

CeO₂-CoO_x/BiVO₄ 的制备及其 对有机工业废水的光催化降解研究

孙心^{1,2}, 段淑茹^{1,2}, 朱开金^{2*}, 朱鹏宇³, 龙浩鹏²

(1. 中北大学环境与安全工程学院, 山西太原 030051; 2. 太原工业学院材料工程系, 山西太原 030008; 3. 南京理工大学环境与生物工程学院, 江苏南京 210094)

摘要:通过浸渍和煅烧制备了新型光催化剂 BiVO₄、CoO_x/BiVO₄ 与 CeO₂-CoO_x/BiVO₄, 并通过 XRD、SEM、TEM 和 XPS 等手段对催化剂进行表征与分析, 探讨了催化剂在不同条件下对有机工业废水的光催化性能。结果表明, CeO₂-CoO_x/BiVO₄ 复合型光催化剂的降解效果最好, 处理废水 2 h 后 COD 降解效率达到 61%, 说明掺杂负载可以有效提高催化性能; 最佳光照时间为 120 min, 最佳投药量为 1.0 g/L, 且具有良好的稳定性。

关键词: BiVO₄; 光催化; 可见光; 工业废水; 降解

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)06-0185-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.06.036

Preparation of CeO₂-CoO_x/BiVO₄ and its application in photocatalytic degradation of organic industrial wastewater

SUN Xin^{1,2}, DUAN Shu-ru^{1,2}, ZHU Kai-jin^{2*}, ZHU Peng-yu³, LONG Hao-peng²

(1. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Department of Materials Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China; 3. School of Environmental and Biological Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Novel photocatalysts including BiVO₄, CoO_x/BiVO₄ and CeO₂-CoO_x/BiVO₄ are synthesized through impregnation and calcination, and characterized by means of XRD, SEM, TEM, and XPS. Their catalytic performance for industrial wastewater under different conditions is analyzed. The results show that CeO₂-CoO_x/BiVO₄ composite photocatalyst delivers the best degradation effect, over which the COD degradation efficiency of wastewater reaches 61% after 2 hours of treatment, indicating that doping loading can effectively improve catalytic performance. The optimal illumination time and dosage quality are 120 minutes and 1.0 g/L, respectively, and the photocatalyst has good stability.

Key words: BiVO₄; photocatalysis; visible light; industrial wastewater; degradation

工业废水中的有机污染物危及人们的日常生活。因此,工业废水必须经过一系列深度处理,使有机物含量达到标准后才可排放^[1]。深度处理工业废水最常用的方法有 Fenton 氧化法、臭氧催化氧化法和光催化氧化法等^[1]。BiVO₄ 是近年来备受关注的 n 型半导体光催化材料,带隙宽约 2.4 eV,具有良好的可见光响应,是光电分解有机物最有前景的光阳极材料之一^[2]。由于 Bi³⁺ 离子的电子与空穴复合率较高,使得 BiVO₄ 的实际光电子产率不高,所以光催化性能显得不足。通过负载和调控形貌可提高 BiVO₄ 空穴的氧化能力,使其在可见光下表现出优良的光催化性能。由此引入 CoO_x 修饰 BiVO₄ 来有效提高其降解有机物性能。CoO_x 作为一种助催化剂具有独特的电子结构,易与 n 型的 BiVO₄ 形成 p-n 异质结,并在其异质结处产生电位差,使光生电子与空穴发生有效分离,从而抑制了电子-空穴的

复合。CeO₂ 带隙适中,有良好稳定性,可以减少电子-空穴的复合机率^[3]。实验研究表明,CeO₂ 的掺杂可以使催化剂的还原性提高^[4-5]。因此,可考虑在 CoO_x/BiVO₄ 的基础上负载 CeO₂, 进一步提高 BiVO₄ 的光催化性能。

笔者通过水热法和浸渍法合成复合物 CoO_x/BiVO₄ 材料,并在此基础上负载 CeO₂, 最终生成 CeO₂-CoO_x/BiVO₄ 三元复合型催化剂。通过 XRD、SEM、TEM 和 XPS 等表征手段对合成制备的光催化剂进行表征,并利用三维荧光光谱仪对其光催化降解有机工业废水性能进一步加以确认。

1 实验

1.1 实验药品与仪器

1.1.1 实验药品

五水硝酸铋 [Bi(NO₃)₃·5H₂O]、偏钒酸铵

收稿日期: 2023-09-10; 修回日期: 2024-04-01

基金项目: 山西省专利转化专项计划项目(202306010); 大同市重点研发计划项目(2023002)

作者简介: 孙心(1997-), 男, 硕士生, 研究方向为废水深度降解技术, 1399177668@qq.com; 朱开金(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事环境功能材料的研究, 通讯联系人, zkj621104@163.com。

(NH_4VO_3)、氢氧化钠(NaOH)、硝酸钴 [$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$]、无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)、氧化铈(CeO_2)等试剂均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司生产。

1.1.2 仪器

X 射线电子能谱仪(XPS),美国 Thermo Fisher 科技公司生产;JSM-7200F 型扫描电子显微镜,日本 JEOL 公司生产;JEM 2100F 型透射电子显微镜,日本 JEOL 公司生产;BrukerD8X 型 X 射线衍射仪,柜谷科技发展(上海)有限公司生产;SLGH1200-80 型管式马弗炉,合肥科晶材料技术有限公司生产;DZF-6020 型真空干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司生产;JOYN-GHX-DC 型光化学反应仪,上海捷普电子有限公司生产;COD 快速测定仪,北京连华永兴科技发展有限公司生产;FLS1000 型三维荧光光谱仪,英国爱丁堡公司生产。

1.2 催化剂的制备

1.2.1 BiVO_4 材料的制备

将 4.85 g $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 1.17 g NH_4VO_3 放入烧杯,加入 200 mL 去离子水配成混合溶液,把此溶液放到磁力搅拌器上搅拌,0.5 h 后向其中缓慢滴加 1 mol/L 的 NaOH 使 pH 为中性,然后转移到事先准备好的反应釜中,并在 150°C 下反应 4 h,待反应釜冷却后对溶液进行抽滤,随后将其放入干燥箱中 90°C 下真空干燥 1 h,得到纯 BiVO_4 材料。

1.2.2 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 材料的制备

采用浸渍法制备 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 光催化剂,将 0.5 g 的 $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶于 50 mL 蒸馏水中,然后加入 2.0 g 制备的 BiVO_4 粉末。将所得的混合物在 70°C 缓慢加热以蒸发水分。固体残渣在 80°C 下干燥 12 h,然后在马弗炉中 300°C 下煅烧 2 h,得到 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 样品。

1.2.3 $\text{CeO}_2-\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 材料的制备

将 0.5 g CeO_2 浸渍于 50 mL 含有一定量 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 的乙醇溶液中,并充分搅拌 2 h,然后置于 60°C 水浴锅中继续搅拌,直至溶液蒸干。将所得固体放入瓷舟并置于马弗炉中 400°C 下煅烧 4 h,得到 $\text{CeO}_2-\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 样品。

1.3 材料的表征

利用扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)观察所制备的 3 种催化剂的微观结构;利用 X 衍射分析仪(XRD)对各催化剂的结晶形态进行分析;利用 X 射线光电子能谱仪(XPS)对催化剂的化学价态进行表征。

1.4 废水降解实验

分别称取适量的 BiVO_4 、 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 、 $\text{CeO}_2-\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 粉末材料,将其分别加入含有废水的 50 mL 试管中,放入光化学反应仪,在 500 W 氙灯可见光下进行反应,并不断搅拌,每隔 0.5 h 后取出试管,离心后取上清液测试其 COD,并通过反应前后 COD 的变化计算其降解率。通过三维荧光光谱仪对废水进行荧光等高图表征,观察废水中有机物的变化。

2 结果与讨论

2.1 XRD 分析

BiVO_4 有单斜白钨矿型、四方锥石型和单斜四方型 3 种晶型,其在一定条件下会发生相态转变,但只有单斜白钨矿晶型的光催化性能良好,因此制备后晶型不变是很重要的^[6]。纯相 BiVO_4 、 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 与 $\text{CeO}_2-\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 的 XRD 衍射谱图如图 1 所示。从图 1(a)中可以看出,纯相 BiVO_4 在 19° 、 29° 、 30° 、 34° 、 35° 、 40° 、 42° 、 46° 、 50° 、 53° 、 58° 、 59° 的特征峰与标准卡片(JCPDS 14-0688)的(011)、(121)、(040)、(200)、(002)、(112)、(051)、(132)、(060)、(202)、(161)、(321)和(123)晶面相匹配,说明成功制备了纯度较高的 BiVO_4 ^[7]。负载 CoO_x 后, $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 的图谱与纯 BiVO_4 相比,特征峰峰值有所下降,并在 38° 、 55° 、 65° 处出现微弱的特征峰,

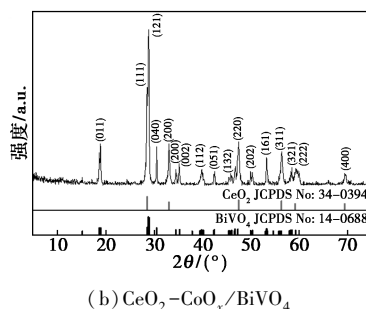
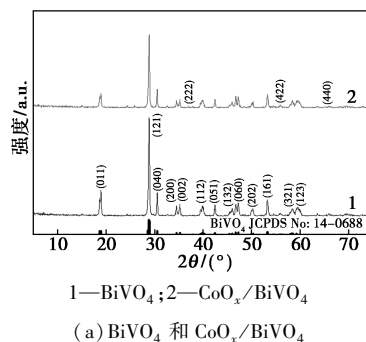


图 1 BiVO_4 、 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 及 $\text{CeO}_2-\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 的 XRD 图谱

对应于标准卡片 (JCPDS 42-1467) 的 (222)、(422)、(440) 晶面^[8], 说明已成功负载 CoO_x 且负载量较少、分散性较均匀^[9]。从图 1(b) 中可以看出, 负载 CeO_2 后的 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 在 28、33、47、56、59、69° 对应于标准卡片 (JCPDS 34-0394) 的 (111)、(200)、(220)、(311)、(222) 和 (400) 晶面, 表明 CeO_2 已经成功负载到所制备的 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 催化剂上^[10], 尖锐的衍射峰表明负载的 CeO_2 具有很好的晶型^[11]。因此, $\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 复合型光催化剂被成功制备。

2.2 SEM 分析

为了观察催化剂的外貌特征及变化, 对所制得的 3 种催化剂分别进行了 SEM 和 TEM 扫描, 结果如图 2 所示。

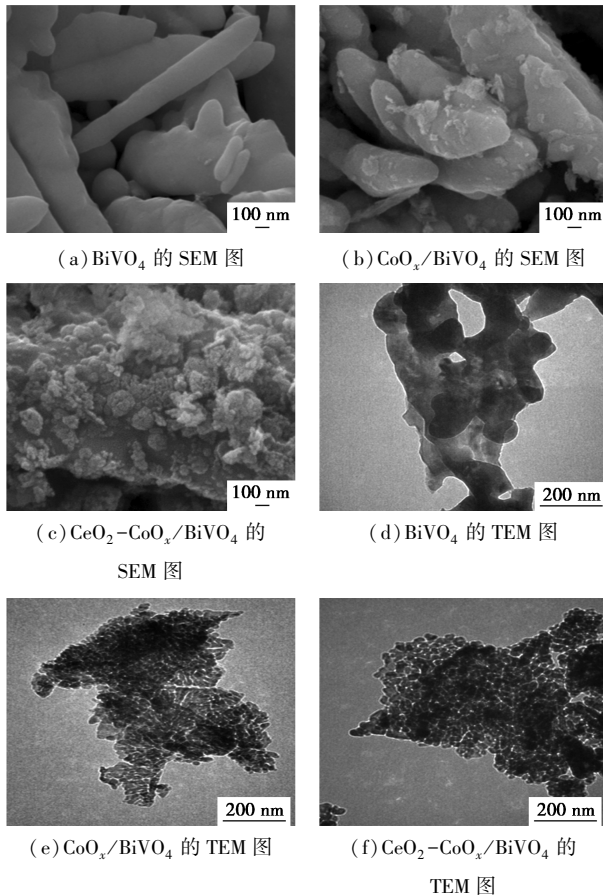


图 2 BiVO_4 、 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 、 $\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 的 SEM 及 TEM 图

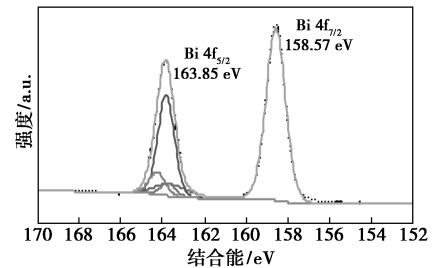
从图 2(a) 中可以看出, 纯 BiVO_4 在水热反应下生成具有表面光滑的棒状结构, 这种棒状结构不是实心的, 而是含有大量的内孔^[12], 如此可以有利于催化反应更好地进行。从图 2(b) 中可以看出, 用浸渍法将 CoO_x 负载到 BiVO_4 上时, 在棒状的 BiVO_4 上负载有部分片状结构的 CoO_x , 这是由于在浸渍过

程中 CoO_x 变得稀疏导致的。这种结构可以使其具有大的比表面积, 有利于提高催化活性^[13]。从图 2(c) 中可以看出, 对比纯 BiVO_4 和 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 可以发现, $\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 催化剂的表面有更多球状细小颗粒, 说明 CeO_2 均匀地分散在表面, 但有些区域分布过于密集, 有堆积现象, 这会对催化剂的性能造成不利影响^[14]。为了更好地分析催化剂, 通过 TEM 观察了催化剂的外貌。从图 2(d) 中可以看出, 纯 BiVO_4 的表面比较光滑。从图 2(e) 中可以看出, 负载 CoO_x 后, 催化剂外部边缘出现了薄层, 变得凹凸不平, 说明通过浸渍法已经成功地将 CoO_x 负载, 这种结构可以增加其表面的吸附作用, 提高光催化活性^[15]。从图 2(f) 中可以看出, 在 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 的基础上负载 CeO_2 后, 边缘薄膜变厚且小颗粒物质增多, 这种结构可增大催化剂的比表面积, 提高其催化降解性能。

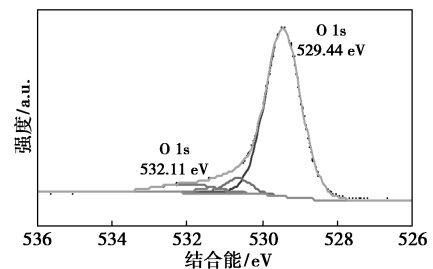
2.3 XPS 分析

为了更加深入了解催化剂的价态情况, 对所制备样品进行了 XPS 测试分析, 结果如图 3 所示。

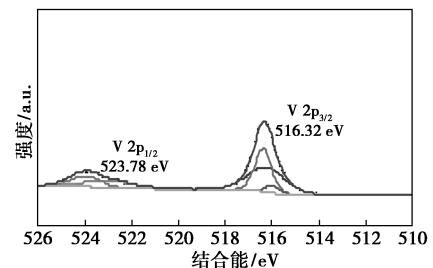
从图 3(a) 中可以看出, 在 158.5 eV 和 163.8 eV 处有 2 个峰, 分别对应于 $\text{Bi } 4f_{5/2}$ 和 $\text{Bi } 4f_{7/2}$, 说明在制备的催化剂中 Bi 元素是以 +3 价的形态存在^[16]。



(a) Bi 4f



(b) O 1s



(c) V 2p

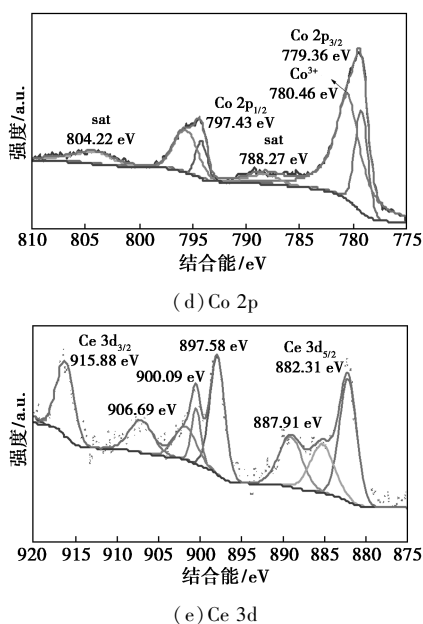


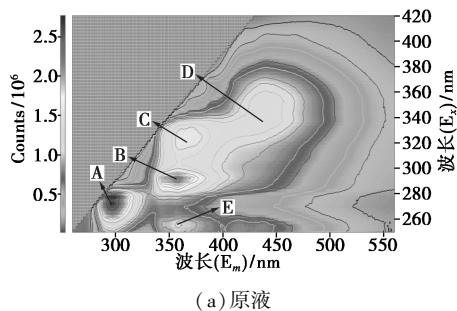
图 3 $\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 催化剂的 XPS 能谱图

从图 3(b)中可以看出,O 元素在 529.47 eV 处的主峰属于氧 O^{2-} , 在 530.62 eV 处拟合出现的峰属于 H_2O 分子^[17]。从图 3(c)中可以看出, 光电子结合能为 516.34 eV 和 523.96 eV 处出现的 2 个峰属于 BiVO_4 中的 V^{5+} 的 $\text{V } 2p_{3/2}$ 和 $\text{V } 2p_{1/2}$ ^[18]。从图 3(d)中可以看出,Co 元素在 779.38 eV 和 797.3 eV 处的主峰是属于 $\text{Co } 2p_{3/2}$ 和 $\text{Co } 2p_{1/2}$, 并且在结合能为 804.47 eV 和 785.92 eV 处出现 2 个卫星峰, $\text{Co } 2p_{3/2}$ 处拟合出 1 个 Co^{3+} 的峰^[19]。从图 3(e)中可以看出, Ce 元素有 6 个分别位于 915.88、906.68、900.09、897.58、887.91、881.69 eV 的峰, 这些是由 Ce 3d 状态产生的, 表明样品中存在大量的 Ce^{4+} , 说明在材料中铈元素是以 CeO_2 的状态出现^[20]。

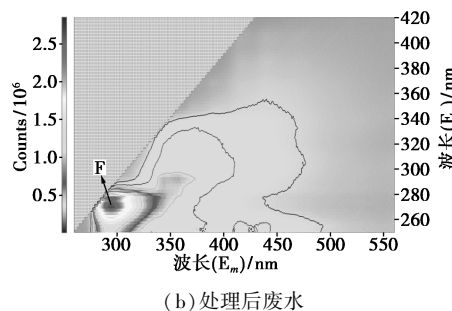
2.4 三维荧光光谱分析

根据废水中有机物成分的荧光, 三维荧光光谱可以有效反映出有机物的组成及变化。运用三维荧光光谱仪对废水的原水及处理后出水进行荧光扫描, 未降解和降解后的废水的荧光光谱图如图 4 所示。

由图 4 可知, 未降解的废水原液主要有 5 个荧光区, 每个荧光区都代表某种有机物。从 E_x/E_m 来看, 峰 A 位于 275/300 nm, 峰 B 处于 290/360 nm, 峰



(a) 原液



(b) 处理后废水

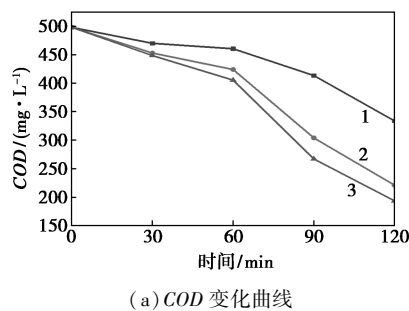
图 4 处理前后废水的三维荧光光谱图

C 位于 325/360 nm, 峰 D 与峰 E 分别位于 340/440 nm 和 255/360 nm 处。研究发现^[21], 峰 A 所处位置与酚类物质有关, 峰 B 是溶解性微生物所在区, 峰 C 是芳香族蛋白质类物质, 峰 D、E 属于类腐殖酸类物质, 这是干馏和煤裂解时产生的成分。废水中含有高环化合物、酚类化合物和腐殖酸类物质, 且经过光催化体系降解后, 峰 B、C、D、E 基本消失, 峰 A 发生变化转变为峰 F, 表明体系中产生的自由基有利于废水中各类荧光有机物的降解和转化, 其中对溶解性微生物与芳香族蛋白质类物质的去除效果最好, 可以降低废水 COD 值, 使得废水的污染得到有效缓解。

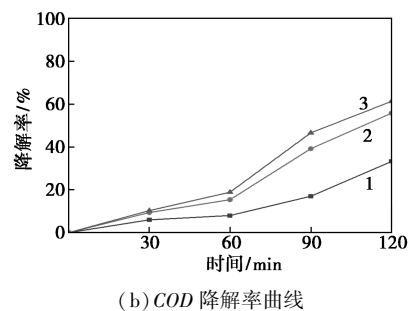
3 光催化降解性能评价

3.1 不同催化剂的降解性能对比

在室温、废水用量为 50 mL、催化剂投加质量均为 50 mg 的条件下, BiVO_4 、 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 、 $\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 光催化剂对废水的光催化降解结果如图 5 所示。



(a) COD 变化曲线



(b) COD 降解率曲线

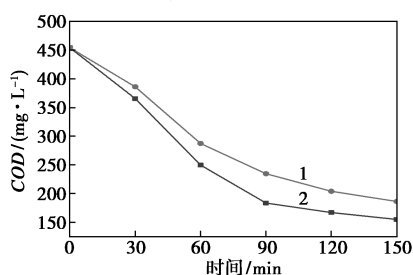
1— BiVO_4 ; 2— $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$; 3— $\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$

图 5 BiVO_4 、 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 和 $\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 对废水 COD 降解率曲线

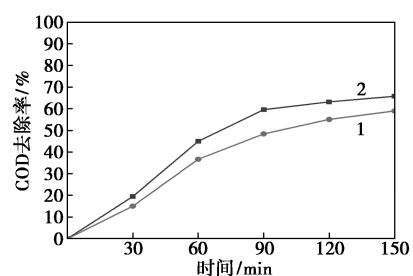
从图5(a)和图5(b)可知,3种所制备的光催化剂在可见光下对废水均有一定的降解效果,随着时间的增长,废水COD的降解率不断提高。其降解效率也相差明显, $\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 在2h后废水的COD变化最大,降解效率为最高,达到61%; $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 催化剂的降解率达到55%,明显高于纯 BiVO_4 的33%,说明三元复合型催化剂 $\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 的催化效果为最好,降解效率为最高。这是因为钴离子可以捕获光生电子,与n型的 BiVO_4 材料形成独特的p-n结构,使得光生电子与空穴分离^[22],增强催化剂表面吸附氢和水的的能力,产生更多的活性因子,进而提高催化降解性能。 CeO_2 的少量掺杂可以更好地利用异质结构提升催化剂的催化能力^[23]。实验结果也表明,光催化降解性能的提高与 BiVO_4 和 CoO_x 的结合有关,而 CeO_2 和 CoO_x 之间也产生了一定的协同作用,使得光催化剂的催化效率有所提升。

3.2 光照时间对降解性能的影响

在其他条件不变的情况下,研究光照时间对COD降解效果的影响,结果如图6所示。



(a) COD变化曲线



(b) COD降解率曲线

1— $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$; 2— $\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$

图6 光照时间对废水COD的去除曲线

从图6(a)可知,在可见光照射120min后,废水的COD值从原本的454 mg/L降低到了167 mg/L和204 mg/L,加入 $\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 的降解速度最快。当可见光照射150min后,废水的COD值达到155 mg/L和186 mg/L,COD质量浓度比光照时间为120min时分别下降了12 mg/L和18 mg/L,COD

值变化不明显,说明在120min时降解效果基本已经达到最好。从图6(b)中可以看出,在120min内去除率随着时间的变化最大,120min到150min去除率逐渐趋于平缓,说明对废水COD的降解已经基本达到了最大,这是因为随着反应的进行,催化剂的活性位点逐渐减少,接近了催化剂的催化极限^[24]。因此,光照时间120min为废水COD降解的适宜选择。

3.3 催化剂投加量对降解性能的影响

$\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 和 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 光催化剂添加量与COD去除率的关系如表1所示。

表1 不同催化剂投加量对COD去除率的影响

投药量/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 去除率/%	$\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 去除率/%
0.5	48.0	58.3
1.0	54.9	63.2
1.5	53.2	61.0
2.0	51.5	60.4
2.5	48.8	56.1

从表1可知,随着投药质量的增加,COD降解率呈先升后降的趋势,可见催化剂的投药量对废水COD降解率有一定影响。当催化剂的量从0.5 g/L增加至1.0 g/L时,COD降解率呈上升趋势,但是当添加量继续从1.0 g/L增加到2.5 g/L时,COD的降解率反而逐渐变低。这是由于刚开始催化剂投加量的增加,使其提供的活性位点变多,更大程度上吸附光子和有机分子,提升了降解效率,但是随着投加量的继续增加,催化剂的量已经饱和,加入催化剂后降低了透光度,使光线产生漫反射,降低了对光的吸收能力,使得COD的降解效率反而下降^[24]。因此光催化剂的最理想投药量为1.0 g/L。

4 结论

利用水热法制备了纯 BiVO_4 的光催化剂,并在此基础上通过浸渍和煅烧分别制备了复合催化剂 $\text{CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 与 $\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$,并通过XRD、SEM、TEM和XPS等手段对催化剂进行了表征,探究其外貌结构与元素价态;考察了不同条件下不同催化剂的光催化降解性能:在可见光照射下,三元 $\text{CeO}_2\text{-CoO}_x/\text{BiVO}_4$ 催化剂表现出最为优异的光催化活性;在120min的光照时间和1.0 g/L投药量下可以达到最佳降解效果。

参考文献

[1] 贾文珍,陈会英,蓝浩铭,等.工业废水易挥发有机污染物种类

- 和含量的测定[J].化学世界,2020,(3):203-207.
- [2] 高晓明,付峰,吕磊,等.掺杂型光催化剂 Ag-BiVO₄ 的制备及其光催化降解含酚废水的研究[J].精细石油化工,2012,29(1):30-34.
- [3] 李鹏鹏,苏复,顾正桂.CeO₂-Ag/AgBr 复合微球的合成及光催化性能[J].材料工程,2020,48(9):69-76.
- [4] Ma R,Zhang S,Wen T,*et al.*A critical review on visible-light-response CeO₂-based photocatalysts with enhanced photooxidation of organic pollutants[J].Catalysis Today,2019,335:20-30.
- [5] Lu G,Lun Z,Liang H,*et al.*In situ fabrication of BiVO₄-CeVO₄ heterojunction for excellent visible light photocatalytic degradation of levofloxacin[J].Elsevier,2019,7729:121-131.
- [6] 龙明策.新型光催化剂的制备、表征及其光催化活性的调控机制[D].上海:上海交通大学,2007.
- [7] 王妍,次立杰,林双龙,等.三维花状微球 BiVO₄ 的制备及活性研究[J].煤炭与化工,2022,45(7):122-126.
- [8] Yamakata A,Ranasinghe C,Hayashi N,*et al.*Identification of individual electron- and hole-transfer kinetics at CoO_x/BiVO₄/SnO₂ double heterojunctions[J].ACS Applied Energy Materials,2020,3(1):1207-1214.
- [9] 刘婷婷.钴基催化剂/钒酸铋复合光阳极增强光电化学水氧化[D].兰州:西北师范大学,2020.
- [10] Wu X,Chen Z,Yu X,*et al.*Mechanism by which three-dimensional ordered mesoporous CeO₂ promotes the activity of VO_x-MnO_x/CeO₂ catalysts for NO_x abatement: Atomic-scale insight into the catalytic cycle[J].Chemical Engineering Journal,2020,399:125629.
- [11] Collins,Sebastian E,Bosco,*et al.*In situ FT-IR and Raman study on the distribution and reactivity of surface vanadia species in V₂O₅/CeO₂ catalysts [J]. Journal of Molecular Catalysis, A. Chemical, 2015,408:75-84.
- [12] Kim J Y,Youn D H,Kang K,*et al.*Highly conformal deposition of an ultrathin FeOOH layer on a hematite nanostructure for efficient solar water splitting[J].Angew Chem Int Ed Engl,2016,128(36):11012-11016.
- [13] 姜晓娟.钴分子催化剂作为助催化剂前驱体对 BiVO₄ 光阳极水氧化性能的调控[D].大连:大连理工大学,2017.
- [14] 王泽华,杜力勤,于震源,等.BiVO₄/CeO₂ 复合光催化材料的制备及其降解甲基橙废水的研究[J].化工时刊,2020,34(1):1-4.
- [15] Jae,Young, Kim,*et al.*Nanostructure-preserved hematite thin film for efficient solar water splitting[J].ACS Applied Materials & Interfaces,2015,7(25):14123-14129.
- [16] Liu Q,Mo R,Li X L,*et al.*Cobalt phosphate modified 3D TiO₂/BiVO₄ composite inverse opals photoanode for enhanced photoelectrochemical water splitting[J].Applied Surface Science,2019,464:544-551.
- [17] Wang J,Liu C,Yang S,*et al.*Fabrication of a ternary heterostructure BiVO₄ quantum dots/C₆₀/g-C₃N₄ photocatalyst with enhanced photocatalytic activity[J].Journal of Physics and Chemistry of Solids,2019,136:109164.
- [18] Liu Y,Guo Y,Schelhas L T,*et al.*Undoped and Ni-doped CoO_x surface modification of porous BiVO₄ photoelectrodes for water oxidation[J].J Phys Chem C,2016,120(41):23449-23457.
- [19] Nakashima S,Negishi R,Tada H.Visible-light-induced water oxidation by a hybrid photocatalyst consisting of bismuth vanadate and copper(II) meso-tetra(4-carboxyphenyl) porphyrin [J]. Chemical Communications,2016,53(18):3665-3668.
- [20] 孟凡明,范拯华,史国利,等.CeO₂ 微结构的水热合成和光学性质[J].安徽大学学报:自然科学版,2015,(6):37-44.
- [21] 高静恬,蔡怡婷,李卫平,等.Fe²⁺ 活化过硫酸盐预处理焦化废水试验研究[J].应用化工,2022,(7):2008-2013.
- [22] Zhu P,Sun X,Zhu K,*et al.*Preparing Co-Pi/BiVO₄ for effective degradation of sulfur-containing organics in wastewater[J].Environmental Technology & Innovation,2022,28:102928.
- [23] Xin W,Song Y.Mesoporous carbons:Recent advances in synthesis and typical applications [J]. Cheminform, 2015, 5 (101) : 83239-83285.
- [24] 司有良,陈晨,崔方洲,等.磷酸铋光催化降解焦化废水的研究[J].中国环境管理干部学院学报,2017,27(5):69-73. ■
- (上接第 184 页)
- [5] 刘天璐,刚杰,刘超.生活垃圾焚烧发电烟气中 NO_x 污染控制技术综述[J].资源节约与环保,2019,214(9):109-111.
- [6] 罗晨,马素霞,崔志刚,等.基于碳酸氢铵的 SNCR 低温脱硝实验研究[J].热能动力工程,2022,37(8):128-134,142.
- [7] 能士峰,刘庆岭,张旺,等.垃圾焚烧 SCR 脱硝催化剂的研究进展[J].现代化工,2022,42(2):31-34.
- [8] 朱伟,朱玲玲,安新,等.几种脱硝技术分析研究[J].中国水泥,2022,244(9):63-66.
- [9] 刘婷,张文涛.烟气高分子脱硝(PNCR法)工艺浅析[J].玻璃,2020,47(9):28-31.
- [10] 朱传强,茹晋波,扈明东,等.垃圾焚烧电厂高分子非催化还原(PNCR)脱硝技术应用分析[J].工程热物理学报,2021,42(6):1600-1607.
- [11] 杨会江,田炳兰.一种聚天冬氨酸烟气脱硫脱硝剂及其制备方法和应用:中国,107617336[P].2018-01-23.
- [12] 罗贤明,罗贤辉.一种可用于燃煤烟气脱硝的脱硝剂的制备方法:中国,11453470[P].2022-05-27.
- [13] 钱研,王学斌,杨朋辉,等.一种高效烟气脱硝剂及其脱硝处理工艺:中国,115487664[P].2022-12-20.
- [14] 程广文,杨嵩,姚明宇,等.一种可用于燃煤烟气脱硝的脱硝剂及其制备方法:中国,109107373[P].2020-12-11.
- [15] 白鹏飞,刘闯,王柳,等.聚丙烯酰胺/玄武岩纤维复合水凝胶的制备及性能[J].合成化学,2023,31(11):872-881.
- [16] 胡小明,颜英杰,李青彬,等.用双螺杆挤出机制备聚琥珀酰亚胺的绿色合成工艺研究[J].化学试剂,2020,42(4):463-467.
- [17] Tudorachi N,Chiriac A P.TGA/FT-IR/MS study on thermal decomposition of poly(succinimide) and sodium poly(aspartate) [J].Polymer Testing,2011,30(4):397-407.
- [18] 吉娜,姜丽艳.水处理剂聚天冬氨酸的合成及其降解性能研究[J].广东化工,2015,42(24):73-74.
- [19] John D, Kim L. Thermogravimetric study of polyacrylamide with evolved gas analysis [J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 1993, 31 (7) : 1807-1823.
- [20] Kronimus A, Schwarzbauer J. Analysis of structurally modified polyacrylamides by on-line thermochemolysis-GC-MS [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2007, 80 (2) : 471-476.
- [21] Caulfield M, Qiao G, Solomon D. Some aspects of the properties and degradation of polyacrylamides [J]. Chemical Reviews, 2002, 102 (9) : 3067-3084. ■