



移动扫码阅读

王玉杰,岳喜龙,吴彤,等.CO₂F-PD/AgI 纳米复合材料的光催化及抗菌性能研究[J].能源环境保护,2022,36(2):52-58.

WANG Yujie, YUE Xilong, WU Tong, et al. Study on photocatalytic and antibacterial properties of CO₂F-Pd /AgI nanocomposites[J]. Energy Environmental Protection, 2022, 36(2): 52-58.

CO₂F-PD/AgI 纳米复合材料的光催化及抗菌性能研究

王玉杰¹, 岳喜龙², 吴彤², 怀燕瑾¹, 程庆霖¹, 张曼莹^{1,*}

(1.江苏理工学院 化学与环境工程学院,江苏 常州 213001;

2.江苏宁达环保股份有限公司,江苏 扬州 225200)

摘要:以 2,5-二氨基吡啶和 1,3,5-三甲酰基间苯三酚为前驱体,制备了由 AgI 修饰的共价有机骨架材料 CO₂F-PD/AgI。利用扫描电镜(SEM)、X-射线粉末衍射仪(XRD)、透射电镜(TEM)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)表征了材料的形貌和组成。以亚甲基蓝(MB)和罗丹明 B(RhB)为模拟有机污染物,测定其在可见光下的光催化降解性能。以大肠杆菌(E. coli)为模式菌种,测定其抗菌性能。结果表明:当 CO₂F-PD/AgI 纳米复合物的投加量为 0.036 g 时,对亚甲基蓝和罗丹明 B 具有良好的光催化降解性能;当 CO₂F-PD/AgI 材料的浓度在 150 mg/L 时,抑菌环效果最好;当 CO₂F-PD/AgI 的最小浓度在 4 mg/L 时,大肠杆菌的生长被完全抑制。

关键词:共价有机骨架;银;光催化;抗菌

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2022)02-0052-07

Study on photocatalytic and antibacterial properties of CO₂F-Pd/AgI nanocomposites

WANG Yujie¹, YUE Xilong², WU Tong², HUAI Yanjin¹, CHENG Qinglin¹, ZHANG Manying^{1,*}

(1.School of Chemical and Environmental Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China; 2.Jiangsu Ningda Environmental Protection Co., Ltd., Yangzhou 225200, China)

Abstract: Covalent organic frameworks material CO₂F-PD/AgI modified by AgI was prepared with 2,5-diaminopyridine and 1,3,5-triformylresorcinol as precursors. The morphology and composition of the material were characterized by scanning electron microscopy (SEM), X-ray powder diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). Methylene blue (MB) and rhodamine B (RhB) were used as simulated organic pollutants to determine the photocatalytic degradation performance of the material under visible light. E. coli was used as the model strain to determine the antimicrobial properties. The results showed that when the dosage of CO₂F-PD/AgI nanocomposite was 0.036 g, it had good photocatalytic degradation performance for methylene blue and rhodamine B. When the concentration of CO₂F-PD/AgI material was 150 mg/L, the effect of bacteriostatic ring was the best. When the minimum concentration of CO₂F-PD/AgI was 4 mg/L, the growth of E. coli was completely inhibited.

Key Words: COFs; Silver; Photocatalytic; Antibacterial

收稿日期:2021-12-16;责任编辑:蒋雯婷

基金项目:国家自然科学基金项目(51508239);江苏理工学院研究生实践创新计划项目(XSJXC20-10);江苏理工学院校级教学改革与研究项目(11610412041)

第一作者简介:王玉杰(1995-),男,江苏南通人,硕士在读,主要研究方向为环境污染控制。E-mail:45789142@qq.com

通讯作者简介:张曼莹(1987-),女,江苏常州人,博士,副教授,主要研究方向为抗污染膜材料制备及应用。E-mail:myzhang@jsut.edu.cn

0 引言

我国当前工业废水排放主要集中的领域有石油化工、煤炭燃烧、造纸印染废水、食品制造等行业^[1]。其中,造纸行业由于日常生活用纸业的用途广泛及需求量极大,其废水排放量占工业废水总排放量的 16.4%。不同的工业印染原料的选材、设备情况、工艺条件、季节温差等,均会使废水的组成发生巨大变化^[2-6]。此外,印染废水中的难降解有机物含量较高且色泽浓重,进入水体后长时间存留在水体中不能被去除^[7],不仅会造成水体生物死亡,还会对人类生命造成严重威胁^[8]。所以,研究一种对环境污染影响小的印染废水处理手段尤其关键。目前,光催化法在印染废水的降解中应用最广泛,它的基本原理是在光照射条件下,利用光催化剂产生的氧化还原能力来降解污染物。光催化技术反应条件温和,去除效果好,能使污水达到完全无害化的目的^[3]。不仅如此,它凭借价格低廉、清洁高效、杀菌彻底等特点已经得到了学者们的广泛认可^[5]。

共价有机框架(COFs)是一种由可设计的有机建筑单元通过形成强共价键形成晶体和多孔结构的新型聚合物,被证明在环境领域具有巨大的应用潜力。它具有很多优点:首先,COFs 材料由轻质元素构成且呈多孔结构,因此密度很小^[9];其次,COFs 材料由稳定的共价键连接,材料的热稳定性和化学稳定性均较强^[10-15]。此外,制备的 COFs 具有周期性分布和规则的孔结构,这使得它们在气体吸附、分离和催化方面具有更好的应用性能^[15]。

而银系杀菌剂由于其广谱杀菌性、超强的活性及渗透性被广泛地应用于医药、化工、服装、环保等行业。因此,我们期望用 AgI 修饰 COFs,在赋予复合材料抗菌性能的同时,增强光致电子(e^-)和空穴(h^+)的分离,从而提高其在可见光下的光催化性能。综上所述,本文以 2,5-二氨基吡啶和 1,3,5-三甲酰间苯三酚为前驱体,通过溶剂热法合成 COF-PD,用 AgI 共沉淀法合成 COF-PD/AgI,研究其在可见光下的催化及抗菌性能。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

MS-H-Pro 型磁力搅拌器(美国赛洛捷克公司)、HPL-N125W 型高压汞灯(荷兰皇家飞利浦

公司)、D-7 型紫外可见分光光度计(南京菲勒仪器有限公司)、A-5082 型全波长扫描酶标仪(南京美仪星生物科技有限公司)、LX-300 型小型高速离心机(Kylin-Bell Lab Instruments CO, LTD)、DHP-9032 型电热恒温培养箱(上海一恒科学仪器有限公司)、LDZF-50KB 型立式压力蒸汽灭菌器(上海申安医疗器械厂)、THZ-103B 型恒温培养摇床(上海一恒科学仪器有限公司)等。

均三甲苯、二氧六环、1,3,5-三甲酰间苯三酚、2,5-二氨基吡啶、硝酸银、碘化钾、乙二醇、亚甲基蓝、罗丹明 B、大肠杆菌(*Escherichia coli* ATCC15597)为自行培养。

1.2 COF-PD/AgI 复合材料的制备及表征

在席夫碱反应的基础上,采用溶剂热法合成了 COF-PD。首先将间二甲苯(4.5 mL)、二氧六环(4.5 mL)和 3 mol/L 乙酸(1.5 mL)加入到含有 1,3,5-三甲酰间苯三酚(190 mg)和 2,5-二氨基吡啶(149 mg)的聚四氟乙烯衬里中,超声处理 20 min。然后将聚四氟乙烯内衬密封在高压釜中,在 120 °C 下加热 72 h 后自然冷却到室温,用丙酮冲洗红棕色产品 5 次,在 60 °C 下干燥一夜。

随后,通过简单的共沉淀法将 AgI 负载到 COF-PD 表面。首先,称取 100 mg 的 AgNO_3 和 250 mg 的 COF-PD,依次加入到 100 mL 的乙二醇溶液中。超声 10 min 后,在磁力搅拌器上搅拌 2 h,得溶液 A。称取 47.6 mg 的 KI,加入到 40 mL 的乙二醇溶液中,超声 10 min 得溶液 B。将溶液 B 缓慢滴加到溶液 A 中,再充分搅拌 2 h 后,过滤收集产品,最后用无水乙醇洗涤 5 次。将材料在 60 °C 烘箱中放置一夜后,得到产物,表示为 COF-PD/AgI。

1.3 光催化性能测试

选择亚甲基蓝(MB)和罗丹明 B(RhB)为实验所需的染料试剂,按适当的比例稀释于水中,从而模拟成印染废水,研究在可见光下所制备材料的降解性和光催化性。

1.3.1 染料降解率

用电子天平称取 0.01 g、0.018 g 和 0.036 g 的材料加入到石英反应器中,再分别加入浓度为 10 mg/L 的 100 mL 染料溶液。在光照之前,进行实验的反应器首先用铝箔包裹。打开磁力搅拌器,将其在遮光的情况下连续搅拌 0.5 h,使催化剂达到吸附—脱附平衡。用塑料吸管吸取 4 mL 染料溶液,测吸光度,计为 A_0 ,并换算成浓度作为

反应开始前反应物的浓度,记作 C_0 。

测完后迅速拿掉封在反应器上的铝箔纸,连接好玻璃容器的出水口和进水口,进水,对反应器进行降温,同时打开氙灯(可见光光源),待稳定后对反应器中的溶液进行光照搅拌。每3 min取一次样品,置于2 mL离心管中离心。然后用紫外—可见光谱法(UV/Vis)测定降解后的亚甲基蓝(MB)清液和罗丹明B(RhB)清液在最大吸收波长处的吸光度,计为 A_t 。其中,亚甲基蓝清液和罗丹明B清液分别在664 nm和554 nm处测其吸光度。采用标准曲线方程计算不同时间的污染物浓度,计为 C_t ,并按公式(1)计算降解速率。

根据郎伯-比尔定律计算染料浓度^[16]。降解率按下式计算:

$$\eta = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\% = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

其中: η ——降解率,%;

C_0 ——光照前目标污染物初始浓度,mg/L;

A_0 ——光照前目标污染物吸光度;

A_t ——光照 t 时间(min)的目标污染物吸光度。

此外,通过准一级反应动力学模型拟合染料降解过程^[17]。动力学方程如式(2):

$$\ln(C_0/C_t) = Kt \quad (2)$$

其中: C_0 ——光照前目标污染物初始浓度,mg/L;

C_t ——光照 t 时间的目标污染物浓度,mg/L;

K ——反应动力学常数,min⁻¹;

t ——光照时间,min。

K 值可以直接表现出当制备的材料加入后光催化降解污染物的^[15]。

1.3.2 自由基捕获

为了更好地了解光催化下有机污染物复合降解的机理过程,探究有机染料在降解的过程中产生的自由基,选择碘化钠(NaI),异丙醇(IPA)和苯醌(BQ)作为空穴(h^+),羟基自由基($OH\cdot$)和超氧自由基($O_2\cdot^-$)的捕获剂。具体步骤如下:首先配制100 mL亚甲基蓝溶液(浓度10 mg/L)加入到光催化反应器中,接着用电子天平称取0.12 g催化剂和0.080 g NaI(0.032 g IPA、0.060 g BQ)加入到催化反应器中。用锡箔纸封好使溶液在暗条件下搅拌35 min,然后拿掉锡箔纸,打开氙灯对亚甲基蓝溶液照射36 min,每3 min取一次样品。用离心机进行离心操作(6 000 r/min)并取上清液,

用紫外—可见分光光度法进行浓度测定。

1.4 抗菌性能测试

选取革兰氏阴性菌大肠杆菌(*Escherichia coli*)对抗菌材料的抗菌效果进行测定,通过MIC值(最小抑菌浓度)法、生长曲线和抑菌环测定材料抑制细菌生长的性能。

1.4.1 抑菌环

取出冰箱中接种好的大肠杆菌,固定在摇床上摇晃12 h,第二天将用LB溶液将其稀释至 8×10^6 CFU mL⁻¹左右。用10~100 μ L量程的移液枪吸收100 μ L的菌液,移至固体平板上,均匀涂抹。在平板上以适当的距离打4个直径约为6 mm的孔。将配合物材料依次稀释为30、60、90、120 mg/L溶液,分别移取25 μ L注入到圆孔中。将平板置于培养箱中,温度设置为37 $^{\circ}$ C,培养1天。然后取出,观察平板上所制备抗菌材料对细菌的抑菌效果。最后,拍照并保存^[17]。

1.4.2 生长曲线、最小抑菌浓度测定

大肠杆菌在96孔板(Nunc, USA)上与配合物接触后,大肠杆菌的生长情况我们用酶标分析仪进行测定。测定完成后,需要对配合物材料的抗菌性能进行分析和检测。首先用移液枪移取LB培养液(100 μ L)和抗菌储备液(100 μ L),反复抽吸5~10次,使其充分分散。再从混合液中取100 μ L,注入下孔中已有的100 μ L中。连续重复,直到完成。在孔板的各孔中依次加入100 μ L稀释后的菌液,与100 μ L混合液充分摇匀。接种后的孔板中银的浓度分别为8、4、2、1 mg/L,细菌浓度约为 4×10^6 CFU mL⁻¹。空白样品为未接种孔板菌液的样品,对照样为没有添加抗菌剂的样品。将孔板置于电热恒温器中培养,在波长600 nm处测定吸光度。每1 h测定一次吸光度,可得到大肠杆菌在抗菌材料参与下的生长曲线。

将孔板在恒温培养箱中培养一天,能够看到细菌在孔板上的生长状态。一天后,在600 nm波长下,用酶标仪进行测试,未见细菌增长的最小银浓度即为最小抑制浓度(Minimal Inhibitory Concentration, MIC)^[18],此时细菌已无法生长且完全被抑制。

2 结果与讨论

2.1 扫描电镜(SEM)分析

通过扫描电子显微镜表征该配合物的微观形貌。从图1可以看到,产物表面呈棉絮状,这是由

于体系中的 AgI 通过共沉淀负载到了 COF-PD 表面,生成了 COF-PD/AgI。样品形貌清晰,具有均匀的形状,分散性良好。

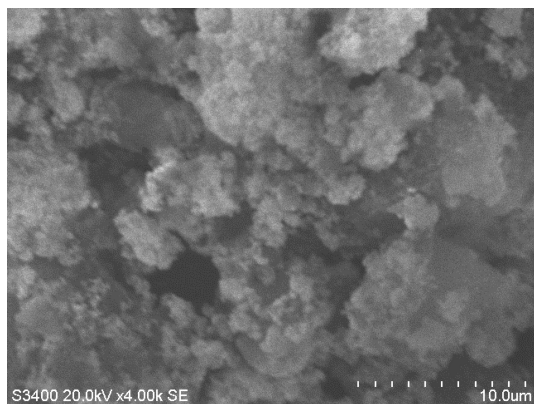


图1 COF-PD/AgI 的 SEM 图

Fig.1 SEM image of COF-PD/AgI

2.2 X-射线粉末衍射 (XRD) 分析

由图 2 可知,在 $2\theta=6.2^\circ$ 处出现了明显的衍射峰,证实了 COF-PD 的结晶性。经 AgI 修饰后,COF-PD/AgI 的 XRD 谱图中 COF-PD 对应的特征峰保持不变,说明 AgI 的沉积没有影响 COF-PD 的晶体结构。在 $2\theta=6.2^\circ$ 处峰值强度减弱的原因是 COF-PD 含量较低,以及表面沉积的高结晶度 AgI 粒子的屏蔽作用^[19]。

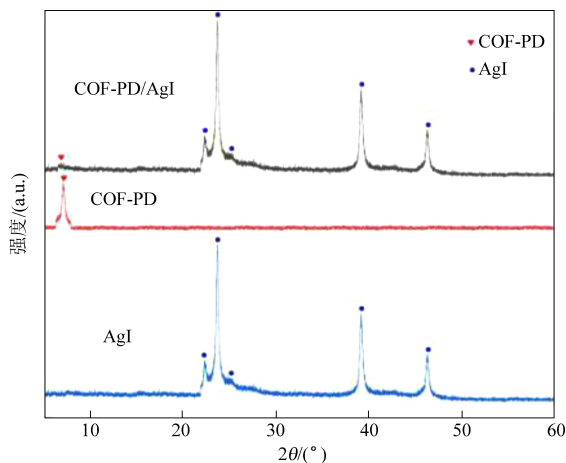
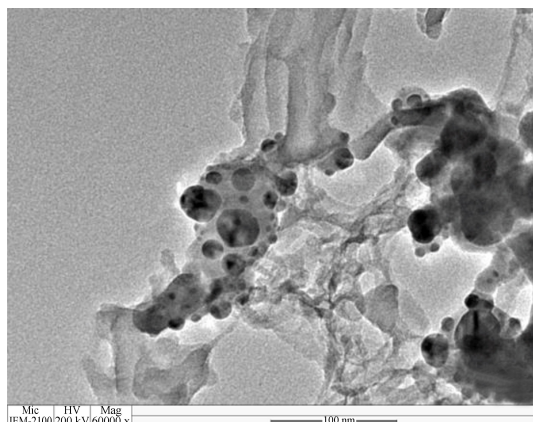


图2 COF-PD/AgI 的 XRD 图

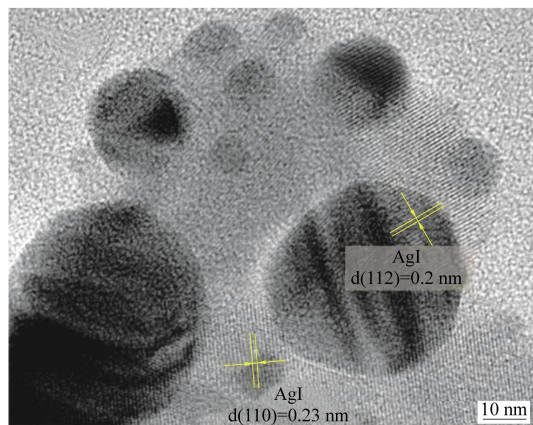
Fig.2 XRD image of COF-PD/AgI

2.3 透射电镜分析 (TEM)

由图 3(a) 可知,COF-PD 由大量直径为 10~20 nm、长度为 100~200 nm 的纳米棒组成,还发现在 COF-PD 表面成功沉积了 AgI (直径为 5~20 nm)。在透射电镜下,COF-PD/AgI 的两个 0.23 nm 和 0.20 nm 的清晰条纹 (图 3(b)) 分别对应于 AgI 的 (110) 和 (112) 面,这证实用 AgI 成功修饰了 COF-PD。



(a) 放大 6×10^4 倍



(b) 放大 6×10^5 倍

图3 COF-PD/AgI 的 TEM 图

Fig.3 TEM images of COF-PD/AgI

2.4 红外光谱分析 (FTIR)

由图 4 可知, 1600 cm^{-1} 处有一个强峰对应于 C=C 键的伸缩振动而 C—N 键拉伸振动峰值出现在 1240 cm^{-1} 处。结果表明,通过席夫碱反应和烯醇-酮互变异构作用,原始的烯醇结构已成功转化为酮结构。在 3350 cm^{-1} 左右没有观察到氨基 N—H 拉伸振动峰,这表明单体已反应完全。

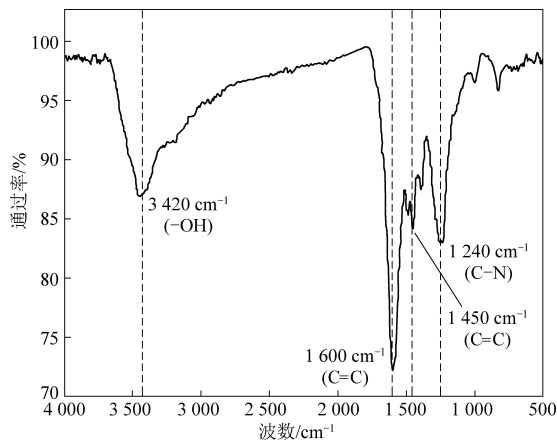


图4 COF-PD/AgI 的 FIR 图

Fig.4 FTIR image of COF-PD/AgI

2.5 光催化性能

2.5.1 染料降解

图5可见,在没有催化剂的光反应器中,染料本身的光力学作用可以忽略。同样,反应器在不见光条件下降解水平一般。然而,当在反应器中投加材料进行反应后,效果却很明显。随着时间的推移,染料颜色逐渐变淡。由此可知,在一定条件下,随着材料投加量的变大,催化剂降解染

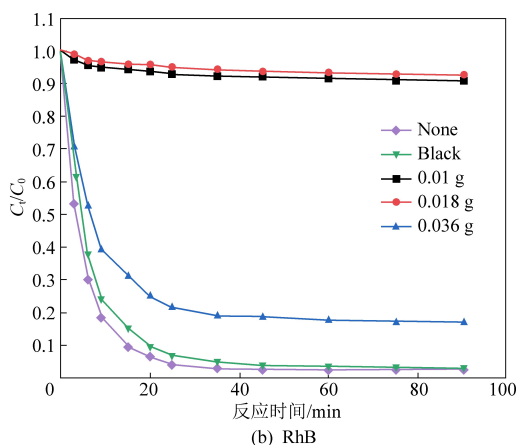
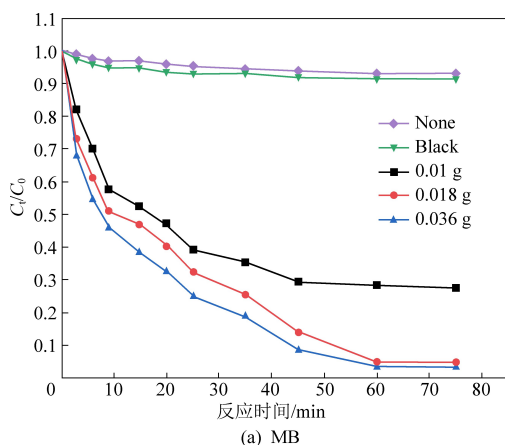
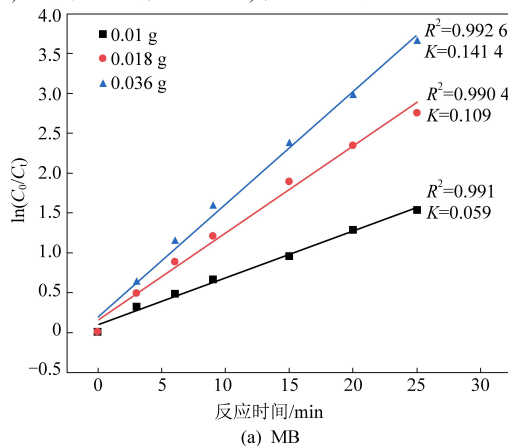


图5 不同浓度材料的染料降解图

Fig.5 Degradation images of dye by materials with different concentrations

图6为材料在不同浓度的情况下,对有机物进行处理的动力学曲线。由图6可以看出,线性拟合相关系数 R^2 随着所制备光催化降解材料的增多而变大,且横纵坐标呈正比,说明罗丹明B和亚



甲基蓝的催化降解与一级反应动力学规律相符。从图中还可以看出,当材料中银含量提高时,比例系数 K 也随之变高,MB和RhB的降解效果越来越好。

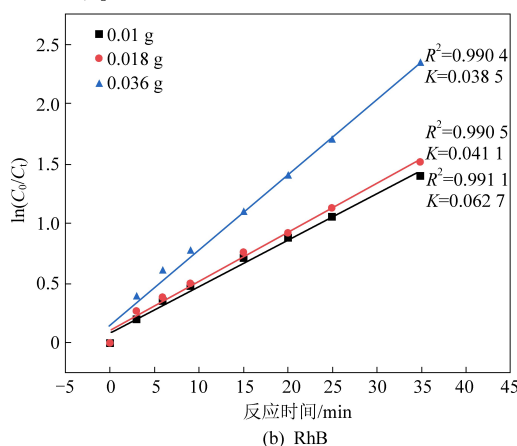


图6 不同浓度材料的染料降解动力学曲线

Fig.6 Kinetic curves of dye degradation by materials with different concentrations

2.5.2 自由基捕获

由图7可知,加入自由基($\text{OH} \cdot$)捕获剂异丙醇(IPA)后,降解亚甲基蓝(MB)的催化活性的降幅很不明显,从92%下降了11%,降到了81%;加入空穴(h^+)捕获剂NaI后,MB的活性有很大程度的下降,从92%下降了26%,减小至66%;而当加入超氧自由基($\text{O}_2 \cdot^-$)捕获剂BQ后,降解率从

92%下降了39%,降至53%。捕获实验结果表明,在可见光照射下,光生空穴和超氧化物是该光催化体系中主要参与反应的物质。

2.6 抗菌性能

2.6.1 抑菌环

抑菌环法是在培养的平板上观察细菌生长被抑制的程度,来检测所制备的抗菌材料的抗菌效

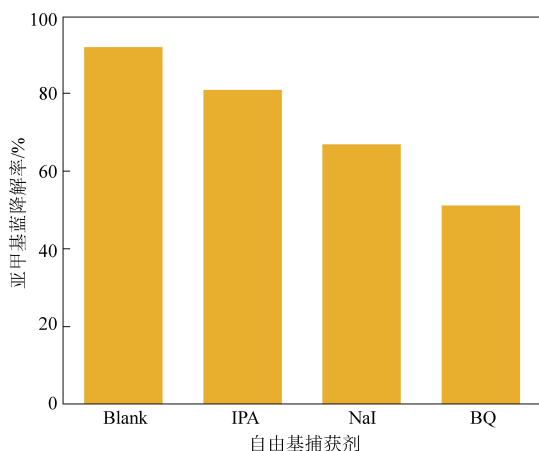


图7 光催化降解 MB 染料中自由基捕获剂对其降解效率的影响

Fig.7 Effect of free radical trapping agent on photocatalytic degradation efficiency of MB dye

果,是较为常用的一种方法^[20]。

从图8中可以看出,四个孔径相同的圆洞附近都有抑菌环。随着材料中银离子浓度的变高,抑菌环的面积范围变大。由此可知,制备的抗菌材料具有明显的抗菌性和持久性。随着银离子含量的不断加大,抗菌的效果越来越明显。

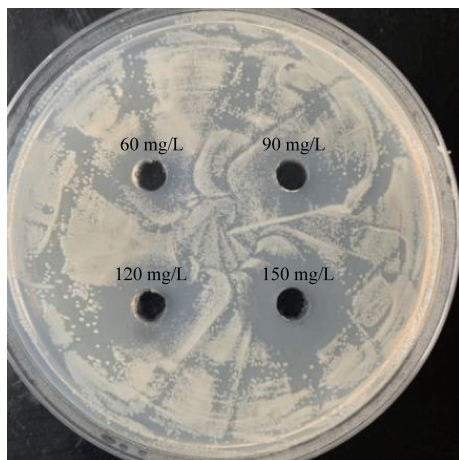


图8 大肠杆菌抑菌环实验

Fig.8 Bacteriostatic ring test of *E.coli*

2.6.2 生长曲线、MIC

生长曲线的优势,是可以不间断的得到细菌的生长过程,从而可以清晰的看出所制备材料的抗菌性能^[21-22]。从图9中可以看出,在培养基中不添加配合物材料的情况下,大肠杆菌表现出递进增长的情形。但当投入了配合物材料时,出现了抑制细菌生长的情形,且随着抗菌剂中银离子含量的增加,抑菌效果越明显。

由实验可知,将配合物的浓度最小控制在4 mg/L的情况下,就可以在12 h内完全抑制实验中

大肠杆菌的生长。表1为所制得的抗菌材料对大肠杆菌的MIC值。

表1 大肠杆菌 MIC 值

Table1 MIC value of *E. coli*

菌种	MIC/(mg · L ⁻¹)
大肠杆菌 (<i>Escherichia coli</i>)	4

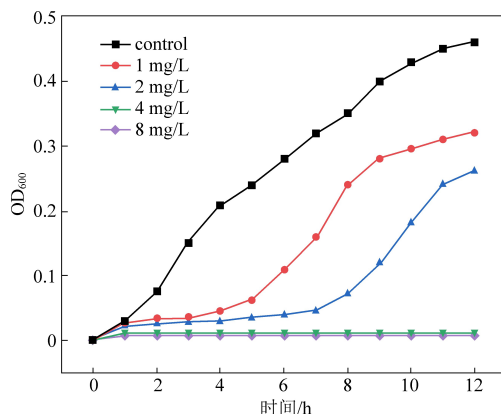


图9 大肠杆菌 (*E.coli*) 的生长曲线

Fig.9 Growth curves of *E.coli*

3 结 论

本文以2,5-二氨基吡啶和1,3,5-三甲酰间苯三酚为前驱体制备AgI改性的COFs (COF-PD/AgI),通过SEM、XRD、FTIR对样品形貌和化学组成进行表征,并对其光催化降解有机污染物和抗菌性能进行了研究。结论如下:

(1)SEM、XRD、FTIR结果说明共沉淀法合成的COF-PD/AgI具有良好的纯度,不掺杂其它杂质相,晶格条纹清晰可见,结晶度高。

(2)在可见光的照射下,COF-PD/AgI对染料的降解表现出显著效果,且当材料的投加量为0.036 g时,对亚甲基蓝和罗丹明B的降解效果最佳,降解率分别为97%和95%;此外,在一定的浓度范围内,光催化降解的效率随着银离子浓度的上升而提高。

(3)COF-PD/AgI也具有较好的抗菌效果,当COF-PD/AgI材料的浓度在150 mg/L时,抑菌环范围最大,当COF-PD/AgI的最小浓度控制在4 mg/L时可以完全抑制大肠杆菌的生长;此外,随着材料的增多,银含量的增大,对大肠杆菌的抑制作用也越明显。

(4)综上所述,本实验制备的COF-PD/AgI复合材料具有作为水体净化光催化剂的潜能。

参考文献

[1] 张统,李志颖,董春宏,等.我国工业废水处理现状及污

- 染防治对策 [J]. 给水排水, 2020, 56 (10): 1-7.
- [2] Yaseen D A, Scholz M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: A critical review [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16 (2): 1193-1226.
- [3] 姚雨亨, 钱锐, 马长文. BiVO_4 光催化降解废水中高浓度磺胺嘧啶的研究 [J]. 能源环境保护, 2020, 34 (2): 30-36.
- [4] 周静. 纺织印染废水处理工程实例 [J]. 印染助剂, 2019, 36 (8): 45-47.
- [5] 单苗苗, 高献超. 印染废水全过程处理及回用 [J]. 针织工业, 2019 (7): 38-40.
- [6] 蒋彬, 王鸿儒, 袁绍春, 等. 印染废水深度处理工程实例 [J]. 工业水处理, 2018, 38 (11): 96-99.
- [7] 王双, 张倩, 王薇, 等. 反渗透双膜工艺处理印染废水研究进展 [J]. 能源环境保护, 2019, 33 (3): 1-4.
- [8] 贡洁, 刘慧楠, 张怡妮, 等. 凹凸棒土/有机复合膜的制备及其染料吸附性能研究 [J]. 能源环境保护, 2021, 35 (4): 44-49.
- [9] El-Kaderi H M, Hunt J R, Mendoza-Cortes J L, et al. Designed synthesis of 3D covalent organic frameworks [J]. Science, 2007, 316 (5822): 268-272.
- [10] Kandambeth S, Shinde D B, Panda M K, et al. Enhancement of chemical stability and crystallinity in porphyrin-containing covalent organic frameworks by intramolecular hydrogen bonds [J]. Angewandte Chemie, 2013, 125 (49): 13290-13294.
- [11] Sharath, Kandambeth, Arijit, et al. Construction of crystalline 2D covalent organic frameworks with remarkable chemical (acid/base) stability via a combined reversible and irreversible route [J]. Journal of the American Chemical Society, 2012, 134 (48): 19524-19527.
- [12] Chen X, Addicoat M, Irle S, et al. Control of crystallinity and porosity of covalent organic frameworks by managing inter-layer interactions based on self-complementary π -electronic force [J]. Journal of the American Chemical Society, 2013, 135 (2): 546-549.
- [13] Stewart D, Antypov D, Dyer M S, et al. Stable and ordered amide frameworks synthesised under reversible conditions which facilitate error checking [J]. Nature communications, 2017, 8 (1): 1102.
- [14] Waller P, Alfaraj Y S, Diercks C S, et al. Conversion of imine to oxazole and thiazole linkages in covalent organic frameworks [J]. Journal of the American Chemical Society, 2018, 140 (29): 9099-9103.
- [15] 张森. 共价有机骨架化合物的合成及性质研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019: 105-120.
- [16] Molinari R, Borgese M, Drioli E, et al. Hybrid processes coupling photocatalysis and membranes for degradation of organic pollutants in water [J]. Catalysis Today, 2002, 75 (1-4): 77-85.
- [17] Luan J, Shen Y, Zhang L, et al. Property characterization and photocatalytic activity evaluation of BiGdO_3 nanoparticles under visible light irradiation [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2016, 17 (9): 1441.
- [18] 解蓉蓉, 杨廷海, 冯婕, 等. 均苯三甲酸银 $[\{\text{Ag}(\text{H}_2\text{btc})\} \{\{\text{Ag}_2(\text{Hbtc})\}\}_n]$ 配位聚合物的光催化性能和抗菌性能研究 [J]. 化学试剂, 2021, 43 (1): 16-21.
- [19] Molinari R, Borgese M, Drioli E, et al. Hybrid processes coupling photocatalysis and membranes for degradation of organic pollutants in water [J]. Catalysis Today, 2002, 75 (1-4): 77-85.
- [20] Sintubin L, Gussem B D, Meeren P V D, et al. The antibacterial activity of biogenic silver and its mode of action [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 91 (1): 153-162.
- [21] Liu F, Nie C, Dong Q, et al. AgI modified covalent organic frameworks for effective bacterial disinfection and organic pollutant degradation under visible light irradiation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 398 (prepublish): 122865.
- [22] 孙圆. 银金属有机骨架复合抗菌材料的制备及性能 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 22-55.