第 48 卷第 10 期
2020 年 10 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 10
October，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200313

有机羧酸改性对 BiOCl 粉体的光催化性能的影响

陈昌燕[1]，王婷婷[1]，侯建华[1,2]，曹传宝[3]

(1. 扬州大学环境科学与工程学院，江苏 扬州 225000；2. 江苏省固体有机废物资源利用协同创新中心，南京 210095；
3. 北京理工大学材料科学与工程学院，北京 100081)

摘 要：通过简易的共沉淀法在室温条件下制备了具有高效光催化活性的纳米微球 BiOCl。加入的有机羧酸使严重团聚纳米片状结构的 BiOCl，逐渐转变为由纳米片组装的不规则纳米微球结构。与此同时由于有机酸的腐蚀作用，使 BiOCl 纳米片表面产生了大量的微介孔结构，增大了 BiOCl 的比表面积，为污染物的吸附和光催化提供了更多的活性位点，其中，酒石酸(TA)和柠檬酸(CA)改性的 BiOCl，其 Lambert-Beer law 法的比表面积由 106.90 m²/g (纯 BiOCl)分别提高至 469.93 m²/g (BiOCl-TA)和 646.82 m²/g (BiOCl-CA)。有机羧酸改性后的材料(BiOCl-TA 和 BiOCl-CA)光催化降解性能显著增强，在 30 min 内可以有效降解 99.74%的罗丹明 B(RhB)(20 mg/L)，远大于纯 BiOCl 的 14.83%。

关键词：氯氧化铋；共沉淀法；纳米微球；羧酸改性；光催化
中图分类号：O 614.53；O 472.3　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)10–1597–07
网络出版时间：2020–07–27



Effect of Organic Carboxylic Acid Modification on Photocatalytic Performance of BiOCl Powder

CHEN Changyan[1], *WANG Tingting*[1], *HOU Jianhua*[1,2], *CAO Chuanbao*[3]
(1. School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225000, Jiangsu, China;
2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A nano-sphere material of BiOCl with a high photocatalytic efficiency was prepared by a simple coprecipitation method at room temperature. The addition of organic carboxylic acid can cause BiOCl to form a seriously agglomerated nanosheet structure, and then gradually transform into an irregular nanomicrosphere structure assembled from nanosheets. Also, the micro-mesoporous structures are formed on the surface of BiOCl nanosheets due to the corrosive effect of organic acids, thus increasing the specific surface area of BiOCl materials and providing the more active sites for the adsorption of pollutants and photocatalysis. Among them, the specific surface area of BiOCl modified with tartaric acid (TA) and citric acid (CA) are 469.93 m²/g (BiOCl-TA) and 646.82 m²/g (BiOCl-CA), respectively, compared to that of pure BiOCl (106.90 m²/g). The photocatalytic degradation performance of the materials modified by organic carboxylic acid (*i.e.*, BiOCl-TA and BiOCl-CA) enhances, and the degradation percentage of rhodamine B (RhB) (20 mg/L) in 30 min is 99.74%, which is greater than that of pure BiOCl (*i.e.*, 14.83%).

Keywords: bismuth oxychloride; co-precipitation method; nanospheres; carboxylic acid modification; photocatalysis

收稿日期：2020–05–07。　修订日期：2020–06–05。
基金项目：国家自然科学基金(51602281)；江苏省自然科学基金(BK20160473)；扬州大学自制实验仪器设备专项经费资助(YZUZZ2019-17)；扬州大学“高端人才支持计划”；扬州大学本科专业品牌化建设与提升工程资助项目；扬州大学江都高端装备工程技术研究院项目(YDJD201705)；扬州大学科技创新培育基金(2019CXJ092)；扬州大学实验室环保与智能装备研究所项目(2018SQKF07)。
第一作者：陈昌燕(1997—)，女，本科。
通信作者：侯建华(1984—)，男，博士，副教授。

Received date: 2020–05–07.　**Revised date:** 2020–06–05.
First author: CHEN Changyan (1997–), female, Undergraduate.
E-mail: 2737440595@qq.com
Correspondent author: HOU Jianhua (1984–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: jhhou@yzu.edu.cn

近年来，BiOCl 因物理化学性质稳定，制备方法简单多样而被广泛研究用于污水处理和环境净化等方面[1]。BiOCl 晶体结构是由沿着 *c* 轴方向的 $[Bi_2O_2]^{2+}$内层结构和 Cl^-双离子层交替排列形成[2]，所以 BiOCl 多呈现出易于堆叠的纳米片状结构[3]。许多方法被研发用于改善 BiOCl 的反应界面和量子效率，形态结构、氧空位和杂化结构的调节等可以增强光利用效率和光催化活性[4]。分层结构的组装(如：1D 纳米棒/2D 纳米片，0D/3D 花状，核–壳微粒异质结)可以提高光收集能力并加快光诱导载体的分离[4–5]，其中通过一锅法原位自模板技术掺杂生物炭制备的仿生银耳状或灯笼状碘氧化铋表现出优异的光催化性能[6]。Yu 等[7]通过简单的水热工艺制备的新型 SiO_2/BiOCl 复合材料改善了 BiOCl 的表面质地和界面，对苯酚、双酚 A (BPA)、罗丹明 B (RhB)等有机污染物的降解具有良好的光催化活性和稳定性。Reza 等[8]采用简单的化学共沉淀法合成了一种新型的磁性可回收 Fe_3O_4@SiO_2–BenzIm- Fc[Cl]/BiOCl 纳米复合材料，在超声辅助作用下对不同色氨酸类似物表现出高效催化活性。另一方面，表面修饰，例如引入表面配合物或氧缺陷等，被认为是有效改善光催化活性的简易方法，因为光的吸收和光催化反应经常发生在半导体材料的表面[9]。Tian 等[10]设计了一种简便的合成方法，成功制备了一系列具有超强吸附性能的等离子体效应和快速界面电荷迁移的中空介孔 SiO_2-BiOCl@PANI@Pd (HBPP)光催化剂，这种催化剂可以有效地促进反应物分子的转移，同时其内部孔洞的存在可以有效地延长辐照光多次反射的作用时间，提高可见光利用效率。Ye 等[11]报道了通过一步水解花状分子前体($Bi_n(Tu)_xCl_{3n}$, Tu=硫脲)来获得沿{001}晶面生长的 BiOCl 纳米片，通过调节分子前体中 Tu 的进料比来获得氧空位，增强光催化活性(在 32 min 内可降解 81% RhB)。

以上实验研究对改善 BiOCl 纳米片严重重叠和光生载流子复合问题都有一定的效果，但大部分材料的制备需要较为复杂的合成步骤，因此寻求一种更加简便、节能的制备工艺仍然是一个巨大的挑战。本工作通过在 BiOCl 生长过程中加入有机羧酸调控纳米片堆积方式制备出不规则的三维纳米微球结构，显著提高了 BiOCl 的比表面积和光利用效率，在 30 min 内可以有效降解 99.74% RhB (20 mg/L)，为降解有机染料 RhB 提供了一种新的方法。

1 实验

1.1 BiOCl 的制备

实验试剂均为分析纯，无需进一步纯化。首先，取 4 个 1 L 的圆底烧瓶，分别加入体积比为 1:1 的蒸馏水和乙二醇(各 100 mL)在室温水浴条件下搅拌混合均匀。然后，加入 0.01 mol $Bi(NO_3)_3·5H_2O$，搅拌 20 min 后加入 0.01 mol KCl 以形成均匀的反应溶液。接着，在连续搅拌下分别以滴定的方式向其中的 3 个烧瓶滴加 100 mL 0.2 mol/L 的不同酸[硼酸(BA)，酒石酸(TA)和柠檬酸(CA)]。之后，将 300 mL 蒸馏水逐滴加入各烧瓶中。水浴搅拌 1 h 后，将混合物过滤以获得固体产物，然后将其用蒸馏水和乙醇洗涤 3 次。最后，在 60 ℃干燥 12 h。这 3 个样品分别被命名为样品 BiOCl-BA (硼酸改性的 BiOCl)，样品 BiOCl-TA (酒石酸改性的 BiOCl)和样品 BiOCl-CA (柠檬酸改性的 BiOCl)。采用同样的方法制备纯 BiOCl (样品 BiOCl)作为空白对照。

1.2 表征仪器

实验所用仪器包括：X 射线衍射仪(XRD，AXS D8 ADVANCE，德国 Bruker)，Cu K_α(λ= 0.154 06 nm)扫描速率为 6(°)/min；X 射线光电子能谱仪(XPS，ESCALAB250Xi，美国 Thermo Fisher Scientific)；扫描电子显微镜(SEM，S-4800，Hitachi)；紫外–可见光漫反射质谱仪(UV-Vis DR，TU-1901，北京普析通用仪器)；Brunauer-Emmett-Teller (BET)测试仪(ASAP 2460，美国 Micromeritics)；光化学反应仪(XPA-7，南京胥江机电厂)。

1.3 光催化降解作用测试

使用 500 W Xe 灯(未加滤光片)来评估光催化降解 RhB 的性能。首先在试管中分别加入 20 mg 的合成 BiOCl 材料，然后加入 50 mL RhB (20 mg/L)溶液，将混合装置在黑暗中充分搅拌混合 1 h。达到吸附平衡后，打开 Xe 灯，使 BiOCl 在垂直光照条件下对 RhB 进行催化降解。每隔 5 min 取一次样，对样品进行 3 次离心过滤得到上清液，将上清液通过紫外–可见分光光度计测量在不同时间降解后的 RhB 的吸光度，根据 Lambert-Beer 公式求出降解率：

$$X=(1-c_t/c_0)\times100\%=(1-A_t/A_0)\times100\% \quad (1)$$

其中：c_0 和 c_t 分别代表在光照射下初始时刻和 t 时的污染物浓度；A_0 和 A_t 分别代表相应时间的 RhB 的吸光度值[12]。

2　结果与讨论

通过 XRD 来表征样品的晶体结构并探究了各种酸对 BiOCl 结晶度的影响，计算表明样品 BiOCl-BA，样品 BiOCl-TA，样品 BiOCl-CA 的结晶度分别为：75.88%，52.95%，48.75%，可见随着酸性的增强，结晶度逐渐降低。图 1a 中 4 种材料的衍射峰与 BiOCl 的标准卡片相符(JCPDS 06-0249)，并且无其他特征峰出现，表明均为 BiOCl 材料，其中，2θ=11.98°，24.10°，25.86°，32.50°，33.45°，40.89°，46.64°，54.10°，58.60°的峰分别对应四方 BiOCl 晶体的(001)，(002)，(101)，(110)，(102)，(112)，(200)，(211)，(212)晶面。XPS 能谱(图 1b)表明 BiOCl 由 Bi，O 和 Cl 元素组成，同时表面引入少量的碳元素。如图 1c 所示，BiOCl 在 284.9，286.8，288.5 eV 的结合能分别对应 C—C，C—O 和 C=O，表明晶体表面吸附了一定量的有机羧酸[13]。图 1d 中 Bi $4f_{7/2}$ 和 Bi $4f_{5/2}$ 的结合能分别位于 159.3 eV 和 164. 6 eV，说明存在 Bi^{3+}离子[14]，其中样品 BiOCl-TA，样品 BiOCl-CA 向更高的结合能方向偏移 0.1~0.3 eV，这可能是因为有机羧酸失去 H^+后表现为负电中心对 Bi^{3+}的静电作用而导致[4,15]。图 1e 中峰值在 530.2，531.6 eV 和 532.9 eV 处的结合能分别对应 Bi—O，氧空位和吸附水分子(O—H)。与样品 BiOCl 相比，

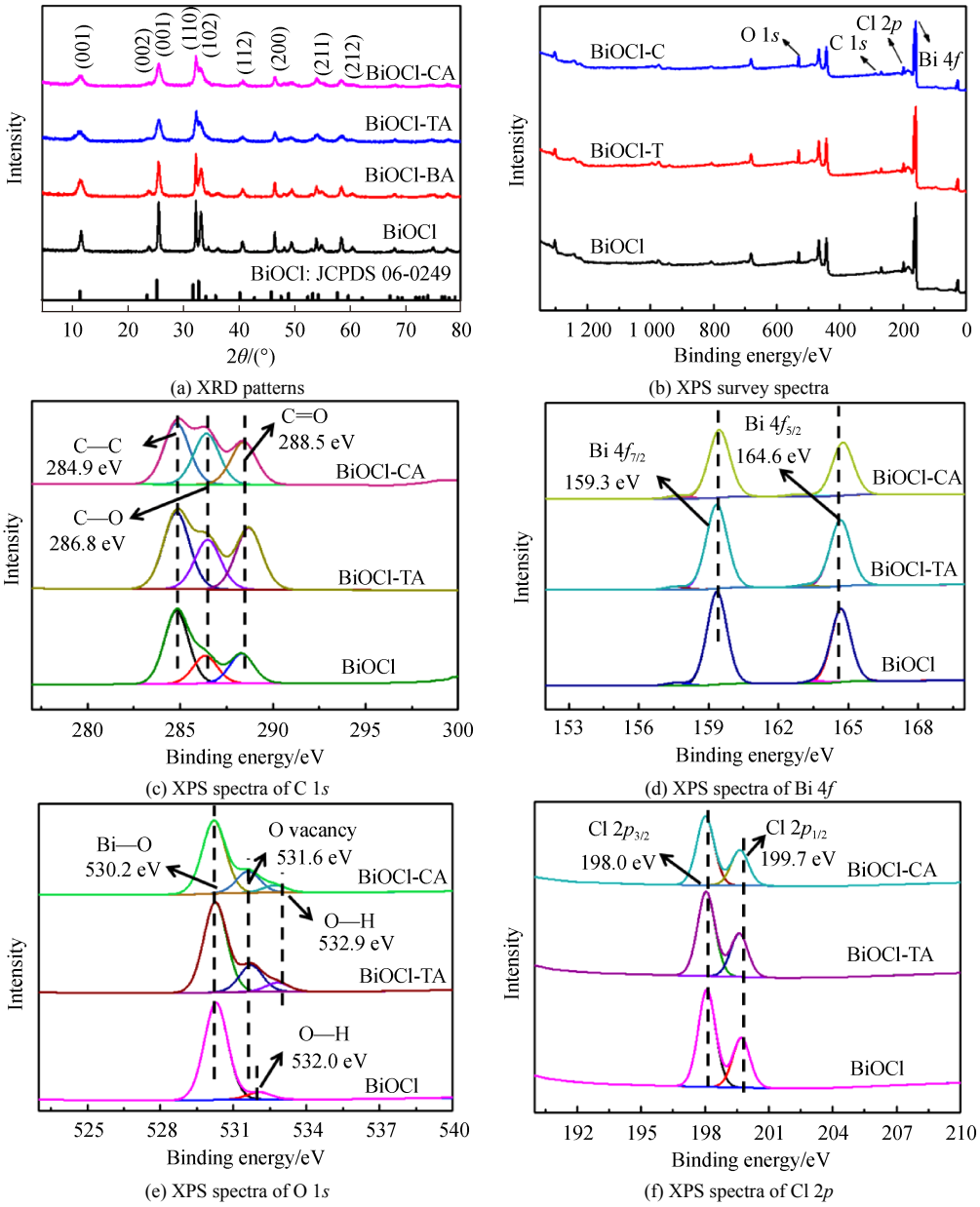


图 1　样品的 XRD 谱和 XPS 谱

Fig. 1　XRD patterns and XPS spectra of samples

样品BiOCl-TA和样品BiOCl-CA表面含有大量的氧空位，同时受表面氧空位的影响，样品 BiOCl-TA，样品 BiOCl-CA 的 O—H 结合能增大 0.9 eV[16]。图 1f 中的 2 个峰为 198.0 eV 和 199.7 eV，分别对应于 Cl $2p_{3/2}$ 和 Cl $2p_{1/2}$。

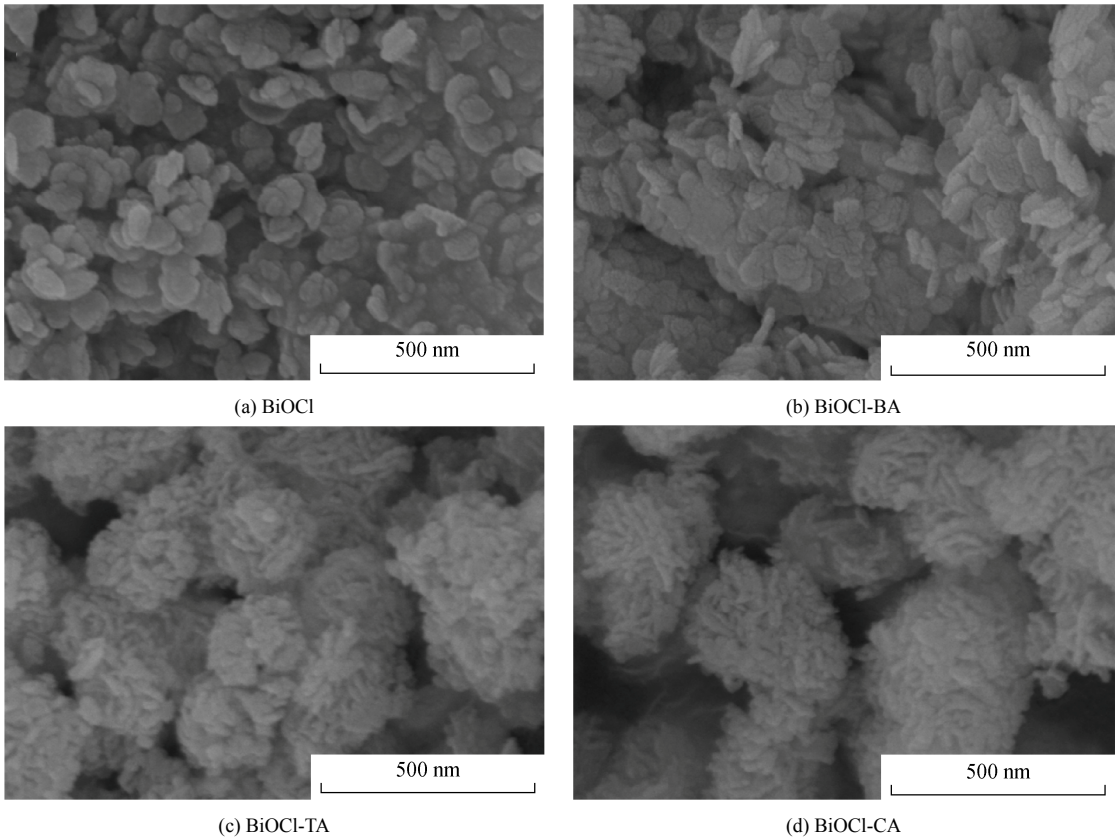
图 2 为样品的微观表面形貌。由图 2a 可见，样品 BiOCl 纳米片表面光滑，且纳米片之间严重团聚，甚至部分成为微米级的颗粒，导致比表面积相对较小，对有机污染物的吸附去除能力较差。图 2b 中样品 BiOCl-BA 纳米片表面出现裂纹，可能与硼酸的弱酸性刻蚀有关。图 2c 和图 2d 中样品 BiOCl-TA，样品 BiOCl-CA 分别在酒石酸和柠檬酸的作用下生长为不规则的微球结构，微球大小在 300~600 nm 之间，这可能是因为酒石酸和柠檬酸分子的羟基和羧基发挥了电荷中心的作用来吸引 BiOCl 的 Bi^{3+} 使形成的纳米片团聚在其周围[17]。不规则的微球结构显著增大了 BiOCl 材料的反应界面，为污染物的吸附去除提供了更多的活性位点，同时片层之间的介孔结构也促进了污染物质在 BiOCl 微球内部的扩散过程[5,16]。

图 3a 为 UV-Vis 漫反射测试光谱，样品 BiOCl，样品 BiOCl-TA，样品 BiOCl-CA 的最大吸收波长为 361，355，355 nm，波长小于 420 nm，故只能进行紫外光吸收。通过式(2)来量化测试材料的带隙：

$$\alpha hv=A(hv-E_g)^{n/2} \quad (2)$$

其中：α 是吸收系数；v 是光吸收频率；E_g 是带隙能量；A 是常数[16–18]。由式(2)可得，样品 BiOCl，样品 BiOCl-TA，样品 BiOCl-CA 的带宽分别为 3.30、3.34 eV 和 3.34 eV(图 3b)，有机羧酸改性的 BiOCl 的禁带宽度的增大和吸收波长的“蓝移”现象可能归因于材料纳米尺寸减小[4,18]。

由图 4a 可见，所有样品的氮吸附–解吸等温线均具有迟滞回线，p/p_0 范围大约在 0.80~0.98 之间，所有合成的材料均显示出典型的 IV 型吸附–解吸等温线特征[19]。图 4b 中样品 BiOCl，样品 BiOCl-BA，样品 BiOCl-TA，样品 BiOCl-CA 的 Lambert-Beer 比表面积分别为 106.90、233.88、469.93 m²/g 和 646.82 m²/g (表 1)，表明有机羧酸改性的纳米微球状的样品BiOCl-TA和样品BiOCl-CA的微介孔数量远远多于样品 BiOCl，样品 BiOCl-BA。有机的酒石酸和柠檬酸不仅因酸性较强可在一定程度上对纳米片表面进行刻蚀[20]，而且微观结构上纳米微球的形成，可显著增大材料的比表面积和孔体积[21]，这对于吸附更多有机污染物具有重要意义。

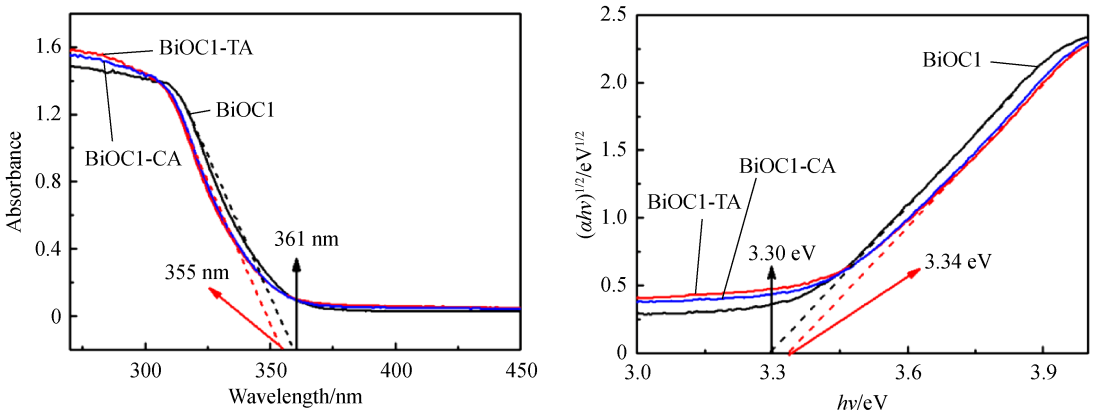


(a) BiOCl (b) BiOCl-BA

(c) BiOCl-TA (d) BiOCl-CA

图 2 样品的 SEM 照片

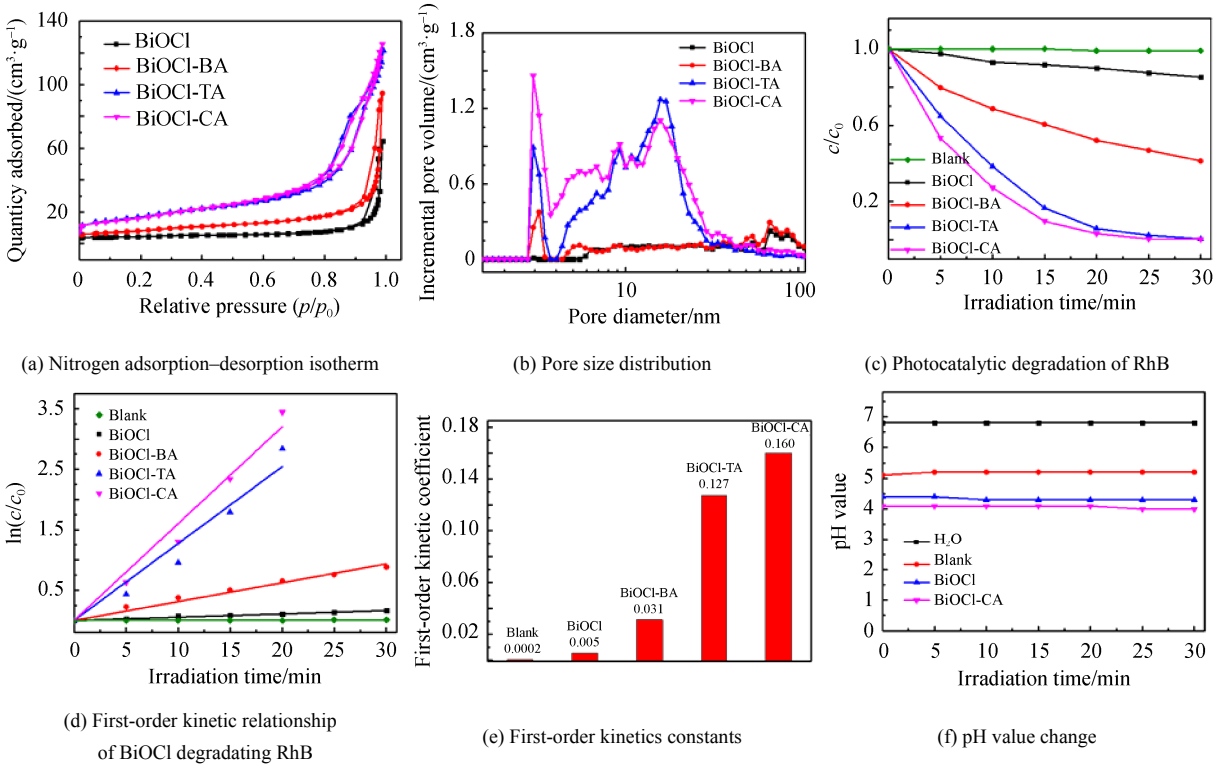
Fig. 2 SEM images of samples



(a) UV−Vis DRS　　(b) Forbidden band width

图 3　样品的 UV-Vis 漫反射测试光谱和禁带宽度

Fig. 3　UV−visible diffuse reflectance spectra (UV−Vis DRS) and forbidden band width of samples



(a) Nitrogen adsorption–desorption isotherm　　(b) Pore size distribution　　(c) Photocatalytic degradation of RhB

(d) First-order kinetic relationship of BiOCl degradating RhB　　(e) First-order kinetics constants　　(f) pH value change

图 4　样品的氮吸附–脱附等温线、孔径分布曲线、光催化降解性能和 pH 值变化

Fig. 4　Nitrogen adsorption–desorption isotherm, pore size distribution and photocatalytic degradation performance and pH value change of samples

表 1　样品的表面积和孔体积及吸附率和降解率

Table 1　Surface area, pore volume and adsorption rate, degradation rate of samples

Sample	S/(m²·g⁻¹)	V/(cm³·g⁻¹)	Adsorption rate/%	Degradation rate/%
BiOCl	106.90	0.10	9.29	14.83
BiOCl-BA	233.88	0.15	23.68	56.66
BiOCl-TA	469.93	0.18	39.31	99.53
BiOCl-CA	646.82	0.20	59.75	99.74

光催化实验的反应底物是有机污染物 RhB。首先，在黑暗条件下进行 1 h 的暗吸附，使合成的样品充分吸附 RhB，且样品 BiOCl，样品 BiOCl-BA，样品 BiOCl-TA 和样品 BiOCl-CA 的吸附率分别为 9.29%，23.68%，39.31% 和 56.75% (表 1)。然后以 500 W Xe 灯为光源，进行光催化降解反应。图 4c 是经过 1 h 暗吸附之后的样品的光催化降解曲线。由图 4c 可见，30 min 内不加任何催化剂的 RhB 空白样在 Xe 灯照射下几乎不会发生自身分解，样品 BiOCl 在 30 min 内对 RhB 的降解率约为 15%，样品 BiOCl-BA 降解率为 58.66%，而样品 BiOCl-TA，样品 BiOCl-CA 几乎可以在 30 min 内完全降解 RhB，降解率达到了 99.74%。利用反应动力学方程来计算样品降解反应的一级动力学常数 k：

$$\ln(c_0/c_t)= kt \quad (3)$$

其中：c_0 和 c_t 分别表示初始阶段和 t 时的 RhB 浓度；t 为降解阶段的反应时间[22]。图 4d 为近似模拟的通过原点的一级动力学直线，样品 BiOCl，样品 BiOCl-BA，样品 BiOCl-TA，样品 BiOCl-CA 降解动力系数分别为 0.005，0.031，0.127，0.160 min^{-1}，图 4e 为其直方图。在光催化降解过程中，RhB 由红色逐渐变为无色透明液体，说明 RhB 分子逐渐降解为有机小分子，直至矿化为 CO_2 和 H_2O[4,21]。由图 4f 可见，纯 RhB 溶液具有弱酸性，加入样品 BiOCl 和样品 BiOCl-CA 后酸性增强，在光催化降解过程中，溶液 pH 值略有下降。样品 BiOCl-TA 和样品 BiOCl-CA 高效的光降解性能与其丰富的比表面积和不规则的纳米微球结构有关。较高表面积的样品 BiOCl-TA 和样品 BiOCl-CA 不仅能高效吸附有机污染物 RhB，而且提供了丰富的活性位点光催化 RhB。纳米微球的介孔结构为 RhB 的扩散提供了良好的通道，同时纳米片状组装的三维微球结构可以实现入射光的多重反射，显著提高了光的利用效率[23]。薄片状结构可以有效缩短光生电子和空穴的转移路径，降低了复合率[8]，这些特征提供的协同作用可显著提高有机羧酸改性的 BiOCl 的光催化降解有机污染物性能[24]。

3 结论

通过在纳米片生长过程中加入有机羧酸制备了具有不规则纳米微球结构的 BiOCl 光催化降解材料，其中样品 BiOCl-TA，样品 BiOCl-CA 在催化降解 RhB 时表现出优异的性能，这得益于其丰富的比表面积为吸附有机污染物提供了更多的活性位点，另一方面，纳米微球结构显著增大了纳米片与污染物接触的界面，同时还可以有效减少光生电子和空穴的复合，显著提高了光催化反应的效率，在 30 min 内可以有效降解 99.74%的 RhB (20 mg/L)，远大于纯 BiOCl 的 14.83%。

参考文献:

[1] CHENG H, HUANG B, QIN X, et al. A controlled anion exchange strategy to synthesize Bi_2S_3 nanocrystals/BiOCl hybrid architectures with efficient visible light photoactivity[J]. Chem Commun, 2011, 48: 97–99.

[2] WANG Q, WANG W, ZHONG L, et al. Oxygen vacancy-rich 2D/2D BiOCl-g-C_3N_4 ultrathin heterostructure nanosheets for enhanced visible-light-driven photocatalytic activity in environmental remediation[J].Appl Catal B: Environ, 2018, 220: 290–302.

[3] WANG X, MAEDA K, THOMAS A, et al. A metal-free polymeric photocatalyst for hydrogen production from water under visible light[J]. Nat Mater, 2009, 8(1): 76–80.

[4] HOU J, DAI D, WEI R, et al. Narrowing the band gap of BiOCl for the hydroxyl radical generation of photocatalysis under visible light[J]. ACS Sustainable Chem Eng, 2019, 7(19): 16569–16576.

[5] 李伟, 戴宪起, 张芳. 电场和应变对砷烯/WS_2 van der Waals异质结电子结构的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(4): 499–506.
LI Wei, DAI Xianqi, ZHANG Fang. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(4): 499–506.

[6] JIANG T, JIN J, HOU J, et al. $Bi_4O_5I_2$/nitrogen-doped hierarchical carbon (NHC) composites with tremella-like structure for high photocatalytic performance[J]. Chemosphere, 2019, 229: 426–433.

[7] YU C, HE H, LIU X, et al. Novel SiO_2 nanoparticle-decorated BiOCl nanosheets exhibiting high photocatalytic performances for the removal of organic pollutants[J].Catalysis, 2019, 40: 1212–1221.

[8] REZA M, SOMAYEH E, MAHDI G, et al. Synthesis and characterization of a novel Fe_3O_4@SiO_2–BenzIm-Fc[Cl]/BiOCl nanocomposite and its efficient catalytic activity in the ultrasound-assisted synthesis of diverse chromene analogs[J]. New J Chem, 2019, 43: 135–145.

[9] HOU J, TANG J, FENG K. et al. The chemical precipitation synthesis of nanorose-shaped $Bi_4O_5I_2$ with highly visible light photocatalytic performance[J]. Mater Lett, 2019, 252: 106–109.

[10] TIAN Y, LI W, ZHAO C, et al. Fabrication of hollow mesoporous SiO_2-BiOCl@PANI@Pd photocatalysts to improve the photocatalytic performance under visible light[J]. Appl Catal B: Environ, 2017, 213: 136–146.

[11] YE L, ZAN L, TIAN L, et al. The {001} facets-dependent high photoactivity of BiOCl nanosheets[J]. Chem Commun, 2011, 47: 6951–6953.

[12] HUANG H, XIAO K, ZHANG T, et al. Rational design on 3D hierarchical bismuth oxyiodides *via in situ* self-template phase transformation and phase-junction construction for optimizing photocatalysis against diverse contaminants[J]. Appl Catal B: Environ, 2016, 203: 879–888.

[13] ZHAO S, ZHANG Y, ZHOU Y, et al. Reactable polyelectrolyte-assisted synthesis of BiOCl with enhanced photocatalytic zctivity[J]. ACS Sustainable Chem Eng, 2016, 5: 1416–1424.

[14] LIU Q, GUO Y, CHEN Z, et al. Constructing a novel ternary

Fe(III)/graphene/g-C_3N_4 composite photocatalyst with enhanced visible-light driven photocatalytic activity *via* interfacial charge transfer effect[J]. Appl Catal B: Environ, 2016, 183: 231–241.

[15] SUN Y, LI G, WANG W, et al. Photocatalytic defluorination of perfluorooctanoic acid by surface defective BiOCl: Fast microwave solvothermal synthesis and photocatalytic mechanisms[J]. J Environ Sci, 2019, 84: 69–79.

[16] DI J, XIA J, LI H, et al. Bismuth oxyhalide layered materials for energy and environmental applications[J]. Nano Energy, 2017, 41: 172–192.

[17] SUN D, LI J, FENG Z, et al. Solvothermal synthesis of BiOCl flower-like hierarchical structures with high photocatalytic activity[J]. Catal Commun, 2014, 51: 1–4.

[18] LIU L, SUN Y, CUI X, et al. Bottom-up growth of homogeneous Moiré superlattices in bismuth oxychloride spiral nanosheets[J]. Nat commun, 2019, 10: 1–10.

[19] WANG X, BI W, ZHAI P, et al. Adsorption and photocatalytic degradation of pharmaceuticals by $BiOCl_xI_y$ nanospheres in aqueous solution[J]. Appl Surf Sci, 2016, 360: 240–251.

[20] 方稳, 何洪波, 薛霜霜, 等. $BiOCl_xI_{(1-x)}$复合半导体的热稳定性及光催化性能[J].硅酸盐学报, 2016, 44(5): 711–719.
FANG Wen, HE Hongbo, XUE Shuangshuang, et al. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(5): 711–719.

[21] 王俊忠, 李心昕, 郭明阳, 等. 氯化氧铋/多孔钛羟基磷灰石的制备及其对乙醛的催化降解性能[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(5): 715–722.
WANG Junzhong, LI Xinxin, GUO Mingyang, et al. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(5): 715–722.

[22] HOU J, WEI R, WU X, et al. Lantern-like bismuth oxyiodide embedded typha-based carbon *via in situ* self-template and ion exchange-recrystallization for high-performance photocatalysis[J]. Dalton Trans, 2018, 47: 6692–6701.

[23] 张冬冬, 莫越奇, 宋琳, 等. 芴与噻吩共聚物敏化半导体在可见光下催化降解罗丹明B[J]. 过程工程学报, 2008(1): 78–82.
ZHANG Dongdong, MO Yueqi, SONG Lin, et al. Process Eng (in Chinese), 2008(1): 78–82.

[24] GAO X, GAO K, FU F, et al. Synergistic introducing of oxygen vacancies and hybrid of organic semiconductor: Realizing deep structure modulation on Bi_5O_7I for high-efficiency photocatalytic pollutant oxidation[J]. Appl Catal B: Environ, 2020, 265: 118562.