

引用格式:朱薇,尹晓彤,王文婷,等. 3D多孔  $Y_2O_3/GO$  复合材料的制备及对 CR 光催化降解研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2026,44(3):37-47. [Zhu Wei, Yin Xiaotong, Wang Wenting, et al. Preparation of 3D porous  $Y_2O_3/GO$  composites and its photocatalytic degradation of congo red (CR)[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences),2026,44(3):37-47.]

## 3D 多孔 $Y_2O_3/GO$ 复合材料的制备 及对 CR 光催化降解研究

朱薇<sup>1,2</sup>, 尹晓彤<sup>1</sup>, 王文婷<sup>1</sup>, 叶志娟<sup>1</sup>, 林维扬<sup>1</sup>, 江学良<sup>2\*</sup>

(1. 武汉软件工程职业学院(武汉开放大学)生命健康学院,湖北武汉 430205;  
2. 武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北武汉 430205)

**摘要:**以六水硝酸钇( $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ )和氧化石墨烯(GO)为前驱体,采用水热合成路径构建了氧化钇与氧化石墨烯( $Y_2O_3/GO$ )复合水凝胶体系,经冷冻干燥工艺处理获得多孔结构复合气凝胶材料,并将其应用于染料废水的净化处理。通过傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、X射线光电子能谱(XPS)、扫描电子显微镜(SEM)、能量色散X射线光谱(EDS)、 $N_2$ 吸附-脱附测试、紫外-可见漫反射光谱(Uv-vis DRS)等分析手段系统表征了该复合材料的微观结构特征,并深入探讨了该材料对刚果红(CR)染料的光催化降解机理。结果表明: $Y_2O_3$ 被引入到复合气凝胶表层,并构建了具有三维(3D)立体结构的多孔材料; $Y_2O_3/GO$ 复合材料的能带间隙变窄,光敏特性增强,对染料的光催化去除效果好; $Y_2O_3/GO$ 复合材料对阴离子染料去除率高,在酸性条件下对CR溶液去除效果最好,去除量为 $432.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

**关键词:**氧化钇;氧化石墨烯;复合材料;光催化

中图分类号:O643.36 文献标识码:A 文章编号:1004—5570(2026)03—0037—11

DOI:10.16614/j.gznuj.zrb.2026.03.004

### Preparation of 3D porous $Y_2O_3/GO$ composites and its photocatalytic degradation of congo red (CR)

Zhu Wei<sup>1,2</sup>, Yin Xiaotong<sup>1</sup>, Wang Wenting<sup>1</sup>, Ye Zhijuan<sup>1</sup>,  
Lin Weiyang<sup>1</sup>, Jiang Xueliang<sup>2\*</sup>

(1. School of Life and Health, Wuhan Vocational College of Software and Engineering(Wuhan Open University),  
Wuhan, Hubei 430205, China; 2. School of Material Science and Engineering,  
Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430205, China)

**Abstract:** In this study, yttrium nitrate hexahydrate ( $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ) and graphene oxide (GO) were employed as precursors. A yttrium oxide/graphene oxide ( $Y_2O_3/GO$ ) composite hydrogel system

收稿日期:2026-01-04

基金项目:湖北省自然科学基金计划项目(2025AFC111);武汉软件工程职业学院(武汉开放大学)高层次人才科研启动经费项目(KYQDJF2026001)

作者简介:朱薇(1983-),女,博士,副教授,研究方向:复合材料与功能高分子材料,E-mail:554115691@qq.com.

\*通信作者:江学良(1972-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向:有机-无机杂化材料与功能高分子材料,E-mail:jiangxli@wit.edu.cn.

was constructed via a hydrothermal synthesis route, which was subsequently subjected to freeze-drying to yield a porous composite aerogel material. This material was then applied to the purification of dye-containing wastewater. The microstructure and properties of the composite were systematically characterized by a suite of analytical techniques, including Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS),  $N_2$  adsorption-desorption analysis, and ultraviolet-visible diffuse reflectance spectroscopy (UV-vis DRS). Additionally, the photocatalytic degradation mechanism of the material toward congo red (CR) dye was investigated in depth. The results demonstrated that  $Y_2O_3$  was immobilized on the surface of the composite aerogel, forming a three-dimensional porous architecture. The  $Y_2O_3/GO$  composites exhibited a narrowed band gap and enhanced photosensitive properties, which contributed to its excellent photocatalytic performance in dye removal. Notably, the composite showed a high removal efficiency for anionic dyes; under acidic conditions, it achieved an optimal removal capacity of  $432.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  for CR solution.

**Keywords:** yttrium oxide; graphene oxide; composite material; photocatalysis

## 0 引言

随着工业经济的快速发展,人类赖以生存和生产的生态环境受到不同程度的污染与破坏。有机染料是能使纺织品、纸张等获得颜色的有机化合物,由于其生产排放的废水中含有难以降解的化学物质,可造成水污染,在一定程度上破坏了生态环境<sup>[1-4]</sup>。光催化降解是通过光催化剂吸收光能产生电子-空穴对,这些电子和空穴进一步与水或氧气反应,生成活性物种氧化分解污染物的技术,具有高效、清洁、环境友好等优点,可有效治理有机染料引起的水污染<sup>[5-8]</sup>。目前,典型的光催化剂主要包括  $TiO_2$ <sup>[9]</sup>、稀土氧化物<sup>[10]</sup>、 $ZnO$ <sup>[11]</sup>、石墨烯<sup>[12]</sup>和  $C_3N_4$ <sup>[13]</sup>。

氧化钇( $Y_2O_3$ )是一种关键的稀土氧化物<sup>[14-17]</sup>,因在反应活性、比表面积、光学性能等方面具有优异特性,在催化过程、紫外吸收屏蔽等领域受到了广泛关注<sup>[18-20]</sup>。孙孟佳等<sup>[21]</sup>利用碳吸附沉淀法合成的  $Y_2O_3$  纳米粉体,具有分散性良好、粒径分布窄等性能,光催化甲基橙效果最佳(80 min 内降解率达 78%); Michel 等<sup>[22]</sup>采用共沉淀法,经煅烧后形成的  $Y_2O_3$  (由纳米结构的半球组成),尺寸在  $1.7 \sim 2.5 \mu\text{m}$  之间,可用于光催化降解刚果红(去除率为 71%)、孔雀石绿(去除率为 94%);江学良等<sup>[23]</sup>通过水热合成的  $Y_2O_3$  (中空纳米花结构),在处理  $K_2Cr_2O_7$  溶液时表现出优异性能,去除率可达 88.5% (容量达  $11.06 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )。然而,  $Y_2O_3$  作为一种宽禁带半导体材料,难以被可见光激发产生电

子-空穴对,其在可见光下光催化效果差。有研究显示,将  $Y_2O_3$  与其他材料复合,制备出的复合催化材料的禁带宽度减小,可有效提高其光催化性能<sup>[24]</sup>。

氧化石墨烯(GO)是一种由紧密堆积的碳原子形成的二维结构,具有优异的化学稳定性、高导电性和较强的吸附能力,可与半导体构建高性能的光催化复合材料<sup>[25]</sup>。Ahmed 等<sup>[26]</sup>将  $CeO_2$  与还原氧化石墨烯(rGO)结合制备的复合材料,不仅能显著抑制光生载流子复合,还能提高电子转移效率; Devi 等<sup>[27]</sup>采用水热法制备的掺钇二氧化钛/氧化石墨烯(YTGO)纳米复合材料,具有纳米粒子尺寸相对较小、禁带宽度减小(3.04 eV)等性能,其光催化性能显著提高,对罗丹明 B 达 97% 的降解率; Zhang 等<sup>[28]</sup>采用水热法制备的新型纳米片状结构的钇掺杂氧化石墨烯(GOY)复合材料,具有较小的禁带宽度(3.62 eV)、更好的光催化降解亚甲基蓝性能,可在 10 min 内完全降解 MB ( $17.35 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )。

基于此,本研究采用水热和冷冻干燥法制备  $Y_2O_3/GO$  复合材料,并用于光催化降解有机染料,同时探究各种因素对光催化性能的影响及光催化机理,为有机染料污染的治理提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 实验试剂

实验所用试剂见表 1。

### 1.2 氧化石墨烯(GO)气凝胶的制备

基于改进的 Hummers 法合成氧化石墨烯<sup>[29]</sup>。

步骤:1)将体积为45 mL、浓度为4 mg·mL<sup>-1</sup>的氧化石墨烯分散液与180 mg 抗坏血酸进行充分混合后,置于水热反应器中,在恒温120 °C条件下反应12 h;2)将所得产物经去离子水反复清洗后形成水凝胶,再通过冷冻干燥机冷冻干燥处理24 h,得到氧化石墨烯气凝胶材料。

表1 实验所用试剂

Tab.1 Reagents used in the experiment

试剂名称	纯度	生产厂家
天然石墨粉	97%	国药集团化学试剂有限公司
六水硝酸钇 Y(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	AR	阿拉丁试剂(上海)有限公司
抗坏血酸(AC)	AR	阿拉丁试剂(上海)有限公司
尿素	AR	阿拉丁试剂(上海)有限公司
聚乙烯吡咯 烷酮(PVP)	AR	阿拉丁试剂(上海)有限公司
氨水	AR	阿拉丁试剂(上海)有限公司
氧化钇(Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	AR	阿拉丁试剂(上海)有限公司
甲基橙(MO)	AR	国药集团化学试剂有限公司
亚甲基蓝(MB)	AR	国药集团化学试剂有限公司
罗丹明 B(RhB)	AR	国药集团化学试剂有限公司
刚果红(CR)	AR	国药集团化学试剂有限公司

### 1.3 氧化钇/氧化石墨烯(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO)复合材料的制备

步骤:1)称量PVP(0.446 g)与Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O(0.766 g),混合,加入一定量氨水,置于100 mL聚四氟乙烯内衬中,再加入66 mL无水乙醇,放在磁力搅拌器上搅拌形成溶液A;2)配置浓度为2 mg·mL<sup>-1</sup>的GO溶液,用超声波振荡器振荡形成溶液B;3)将一定体积的B溶液加入到A溶液中,Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O与GO的质量比分别为5:1、10:1、20:1、30:1(4种配比均进行下一步反应),所得混合液分别搅拌30 min后放入反应釜,在160 °C下反应16 h,生成Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合水凝胶;4)将所得复合水凝胶用水冲洗3次后,通过冷冻干燥机冷冻干燥48 h,得到Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合气凝胶材料。

### 1.4 测试与表征

采用Nicolet 6700型号的傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR, Nicolet 6700, 美国 Thermo 公司),对样品的红外吸收特性进行光谱分析。采用JSM-5510LV型号扫描电子显微镜(SEM, JSM-5510LV, 日本 Jeol 公司),对样品的表面形貌和微观结构进行观测。采用BrukerD8 Advance型的X射线衍射仪(XRD, BrukerD8 Advance, 德国 Bruker 公司)进行

X射线衍射实验。采用Kruss DSA100型号的接触角测试仪(CA, Kruss DSA100, 德国 Kruss 公司),对样品的亲水性与疏水性进行测定。通过Autosorb IQ全自动比表面和孔径分布分析仪(N<sub>2</sub> sorption isotherm, Nova 2000e, 美国 Quantachrome 公司),对N<sub>2</sub>吸附-脱附等温线及孔径分布曲线进行分析,并据此计算出BET比表面积和BJH孔径分布。采用Lambda-35型分光光度计(Uv-vis DRS, Lambda-35, 美国 PerkinElmer 公司)进行Uv-vis DRS光谱分析。

### 1.5 光催化实验

采用210 W 氙灯作为辐照系统(该光源可同时提供可见光谱与紫外波段),以评估染料分子在不同光照条件下的光催化降解效能。步骤:1)实验配置50 mL模拟废水样本,添加15 mg的Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合气凝胶材料,鉴于原料比例测试结果,本实验使用的Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合气凝胶材料均采用质量比为10:1的Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O与GO配比材料;2)暗环境中搅拌30 min后,置于氙灯光照下进行光催化反应,并按预设时间间隔取样;3)所得样品经离心分离后获取上清液,利用紫外-可见分光光度法测定其吸光度A<sub>t</sub>值的变化特征;4)通过吸光度评估有机染料含量,计算去除率(α)。

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

式中:A<sub>0</sub>表示起始染料的吸光值;A<sub>t</sub>代表反应终止时染料的吸光值。

染料去除量(q<sub>t</sub>)的计算公式:

$$q_t = \frac{c_0 - c_t}{m} \times V \quad (2)$$

式中:c<sub>0</sub>表示起始溶液的质量浓度;c<sub>t</sub>为反应t时的溶液浓度;m指催化剂用量;V代表溶液总体积。

## 2 结果与分析

### 2.1 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料的表征

#### 2.1.1 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料的成份分析

图1(a)是Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、GO、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合气凝胶的红外光谱图。该光谱图显示:3 446 cm<sup>-1</sup>处存在-OH基团的伸缩振动特征吸收带,1 626 cm<sup>-1</sup>处观察到C=O键的伸缩振动吸收峰,570 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰归属于Y-O伸缩振动<sup>[30]</sup>;3 428 cm<sup>-1</sup>处的特征峰归属于-OH伸缩振动,1 737 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰表征了C=O伸缩振动,1 624 cm<sup>-1</sup>处的峰反映了

C=C 伸缩振动;1 068  $\text{cm}^{-1}$ 处为 C-H 弯曲振动和 C-O 伸缩振动;3 457  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰对应羟基-OH伸缩振动,1 657  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰代表了  $\text{COO}^-$  基团的伸缩振动,568  $\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰归属于 Y-O 伸缩振动。可见,水热反应成功制备了  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{GO}$  复合材料。

图 1 (b) 是  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{GO}$  复合气凝胶的 XRD 衍射图谱。该图谱显示:在 20.7°、29.4°、

33.6°、48.6°、57.7°处出现的衍射峰分别归属于晶面(211)、(222)、(400)、(440)、(622),其特征与  $\text{Y}_2\text{O}_3$  的标准衍射数据(JCPDS No. 41-1105)相吻合,说明样品展现出立方相  $\text{Y}_2\text{O}_3$  的结晶完整性。此外,衍射峰的锐利度及无杂峰的出现,也进一步证实了制备的  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{GO}$  复合材料的  $\text{Y}_2\text{O}_3$  组分具有较高的结晶质量。

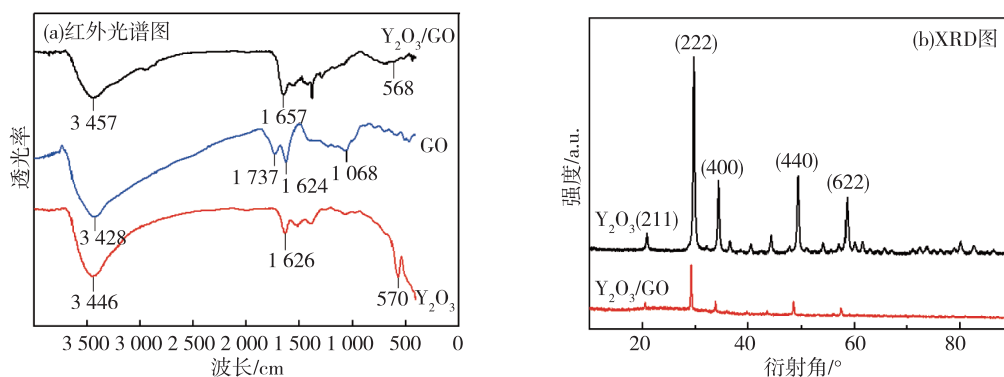


图 1 样品的红外光谱和 XRD 图

Fig. 1 FT-IR spectra and XRD patterns of samples

XPS 可用于分析确定  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{GO}$  复合材料的化学状态。图 2(a) 是  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{GO}$  复合材料的 Y 3d 的 XPS 图谱,位于 157.03 eV 的特征峰对应 Y 3d<sub>3/2</sub>, 位于 159.09 eV 的特征峰对应 Y 3d<sub>5/2</sub>, 表明 Y 元素为 +3 价<sup>[28]</sup>。图 2(b) 是  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{GO}$  复合材料的 O 1s 的 XPS 图谱,530.22 eV 处属于晶格氧,说明

$\text{Y}_2\text{O}_3$  晶体存在。图 2(c) 是  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{GO}$  复合材料的 C 1s 的 XPS 图谱,283.89、286.07、287.01 eV 处的峰值分别对应 C-C、C-O、C=O,说明含氧基团较高,通过捕捉光生空穴能提高强氧化性·OH 自由基的形成,增加化学吸附表面的·OH 并进一步提高光催化性能。

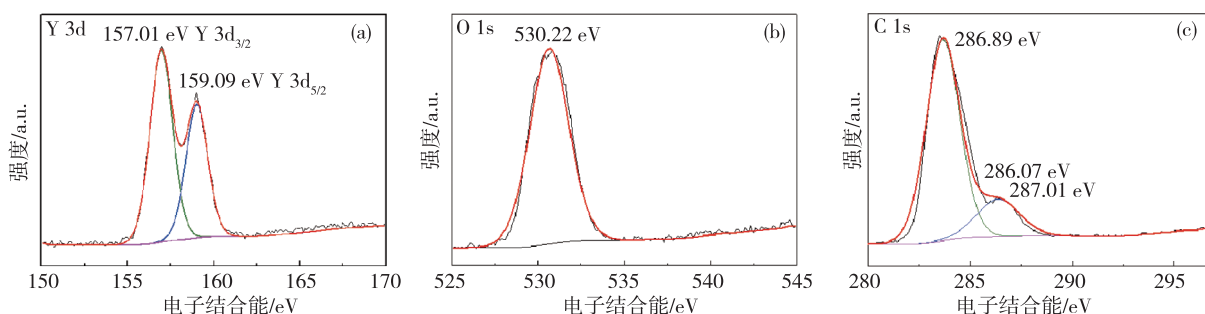


图 2  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{GO}$  复合材料的 XPS 能谱

Fig. 2 XPS patterns of  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{GO}$  composites

### 2.1.2 $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{GO}$ 复合材料的结构分析

图 3 是水热法制备的 GO 气凝胶、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{GO}$  复合材料的 SEM 图。结果显示, $\text{Y}_2\text{O}_3$  负载于 GO 表面后,表面分布较为均匀,气凝胶的褶皱和孔减少,改变了 GO 气凝胶的表面形貌,而表面存在颗粒感是由  $\text{Y}_2\text{O}_3$  聚集造成的。

图 4 展示了  $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{GO}$  复合材料的 SEM-EDS 的表征结果,面扫描图谱表明该复合材料中含有

C、O、Y 这 3 种元素,且各元素在样品表面呈现均匀分布状态。对特定区域进行的点扫描分析显示,样品中 O 原子与 Y 原子的摩尔比约为 14.5,显著高于  $\text{Y}_2\text{O}_3$  的理论化学计量比(O:Y = 1.5)。表明复合材料表面吸附了大量  $\text{O}_2$ ,这些  $\text{O}_2$  可通过与光生电子发生多步反应,生成高活性的羟基自由基·OH,从而有效增强  $\text{Y}_2\text{O}_3$  的光催化性能。

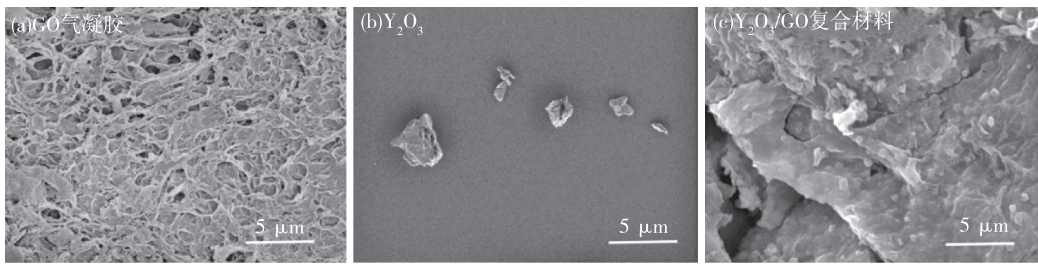


图3 样品的SEM图

Fig.3 SEM photographs

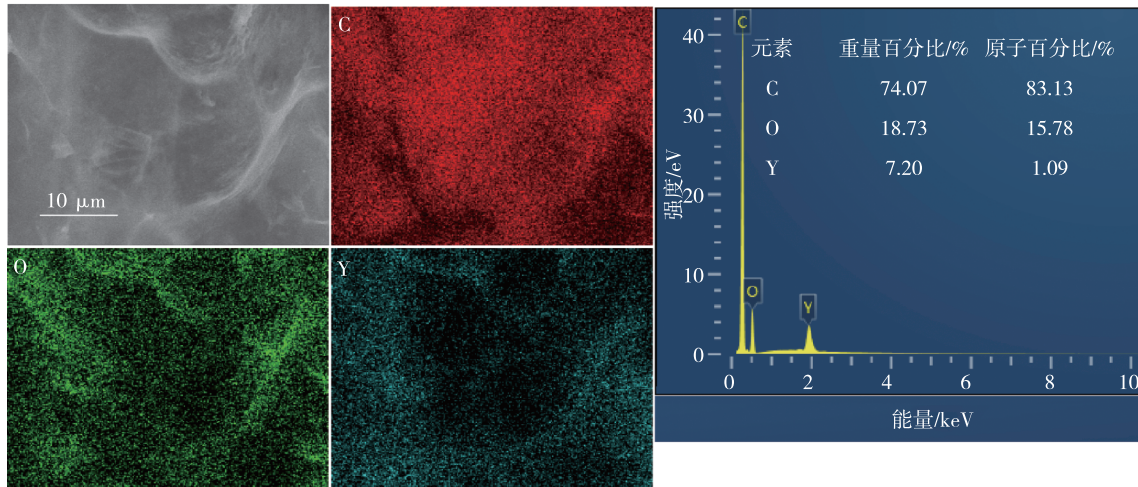


图4 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料的元素映射图像和EDS分析

Fig.4 Elemental mapping images and EDS analysis of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO composites

图5为Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料的N<sub>2</sub>吸附-脱附曲线、孔径分布曲线、GO气凝胶的孔径分布曲线。由图5(a)可见,曲线呈现显著滞后回环,证实Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料内部存在介孔特征。通过BET模型计算,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料的比表面积为

11.939 4 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>。由图5(b)可见,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料的孔径主要为2.457 nm的介孔。由图5(c)可见,由于Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的负载,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料的孔径相比于GO气凝胶(9.192 nm)减小。

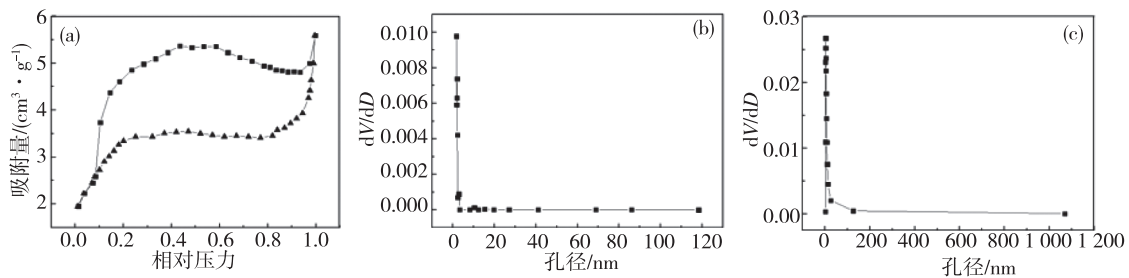


图5 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料的N<sub>2</sub>吸附-脱附等温线(a),BJH孔径分布曲线(b)和GO气凝胶的孔径分布曲线(c)

Fig.5 N<sub>2</sub> adsorption-desorption curve(a) and BJH pore size distribution curve(b) of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO composites,

BJH pore size distribution curve(c) of GO hydrogel

分别对GO气凝胶和Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料进行接触角测试(图6),发现Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料的接触角(65.6°)大于GO气凝胶的接触角,显示Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料具有一定的亲水性。Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>虽不溶于水,但具有一定的亲水性,在GO表面负载

Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>后,接触角增大,其亲水性会有所降低。

## 2.2 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料的光催化性能分析

### 2.2.1 原料比例的影响

图7(a)是不同原料比例Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料对CR(阴离子染料)、MB(阳离子染料)的去除率,

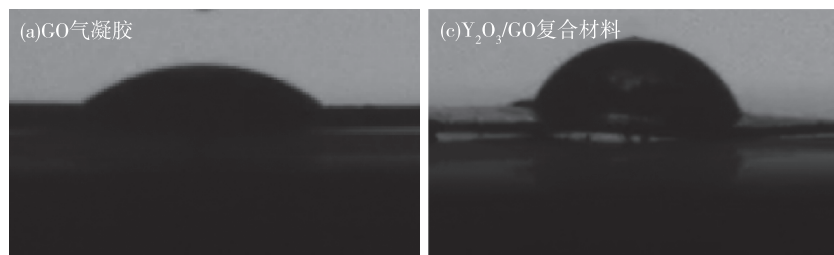


图6 GO气凝胶和Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料的接触角

Fig. 6 Contact angle of samples of GO aerogel and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO composites

Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O与GO的质量比分别为5:1、10:1、20:1和30:1。分别选择50 mL初始浓度为120 mg·L<sup>-1</sup>的CR、MB溶液,在可见光下研究不同质量比对光催化性能的影响。图7(a)结果显示:随着Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O用量的提升,2种染料去除效率均呈现出上升趋势;当Y(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O与GO的质量配比为10:1时,对CR、MB的去除效果最优,去除率分别为79.37%、18.15%,去除量分别为317.45、72.6 mg·g<sup>-1</sup>。

### 2.2.2 染料初始浓度对光催化去除性能的影响

鉴于Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料对MB的光催化去除效果不好,见图7(a),故以CR作为光催化对象,研究了Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO的光催化去除性能影响。由图7(b)可见:随着CR浓度的提高,去除率下降;当初始浓度为250 mg·L<sup>-1</sup>时,去除量最大,为563.66 mg·g<sup>-1</sup>。可见,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料对CR具有良好的去除效果。

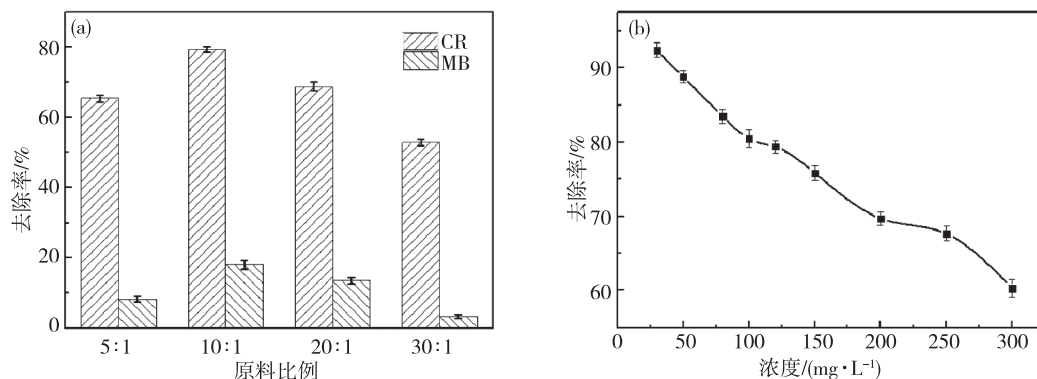


图7 不同比例Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料对CR、MB溶液去除率的影响和染料初始浓度对Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料去除CR溶液的影响

Fig. 7 Effect of the raw material ratio on CR and MB removal rate and effect of initial concentration on CR removal rate of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO composites

### 2.2.3 pH值对Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料去除性能的影响

取50 mL浓度为180 mg·L<sup>-1</sup>的CR溶液各13份,分别调节其pH值为1~13,各加入15 mg的Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料在可见光下进行光催化降解反应,反应时间为6 h。由图8(a)可见:随着pH值增大,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料对CR溶液的光催化效果逐渐减小;酸性条件下,去除效果最好,去除率为72.02%,去除量为432.12 mg·g<sup>-1</sup>。CR为阴离子染料,表面带有负电荷,在碱性条件下,CR离子与OH<sup>-</sup>在Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料反应位点上产生竞争,导致去除率低。

### 2.2.4 对不同染料的去除效果

为考察Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料对不同染料的光催化去除差异,选择浓度为120 mg·L<sup>-1</sup>的CR、MO、MB、RhB染料作为光催化降解对象,在紫外光下各染料去除率见图8(b)。发现去除率表现为CR(79.37%)>MO(24.22%)>MB(18.15%)>RhB(10.5%),说明Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料对阳离子与阴离子型染料具有显著的选择性差异。这是因为Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在水环境中呈现正电性,CR与MO作为阴离子染料带负电荷,二者间形成的强烈静电相互作用促使了染料分子接近并占据活性位点,进而促进光催化降解反应进行,实现较高的去除率。

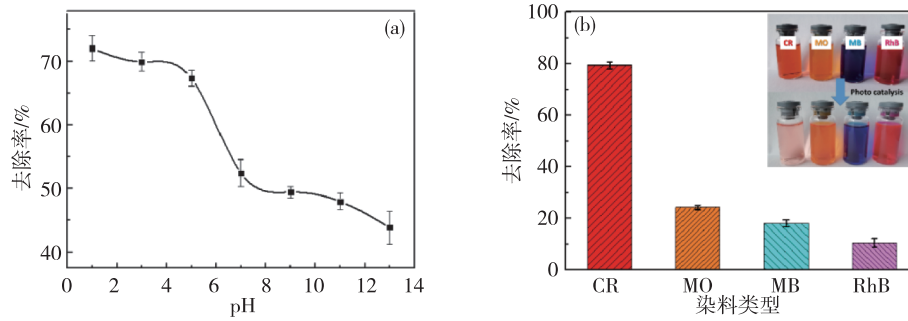


图8 不同pH值溶液中Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料对CR溶液去除率的影响和对不同染料去除性能的选择性

Fig. 8 Effect of pH on CR removal rate of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO composite aerogel and removal properties of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO composites on different dyes

2.2.5 不同光源下的光催化效果

鉴于光催化反应与光源的关系,研究了可见光与紫外光下Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对染料的去除率。图9表明,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在紫外光照射条件下的催化效能显著高于可见光。可能是Y元素作为荧光物质对紫外光的特殊敏感性,使得其在紫外光照射

时表现出更佳的光催化活性。水热合成后,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料在可见光下的光催化性能较Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>显著提升,在2种光源下的光催化性能差异减小,说明Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料在可见光下具有较高的光催化活性,是一种高活性的光催化剂。

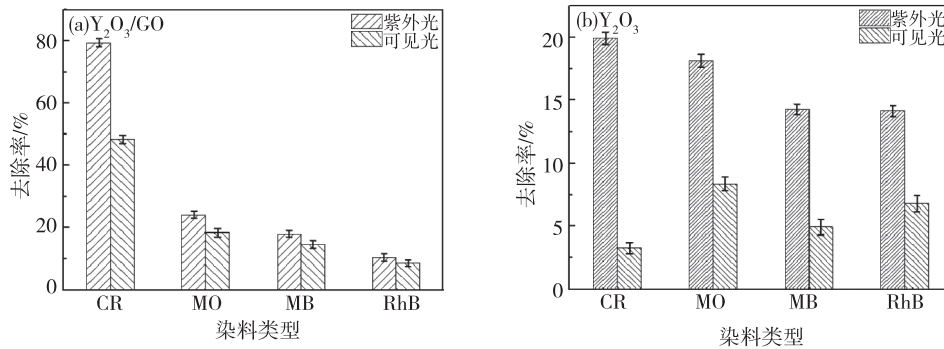


图9 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料和Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在不同光源下对染料的去除性能

Fig. 9 Removal properties of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO composites and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> under different light sources

2.2.6 循环稳定性

目前,常用光催化剂的再生方法有物理清洗法、热处理法、氧化还原法、复合再生法等<sup>[31]</sup>。本实验步骤:1)采用1.5 mol·L<sup>-1</sup>的NaOH溶液进行物理清洗,光催化实验结束后,倒出剩余的刚果红溶液,用蒸馏水清洗Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料3次,去除表面残留的染料分子;2)将清洗后的Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料置于100 mL的NaOH溶液中,超声清洗60 min,重复此操作3~5次,直至溶液几乎完全透明;3)将所得复合材料用去离子水清洗以消除残留的NaOH溶液;4)将再生后的光催化剂在60℃干燥至恒重,进行下一次光催化实验。Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料的循环性见图10。结果显示,重复使用7次后,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料对CR(浓度为120 mg·L<sup>-1</sup>)的去除率只由79.37%下降到70.09%,说明Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/

GO复合材料是一种具有优异循环性的光催化剂。

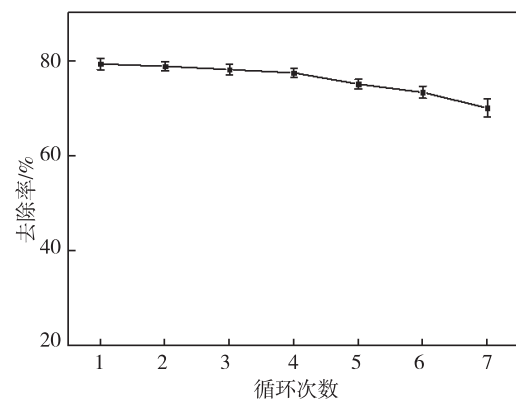


图10 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO复合材料对CR的光催化循环性

Fig. 10 Photocatalytic cycling of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO composites aerogel on CR

### 2.3 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料的光催化机理分析

#### 2.3.1 UV-vis DRS 分析

图 11 是 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料的 UV-DRS 和 Kubelka-Munk 函数曲线图。由图 11(a) 可见, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料的光吸收范围向可见光移

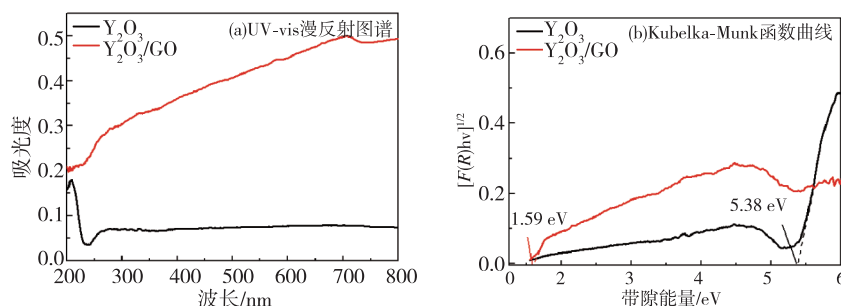


图 11 不同样品的 UV-vis 漫反射图谱和 Kubelka-Munk 函数曲线

Fig. 11 UV-vis spectra and Kubelka-Munk function curves of different samples

#### 2.3.2 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料光催化动力学研究

比较 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、GO、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料在紫外光下去除 CR 的效果,见图 12(a)。结果显示, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料的光催化去除效果最好,对 180 mg·L<sup>-1</sup> 的

动,表明 GO 与 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合扩展了光吸收范围。采用 Kubelka-Munk 函数将光谱转换为光能函数,见图 11(b), Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料的禁带宽度分别为 5.38、1.59 eV,表明 GO 与 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合后能减小禁带宽度,提高光响应能力。

CR 溶液的去除率为 73.28%,是 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 GO 数值的 6 倍与 8 倍。绘制 ln(C<sub>0</sub>/C) 与 t 的关系图,见图 12(b),可观察到线性趋势,相关数据见表 2。

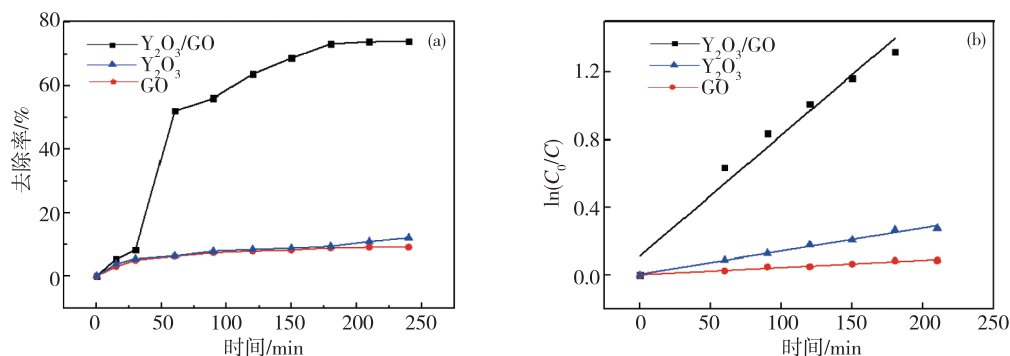


图 12 不同样品在紫外光下的光催化去除率和光催化速率

Fig. 12 Photocatalytic removal rate and photocatalytic rate of different samples under UV light

由表 2 可知:3 种试样的相关系数  $R^2$  值均大于 0.95,趋近于 1,表明光降解过程符合一级动力学规律;在紫外光照射条件下, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料表现出最优的光催化活性,其降解速率常数  $k$  达到 0.112 64 min<sup>-1</sup>,该数值约为 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 21 倍及 GO 的 47 倍。说明在 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 GO 的共同作用下,显著提高了 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料的光催化活性,增加了染料去除率,这是复合材料的多孔结构与光催化共同作用的结果。

#### 2.3.3 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料光催化热力学研究

在 283 ~ 308 K 温度范围内,将 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料对 CR 的光催化反应进行了热力学研究。由表 3 可知,随着温度增加,光催化反应的热力学参数  $\Delta G^\theta$  绝对值增加,但为负值,说明 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合

材料对 CR 的降解反应能够自发进行。由图 13 可见,随着温度的升高,染料去除量由 254.61 mg·g<sup>-1</sup> 增加到 345.92 mg·g<sup>-1</sup>,说明高温有利于光催化反应及染料去除。

表 2 不同样品的光催化速率常数  $k$ 、相关系数  $R^2$  和光催化效率

Tab. 2 Photocatalytic rate constant  $k$ , correlation coefficient  $R^2$  and photocatalytic efficiency of different samples

样品	$k/\text{min}^{-1}$	$R^2$	光催化效率/%
GO	0.002 43	0.991 1	9.21
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.005 52	0.965 8	12.20
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GO 复合材料	0.112 64	0.958 9	73.28

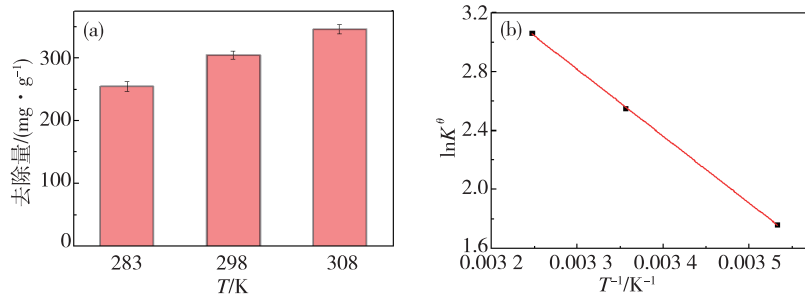


图 13 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料光催化降解 CR 的热力学分析

Fig. 13 Thermodynamic analysis for the adsorption of CR on Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO composites

$\Delta H^\theta > 0$ , 说明光催化反应是吸热反应, 温度越高, 光催化降解率越高, 与实验结果一致。  $\Delta S^\theta > 0$ , 说明在光催化降解过程中, CR 与 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料之间的作用力强, 体系的混乱程度增加。

表 3 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料光催化降解 CR 的热力学参数

Tab. 3 Thermodynamic parameters for the adsorption of CR on Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO composites

温度/K	$\Delta G^\theta /$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	$\Delta H^\theta /$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	$\Delta S^\theta /$ (J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
283	-4.15		
298	-6.32	37.594	147.456
308	7.84		

### 2.3.4 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料光催化机理分析

Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料的光催化机理(图 14)表明, 光催化反应的有效性取决于光生电子-空穴对与受体/给体的相互作用, 如缺乏有效的电子或空穴捕获剂, 分离后的载流子易在材料内部或表面复合以热能形式耗散。该体系中, 空穴捕获剂通常为吸附于光催化剂表面的羟基(OH<sup>-</sup>)或水分子, 这些离子或水分子可进一步转化为羟基自由基(·OH)等活性中间体, 进而驱动氧化还原反应过程。同时, 表面吸附的氧分子作为主要的光生电子捕获剂, 既能有效抑制电子-空穴复合, 又能作为氧化剂参与反应。在可见光辐射条件下, 此协同机制可促进偶氮染料等污染物分解, 最终将其降解为 CO<sub>2</sub> 和水等小分子。

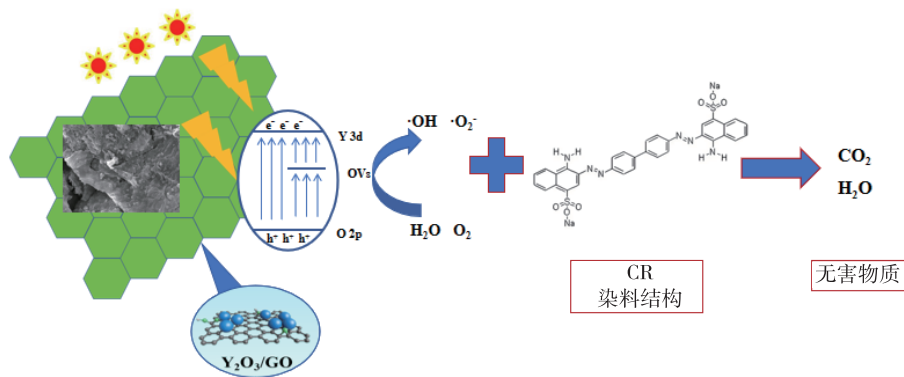
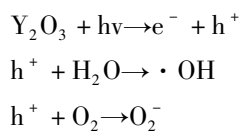


图 14 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料光催化机理

Fig. 14 Photocatalytic mechanism for Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO omposites



XPS 测试结果表明, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料表面具有较多的含氧官能团(如 C=O), 这些官能团可能是由 GO 引入的。由于含氧官能团可通过捕捉

光生空穴来促进强氧化性·OH 自由基的形成, 增加化学吸附表面的·OH, 故能进一步提高其光催化性能。另外, 水热法制备的 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GO 复合材料具有较大的比表面积, 可显著增加对污染物接触活性点的几率, 同时, 材料表面因表面效应而产生的丰富氧空位, 也能有效增加催化活性位点的数量, 进而

提升体系对污染物的光催化降解效率。

### 3 结论

1) XRD 分析表明,  $Y_2O_3/GO$  复合材料属于立方相晶体, 结晶良好、分散均匀。

2) SEM 及  $N_2$  吸附-脱附测试显示,  $Y_2O_3/GO$  复合材料不仅具有介孔尺寸(2.457 nm)的3D多孔材料, 还具有较大的比表面积( $11.9394\text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ), 有利于增加与染料接触反应的位点, 进而提高光催化活性。

3) XPS 结果显示,  $Y_2O_3/GO$  复合材料中除含有  $Y\ 3d_{3/2}$ 、 $Y\ 3d_{5/2}$  外, 还含有大量的含氧基团, 由于含氧基团可捕获光生空穴, 故体现出较强的光催化活性。

4) Uv-vis DRS 分析显示, 与  $Y_2O_3$  相比,  $Y_2O_3/GO$  复合材料的禁带宽度减小, 光响应范围扩展到可见光区域, 光催化性能提高, 应用范围更广。

5) 动力学研究表明,  $Y_2O_3/GO$  复合材料光催化降解 CR 满足一级动力学方程, 速率常数  $k$  值为  $0.11264\text{ min}^{-1}$ 。热力学研究表明,  $Y_2O_3/GO$  复合材料对 CR 的光催化降解属于吸热反应( $\Delta H^\theta > 0$ ), 且自发进行( $\Delta G^\theta < 0$ )。

### 参考文献:

- [1] Davarazar M, Kamali M, Venancio C. Activation of persulfate using copper oxide nanoparticles for the degradation of rhodamine B containing effluents: degradation efficiency and ecotoxicological studies [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 453(2): 139799.
- [2] Zhu Wei, Jiang Xueliang, Liu Fangjun, et al. Preparation of chitosan/graphene oxide composite aerogel by hydrothermal method and its adsorption property of methyl orange [J]. *Polymers*, 2020, 12(9): 2169.
- [3] Zhou Jingye, Xia Kai, Liu Xin, et al. Utilization of cationic polymer-modified fly ash for dye wastewater treatment [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2021, 23: 1273-1282.
- [4] 王廷媛, 尚越, 龙星宇.  $Fe_3O_4@SiO_2@CeO_2$  应用于废水中亚甲基蓝的吸附研究[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 39(5): 22-28.
- [5] Yao Hongfeng, Zhang Honglu, Wang Ruxue, et al. One-step in-situ construction of efficient solar light-driven dual Z-scheme nanocomposite with specific nanoparticle arrangement for antibiotic degradation: strategy, performance, and mechanism insights [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 71: 107222.
- [6] Li Ruohan, Liu Lei, Wu Haichen. Tunable metal-free COFs for photocatalytic degradation of water pollutants [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2025, 17(18): 26671-26678.
- [7] 谢辉, 徐冰霜. 新型花瓣状  $WO_3$  掺杂  $Sn_3O_4$  纳米材料的制备及其光催化性能[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 43(3): 103-108.
- [8] Fonseca Becerra L C I, Malafatti J O D, Paris E C, et al. Photocatalytic degradation of fluoxetine mediated by  $CuO/CuWO_4$  nanostructures [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2025, 174: 106215.
- [9] Jiang Xueliang, Gao Yanrong, Li Chenjiang, et al. Preparation of hollow yttrium-doped  $TiO_2$  microspheres with enhanced visible-light photocatalytic activity [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6: 065510.
- [10] Mutashar D S, Kadhim R F, Jabbar A Q, et al. Optical, morphological, and structural characterization of green synthesized  $CeO_2$  nanoparticles for photocatalytic degradation of acid orange 7 dye [J]. *Plasmonics*, 2025, 20(8): 6817-6824.
- [11] Chang Zhiwen, Huang Liang, Wang Jing, et al. Photocatalytic degradation of levofloxacin and vancomycins by Mn-doped ZnO nanoparticles [J]. *Catalysis Letters*, 2025, 155(7): 252.
- [12] Arulmurugan S, Kavitha H P, Vennila J P, et al. Fabrication of  $WO_3$ /graphene nanocomposite for photocatalytic degradation of malachite green and acid blue 113 dyes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2025, 54(7): 5462-5477.
- [13] Saeed M, Asghar H, Khan I, et al. Synthesis of  $TiO_2-g-C_3N_4$  for efficient photocatalytic degradation of congo red dye [J]. *Catalysis Today*, 2025, 447: 115154.
- [14] Yu Cunhuai, Xiao Wanling, Huang Ji, et al. Single yttrium atom coordinated by nitrogen and oxygen with an asymmetric 4d orbit as efficient oxygen reduction electrocatalyst [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2025, 691: 137425.
- [15] Sarmila S, Vadivel S, Sujita P. Tailored cation distribution in high-entropy Mn-Co-Ni-Cu-Zn oxides: toward advanced OER electrocatalysis [J]. *Langmuir*, 2025, 41(27): 18058-18068.
- [16] Yang Junru, Yue Yanping, Wang Yan, et al. Interface bonding properties of CrAlSiN-coated cemented carbides doped with  $CeO_2$  and  $Y_2O_3$  rare earth oxides [J]. *Molecules*, 2023, 28(8): 3584.
- [17] 籍伟花. 二氧化铈基催化剂 CO 氧化反应催化机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [18] Tang Zhenyu, Wei Yayun, Zhao Xinyi. Nanoscale surface

- engineering of yttria-stabilized zirconia for enhanced optoelectronic and structural performance [J]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2025, 20 (5): 505-515.
- [19] Bibak F, Meshkani F. Promotion effect of the rare earth metals (cerium, lanthanum, and yttrium) on the catalytic performance of Ni/ $Al_2O_3$  catalyst fabricate via the neoteric one-pot hydrothermal method for methane decomposition[J]. *Fuel*, 2024, 366: 131048.
- [20] Santos S, Rodrigues O, Campos L. Determination of an electron paramagnetic resonance protocol for characterization of europium, thulium Co-doped yttria (YET) nanoparticles[J]. *Current Physical Chemistry*, 2025, 15 (3): 221-230.
- [21] 孙孟佳, 介瑞华, 郭贵宝, 等. 碳吸附沉淀法 $Y_2O_3$ 纳米粉体的制备及其光催化性能的研究[J]. *人工晶体学报*, 2012, 41 (5): 1371-1375.
- [22] Michel C R, Martínez-Preciado A H. Adsorption and photocatalytic degradation of congo red and malachite green by nanostructured  $Y_2O_3$  synthesized by the coprecipitation method[J]. *Open Ceramics*, 2023, 13: 100336.
- [23] 江学良, 张姣, 余露, 等. 水热法制备氧化钪空心纳米花及其吸附性能[J]. *无机化学学报*, 2016, 32 (8): 1337-1344.
- [24] 杨浩林, 张剑桥, 曾小军, 等. 混合型催化剂 $BaO/ZrO_2/Y_2O_3$ 高温直接分解NO性能[J]. *环境化学*, 2022, 41 (7): 2397-2403.
- [25] Hou Ruomeng, Ying Jia, Wang Fei, et al. The effect of oxygen functional groups on  $TiO_2/RGO$  composites for the degradation of unsymmetrical dimethylhydrazine[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 20: 2809-2818.
- [26] Ahmed S H, Bakiro M, Aljasmí F I A, et al. Investigation of the band gap and photocatalytic properties of  $CeO_2/rGO$  composites [J]. *Molecular Catalysis*, 2020, 486: 110874.
- [27] Devi N Y, Karthikeyan K J, Al-Otibi F O, et al. Effect of yttrium doping on enhancing the photocatalytic performance of  $TiO_2/GO$  nanocomposite [J]. *Optical Materials*, 2024, 155: 115791.
- [28] Zhang Ya, Yuan Saisai, Zhao Yanhua, et al. Synthesis of novel yttrium-doped graphene oxide nanocomposite for dye removal[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 2 (21): 7897-7903.
- [29] Sun Yiqing, Wu Qiong, Shi Gaoquan. Graphene based new energy materials [J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4: 1113-1132.
- [30] Devaraju M K, Yin Shu, Sato T. A fast and template free synthesis of Tb:  $Y_2O_3$  hollow microspheres via supercritical solvothermal method [J]. *Crystal Growth & Design*, 2009, 9 (6): 2944-2949.
- [31] 孙旭辉. 可见光响应光催化剂 $Bi_{20}TiO_{32}$ 的制备及分解水中有机物效能与机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

责任编辑:赵建华

## (上接第36页)

- [69] 曾健豪, 王红蕾, 肖乃玉, 等. 共价有机框架气调保鲜复合膜的制备及性能研究[J]. *当代化工研究*, 2023 (17): 1-4.
- [70] Li Zhanchao, Li Wei, Wang Dongxia, et al. Lignin-based hydrogen-bonded covalent organic polymers as functional "switches" of modified atmosphere packaging membranes for preservation of perishable foods [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10 (33): 10803-10815.
- [71] Shen Chaoyi, Ma Yuting, Wu Di, et al. Preparation of covalent organic framework-based nanofibrous films with temperature-responsive release of thymol for active food packaging [J]. *Food Chemistry*, 2023, 410 (3): 135460-135469.
- [72] Huang Lunjie, Sun Dawen, Pu Hongbin, et al. Nanocellulose-based polymeric nanozyme as bioinspired spray coating for fruit preservation [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 135 (12): 108138-108147.
- [73] Li Jie, Wang Donglin, Liu Yuhang. Biomimetic spray coating for fruit preservation based on UiO-167 metal-organic framework nanozyme [J]. *Frontiers in Materials*, 2024, 11 (4): 1303449-1303457.
- [74] 吴少译, 林伦洲, 李春江, 等. 氢键有机框架材料对芒果采后保鲜效果研究[J]. *福建轻纺*, 2025 (4): 27-32.
- [75] Zhou Jiayi, Zhang Sai, Zhang Yu, et al. Silver nanoparticle-functionalized covalent organic frameworks for the inhibition of foodborne pathogenic bacteria and their application in green grape preservation [J]. *Food Chemistry*, 2025, 463 (10): 141310-141320.
- [76] Khan M J, Hafeez F, Islam M R, et al. Advanced antibacterial packaging for food preservation through multifunctional metal-organic framework nanocomposite [J]. *Small*, 2025, 21 (23): 2501111-2501122.

责任编辑:赵建华