,自然冷却至室温,获得黄色 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 。

1.2 材料表征

采用瑞士 ARL 公司生产的 X'TRA 型 X 射线衍射仪(XRD)对材料的晶型结构进行分析;使用德国蔡司公司生产的 Supra55 型场发射扫描电镜(SEM)对样品的形貌特征进行观察;利用日本 JEOL 公司制造的 JEM-200CX 型透射电子显微镜(TEM)对样品的形貌特征及微结构做进一步的观察;使用美国 Micrometrics 公司生产的 ASP2020 型全自动物理吸附仪测定样品的比表面积和孔径分布;采用日本 Shimadzu 公司的 UV2550 型紫外-可见漫反射光谱研究材料的光吸收性能;利用日本 PHI 5000 Versa-Probe 型 X 射线光电子能谱仪(XPS)分析材料表面元素组成及化学态;采用美国 HORIBA 公司的 Fluoromax-4 荧光光谱仪(PL)表征光生载流子分离效率。

1.3 光催化分解甲苯

称取 0.2 g 催化剂装入 250 mL 石英反应器并加盖密封,然后向反应器中注入一定量的气相甲苯和 50 μ L 水,反应器中甲苯初始质量浓度为 1.23×10^4 mg/m³。避光使甲苯在催化剂表面吸附 1 h 达到吸脱附平衡。接着打开光源(300 W 氙灯)照射,每隔 2 h 用气体采样针抽取 1 mL 样品,利用气相色谱(GC)分析甲苯质量浓度,根据甲苯初始质量浓度及最终质量浓度计算甲苯分解率。

2 结果与讨论

2.1 材料微结构及其光吸收性能

图 1 显示,四方相的 BiOI (PDF # 10-0445) 经过 400 $^{\circ}$ C 焙烧 5 h 后逐渐向正交结构的 Bi₅O₇I (PDF # 40-0548) 转变。由 BiOI 焙烧前后的失重可知,焙烧后得到的富氧缺碘材料为 BiO_{1.2}I_{0.6}。此外,BiO_{1.2}I_{0.6} 在 28.8 $^{\circ}$ 出现 1 条 Bi₅O₇I 所没有的衍射峰,这主要是 BiO_{1.2}I_{0.6} 中碘含量高于 Bi₅O₇I 而氧含量低于 Bi₅O₇I 所产生的新的晶面峰。TaON 的衍射峰与其单斜相 (PDF # 70-1193) 一致。对于 TaON/BiO_{1.2}I_{0.6},TaON 在 29.1 $^{\circ}$ 处出现的衍射峰与 BiO_{1.2}I_{0.6} 在 28.8 $^{\circ}$ 的衍射峰产生相互作用,导致 TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 在 28.8 $^{\circ}$ 处的衍射峰随 TaON 含量的增加出现增强减弱交错现象。XRD 的结果表明 TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 是由正交相的 BiO_{1.2}I_{0.6} 和单斜相的 TaON 构成的异质材料。

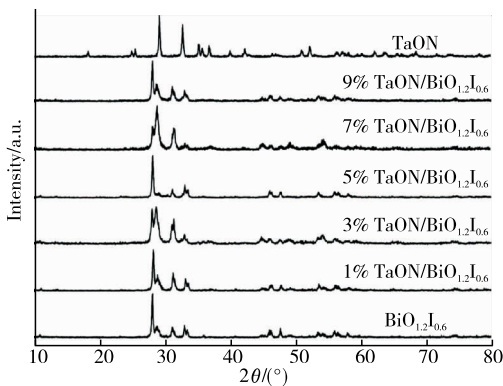


图 1 TaON, BiO_{1.2}I_{0.6} 和 TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 的 X 射线衍射图

样品的形貌及颗粒大小如图 2 所示,TaON 的外形呈多孔的鹅卵石状,粒径大小为 200~500 nm。

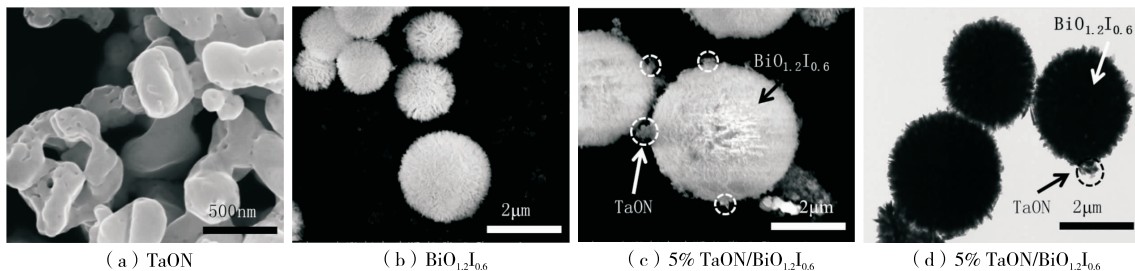


图 2 TaON, BiO_{1.2}I_{0.6} 和 5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 的电镜图

$\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 是由二维纳米片构成的花状微球,微球直径为 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 。由 $5\%\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 的扫描和透射电镜图可以看出, $5\%\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 的形貌类似于 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$,许多TaON小颗粒锚定在其表面,表明TaON/ $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 已经被成功地制备,这与XRD表征结果一致。

利用XPS分析材料的元素组成和价态,由图3可知,在TaON中检测出Ta、O、N 3种元素,这与其元素组成一致。 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 的元素组成分析显示样品中同时存在Bi、O、I 3种元素,这确定BiOI经过 $400\ ^\circ\text{C}$ 焙烧5 h后并未转变为 Bi_2O_3 。在 $5\%\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 的表面仅测出Ta、O、Bi和I 4种元素,表面N元素未被测出,这主要由于 $5\%\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 表面富氧引起。由TaON在 $400\ ^\circ\text{C}$ 焙烧5 h后的X射线衍射图可知,TaON的晶体结构并未改变,这可以证实TaON/BiOI复合物在焙烧过程中TaON是稳定的。TaON中 $\text{Ta}4f_{7/2}$ 和 $\text{Ta}4f_{5/2}$ 的结合能分别为25.7、27.5 eV, $\text{O}1s$ 和 $\text{N}1s$ 的结合能分别为530.5、396.7 eV,这与 Ta^{5+} 、 O^{2-} 、 N^{3-} 的化学环境一致。同样在 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 中, $\text{Bi}4f_{7/2}$ 和 $\text{Bi}4f_{5/2}$ 的结合能分别为158.8、164.1 eV, $\text{O}1s$ 的结合能为530.0 eV, $\text{I}3d_{5/2}$ 和 $\text{I}3d_{3/2}$ 的结合能分别为619.1、630.5 eV,这分别对应 Bi^{3+} 、 O^{2-} 和 I^- 的结合能。而 $5\%\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 中 $\text{Ta}4f_{7/2}$ (26.0 eV)和 $\text{Ta}4f_{5/2}$ (28.9 eV)结合能相较于TaON向高能方向微移,而其 $\text{O}1s$ (530.4 eV)的结合能较TaON向低能方向有所微移,这主要是由 $5\%\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 表面富氧造成Ta周围电子密度降低,O周围电子屏蔽作用增强所引起。此外, $5\%\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 中 $\text{Bi}3d_{5/2}$ (159.2 eV)和 $\text{Bi}3d_{3/2}$ (164.5 eV), $\text{O}1s$ (530.4 eV), $\text{I}3d_{5/2}$ (619.2 eV)和 $\text{I}3d_{3/2}$ (630.7 eV)的结合能分别较 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 向高能方向微移,这主要是TaON和 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 之间相互作用导致 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 中 $\text{Bi}4f$ 、 $\text{O}1s$ 和 $\text{I}3d$ 周围电子密度降低所致。XPS表征结果进一步证实,TaON、 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 和 $\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 被成功地制备,且TaON和 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 之间存在化学作用。

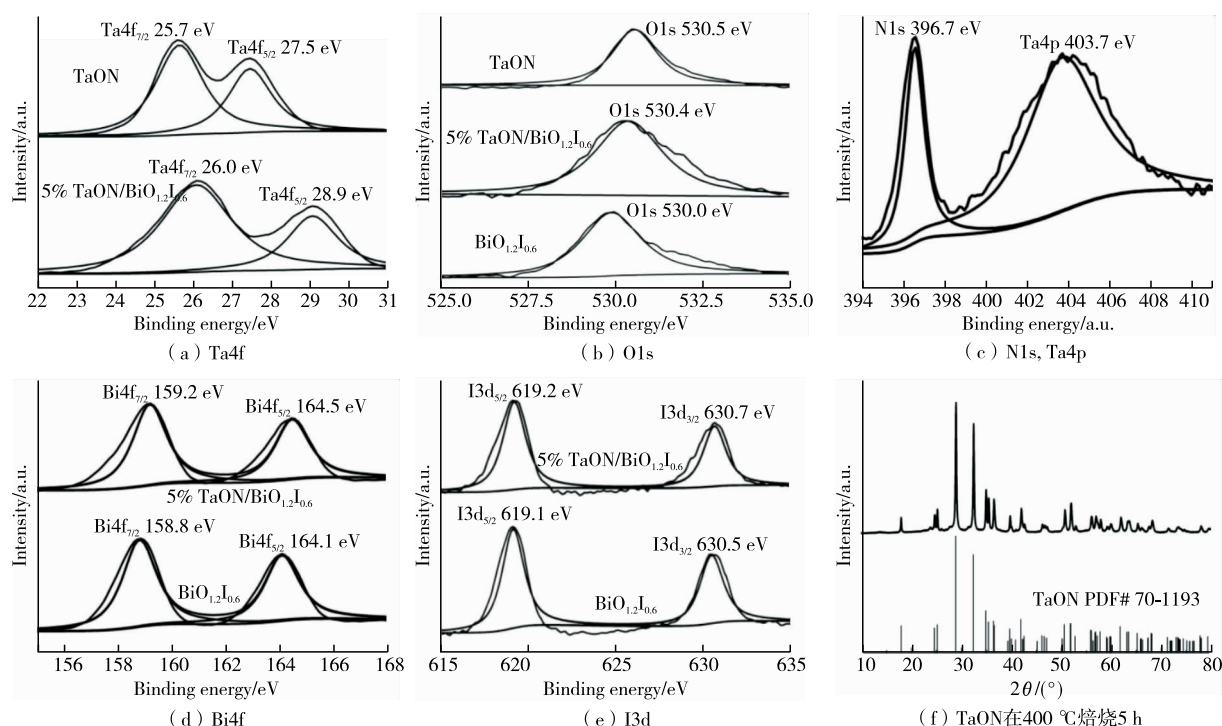


图3 TaON、 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 和 $5\%\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 的X射线电子能谱及TaON在 $400\ ^\circ\text{C}$ 焙烧5 h后的X射线衍射图

从图4可以看出,TaON是一种良好的可见光吸收材料,其最大吸收波长为600 nm。 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 也是一种可见光吸收良好的材料,可以吸收波长小于525 nm的光。 $\text{TaON}/\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 复合物最大光吸收范围位于525~600 nm之间,证实TaON/ $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 是一种宽光谱吸收的异质材料。

2.2 光催化性能测试

从图 5 可看出,甲苯质量浓度随着光照时间的延长而逐渐下降,TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 异质材料的光催化分解甲苯的活性高于单一的 BiO_{1.2}I_{0.6} 和 TaOH,其中 5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 展示出最高的光催化活性。经过 24 h 照射,TaOH 仅可将 50% 的甲苯降解,BiO_{1.2}I_{0.6} 降解了 54%,而在同样的条件下,5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 可降解 74% 的甲苯。

为了考察 5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 的稳定性,每一轮降解完后将反应器排空,再次密封后注入甲苯,进行新一轮降解反应。结果如图 6 所示,5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 循环使用 3 次,其降解甲苯的活性并没有明显下降,表明 5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 的稳定性良好。

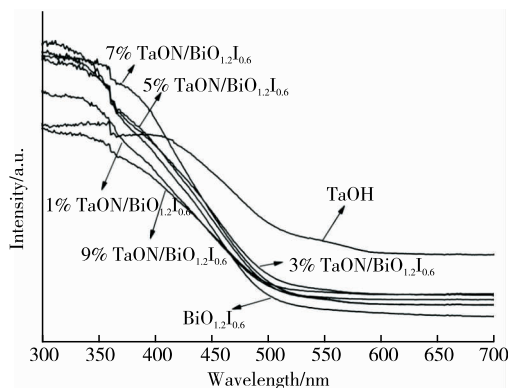


图 4 TaOH, BiO_{1.2}I_{0.6} 和 TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 紫外-可见漫反射光谱

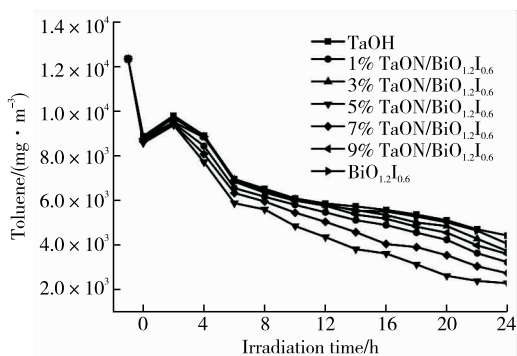


图 5 TaOH, BiO_{1.2}I_{0.6} 和 TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 光催化分解甲苯活性

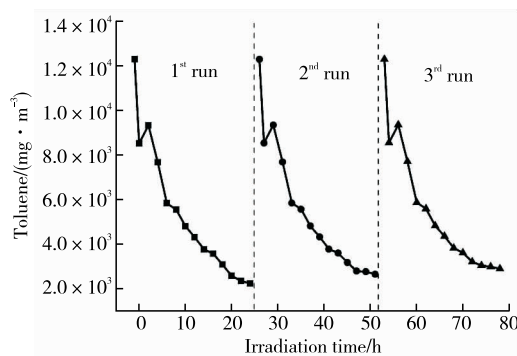


图 6 5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 循环使用 3 次降解甲苯的活性

2.3 光催化活性增强机理

气相光催化反应是在催化剂表面进行,污染物有效地吸附在催化剂表面是实现其高效降解的前提。由图 7 可知,BiO_{1.2}I_{0.6}, 5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 的 N₂ 吸附-脱附等温线与 IV 型等温线一致,均有明显的滞后环,说明 BiO_{1.2}I_{0.6}, 5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 为介孔材料。BJH 孔径分析显示,BiO_{1.2}I_{0.6}, 5% TaON/

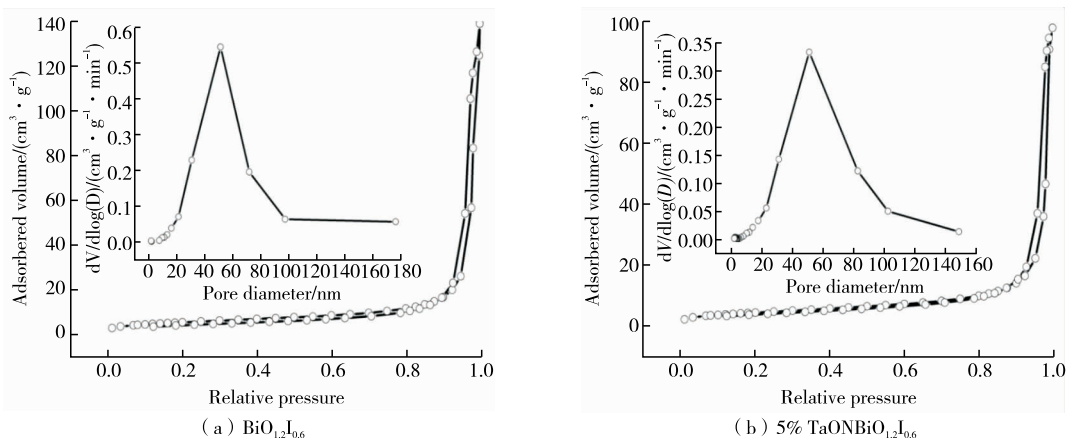


图 7 BiO_{1.2}I_{0.6} 和 5% TaON/BiO_{1.2}I_{0.6} 的 N₂ 吸附-脱附等温线及孔径分布曲线

$\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 的平均孔径分别为 42.2, 35.3 nm, 这与吸附-脱附等温线所显示的介孔特征一致。BET 分析显示, $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$, 5% TaON/ $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 的比表面积分别为 19.5, 16.3 m^2/g 。 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 和 5% TaON/ $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 的孔径及比表面相差较小, 因此两者的光催化活性受比表面和孔径的影响较小。

光催化剂中光生电子-空穴对的有效分离和迁移是其光催化活性增强的关键。为研究 TaON/ $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 中光生载流子的分离和迁移效率, 通过下面的公式预测 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 的导带电位。

$$E_c = \chi - E^0 - \frac{1}{2} E_g \quad (1)$$

$$E_v = E_c + E_g \quad (2)$$

$$\chi = (\chi(A)^a \cdot \chi(B)^b \cdot \chi(C)^c)^{\frac{1}{a+b+c}} \quad (3)$$

式中: E_c 和 E_v 分别为 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 的导带和价带电位; E^0 为自由电子相对于氢电极的能量等于 4.5 eV; E_g 为 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 的带隙约等于 2.36 eV; χ 是 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 的电负性, 可以利用其组成原子的绝对电负性几何平均获得, 其中 $\chi(\text{Bi}) = 4.69$ eV, $\chi(\text{O}) = 7.54$ eV, $\chi(\text{I}) = 6.76$ eV, $a(\text{Bi}) = 3$, $b(\text{O}) = 2$, $c(\text{I}) = 1$ 。由式(1)~式(3)可知, $\chi(\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}) = 5.87$ eV, $E_c = 0.2$ V, $E_v = 2.6$ V。而 TaON 的导带电位分别约为 -0.2, 2.1 V。如图 8 所示, 当 TaON 和 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 形成异质结在光激发下, TaON 导带中的电子将向 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 导带迁移, 而 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 价带中空穴将向 TaON 价带分散, 进而从空间上实现 TaON/ $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 中载流子有效分离, 实现其光催化活性显著增强。

利用荧光光谱表征 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 和 5% TaON/ $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 中光生电子-空穴对分离效率。荧光强度越高表明其光生载流子分离效率越低。由图 9 可知, 在 400 nm 波长的光激发下 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 在大约 525 nm 处发射 1 条荧光很强的峰, 而 5% TaON/ $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 在大约 527 nm 处发射的荧光峰显著低于 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 。荧光光谱结果表明, 5% TaON/ $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 中光生电子-空穴的分离效率显著高于 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$, 从而展示显著增强的光催化活性, 这与计算预测的结果一致。

3 结 论

利用溶剂热耦合热分解法成功制备了一种新型宽光谱吸收异质光催化材料 TaON/ $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 。经 5% TaON 修饰后的 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$, 光生载流子的分离效率显著提高, 显示出最优的光催化分解甲苯的活性。经过 300 W 氙灯照射 24 h 后, 可以将 74% 的甲苯降解, 其降解率为 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 的 1.4 倍。三轮循环降解甲苯结果显示该复合材料稳定性良好。这项作为开发宽光谱吸收高效净化 VOCs 的催化剂提供了理论依据。

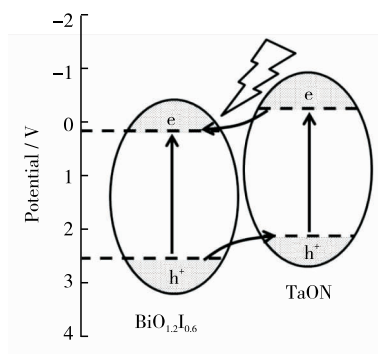


图 8 TaON/ $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 中光生载流子的分离和迁移示意图

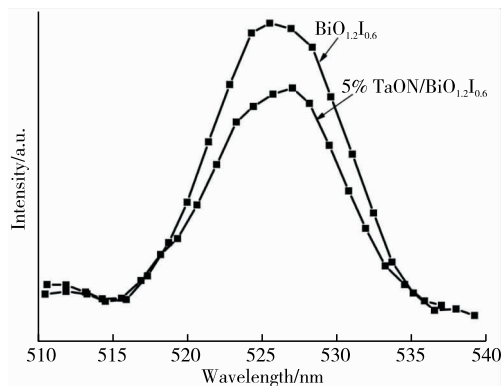


图 9 $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 和 5% TaON/ $\text{BiO}_{1.2}\text{I}_{0.6}$ 荧光光谱

参考文献:

- [1] SARMA S N, KIM Y J, RYU J C. Gene expression profiles of human promyelocytic leukemia cell lines exposed to volatile organic compounds[J]. *Toxicology*, 2010, 271(3): 122-130.
- [2] GUO H, LEE S C, CHAN L Y, et al. Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in different indoor environments[J]. *Environmental Research*, 2004, 94(1): 57-66.
- [3] SEXTON K, ADGATE J L, RAMACHANDRAN G, et al. Comparison of personal, indoor, and outdoor exposures to hazardous air pollutants in three urban communities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(2): 423-430.
- [4] XIE H, LIU B S, ZHAO X J. Facile process to greatly improve the photocatalytic activity of the TiO₂ thin film on window glass for the photodegradation of acetone and benzene [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 284: 1156-1164.
- [5] JANSSON I, SUÁREZ S, GARCIA-GARCIA F J, et al. Zeolite-TiO₂ hybrid composites for pollutant degradation in gas phase[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 178: 100-107.
- [6] BIANCHI C L, GATTO S, PIROLA C, et al. Photocatalytic degradation of acetone, acetaldehyde and toluene in gas-phase: comparison between nano and micro-sized TiO₂ [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2014, 146: 123-130.
- [7] XIAO X, ZHANG W D. Facile synthesis of nanostructured BiOI microspheres with high visible light-induced photocatalytic activity[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, 20(28): 5866-5870.
- [8] WANG Y N, DENG K J, ZHANG L Z. Visible light photocatalysis of BiOI and its photocatalytic activity enhancement by in situ ionic liquid modification[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2011, 115(29): 14300-14308.
- [9] LI Y Y, WANG J S, YAO H C, et al. Efficient decomposition of organic compounds and reaction mechanism with BiOI photocatalyst under visible light irradiation[J]. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2011, 334(1/2): 116-122.
- [10] XIAO X, HAO R, ZUO X X, et al. Microwave-assisted synthesis of hierarchical Bi₇O₉I₃ microspheres for efficient photocatalytic degradation of bisphenol-A under visible light irradiation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 209: 293-300.
- [11] XIAO X, XING C L, HE G P, et al. Solvothermal synthesis of novel hierarchical Bi₄O₅I₂ nanoflakes with highly visible light photocatalytic performance for the degradation of 4-tert-butylphenol [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2014, 148/149: 154-163.
- [12] SUN S M, WANG W Z, ZHANG L, et al. Visible light-induced efficient contaminant removal by Bi₅O₇I[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(6): 2005-2010.
- [13] GUAN Y, WANG S M, WANG X, et al. Solvothermal method coupled with thermal decomposition for synthesis of non-stoichiometric BiO_{1.18}I_{0.64} with excellent photocatalytic activity[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(4): 2641-2650.
- [14] YAN S C, LYU S B, LI Z S, et al. Organic-inorganic composite photocatalyst of g-C₃N₄ and TaON with improved visible light photocatalytic activities[J]. *Dalton Transactions(Cambridge, England; 2003)*, 2010, 39(6): 1488-1491.
- [15] HOU J G, WANG Z, KAN W B, et al. Efficient visible-light-driven photocatalytic hydrogen production using CdS@TaON core-shell composites coupled with graphene oxide nanosheets[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(15): 7291-7299.
- [16] CHUN W J, ISHIKAWA A, FUJISAWA H, et al. Conduction and valence band positions of Ta₂O₅, TaON, and Ta₃N₅ by UPS and electrochemical methods[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2003, 107(8): 1798-1803.

(责任编辑:李艳)