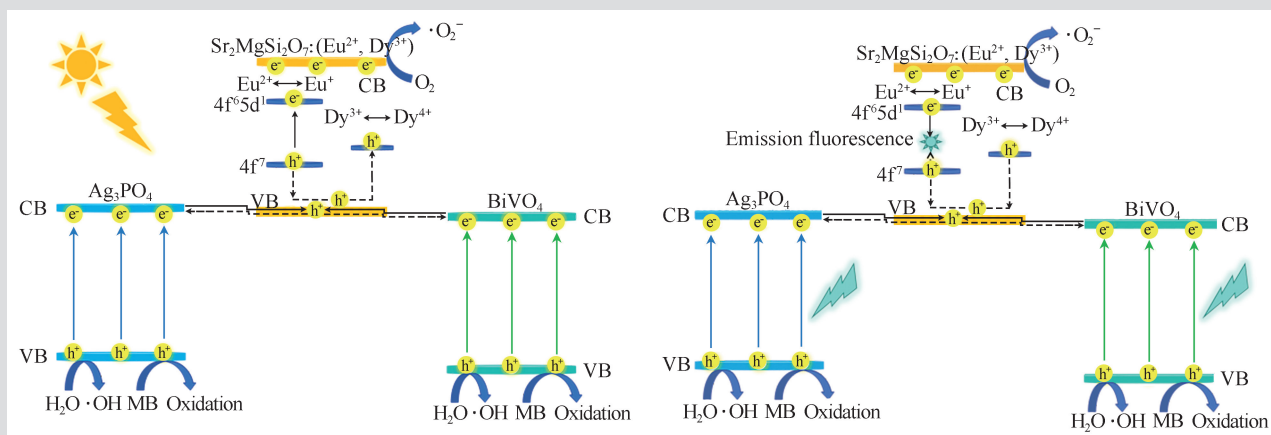


Performance of $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{BiVO}_4/\text{long afterglow composite}$ for all-weather photocatalytic degradation of dye wastewater

Lianshuang Guo^{1,*}, Ling Yang²

(1. College of Basic Medicine, North Henan Medical University, Xinxiang, Henan 453000, China; 2. College of Chemical and Materials Engineering, Xuchang University, Xuchang, Henan 461000, China)

Abstract: The composites of $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{BiVO}_4/\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ (ABS) with all-weather photocatalytic activity were prepared by constructing heterojunction using $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$, Ag_3PO_4 and BiVO_4 as raw materials. These ABS composites were systematically characterized by SEM, XPS, UV-vis DRS, PL and EIS. Methylene blue (MB) dye solution was used as the target pollutant. The all-weather photocatalytic activity and stability of ABS composites were evaluated, and a dual Z-scheme charge transfer mechanism of photocatalysis in light and dark environments was proposed. The results showed that the degradation percentage of MB dye solution by ABS composite with the mass ratio of 1 : 1 : 40 reached 98.8% after 15 min of simulated sunlight irradiation and 15 min of continual reaction in dark environment. The degradation percentage of MB dye solution still reached 98.5% after 5 cycles, indicative of good all-weather photocatalytic activity and stability. Benefiting from the coupling of Ag_3PO_4 , BiVO_4 and $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$, the construction of dual Z-scheme heterojunction effectively promoted the separation of photoelectron-hole and effectively retained the high-oxidation-potential valence band of Ag_3PO_4 and BiVO_4 . Under light conditions, $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ accumulated energy by filling the defect energy. The energy released in the dark environment stimulated the charge separation of Ag_3PO_4 and BiVO_4 , and the high-oxidation-activity holes in the valence band could oxidize H_2O to hydroxyl radicals ($\cdot\text{OH}$). Then efficient degradation of organic dye MB was achieved under the actions of $\cdot\text{OH}$ and holes.



Key words: Ag_3PO_4 ; BiVO_4 ; $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$; all-weather photocatalysis; double Z-scheme heterojunction; methylene blue

Received: June 18, 2025; Revised: June 3, 2026.

*Corresponding author. E-mail: lianshuangG1990@163.com.

河南省高等学校重点科研项目 (24B150040)

Ag₃PO₄/BiVO₄/长余辉复合材料全天候光催化降解染料废水性能

郭连霜^{1,*}, 杨 玲²

(1. 豫北医学院 基础医学院, 河南 新乡 453000; 2. 许昌学院 化工与材料学院, 河南 许昌 461000)

摘要: 以长余辉材料Sr₂MgSi₂O₇:(Eu²⁺, Dy³⁺)、Ag₃PO₄和BiVO₄等作为原料通过构建异质结的策略制备了一种具有全天候光催化活性的Ag₃PO₄/BiVO₄/Sr₂MgSi₂O₇:(Eu²⁺, Dy³⁺)(ABS)复合材料。通过SEM、XPS、UV-vis DRS、PL和EIS等表征手段对ABS复合材料进行了系统的表征。以亚甲基蓝(MB)染料溶液作为目标污染物,评价了ABS复合材料的全天候光催化活性和稳定性,提出了光照和黑暗环境中光催化的双Z型电荷转移机制。结果表明,模拟太阳光照射15 min,关闭光源黑暗环境继续反应15 min,Ag₃PO₄、BiVO₄和Sr₂MgSi₂O₇:(Eu²⁺, Dy³⁺)质量比为1:1:40的ABS复合材料对MB染料溶液的降解率达到了98.8%,循环使用5次后对MB染料溶液的降解率仍达到了98.5%,表现出良好的全天候光催化活性和稳定性。得益于Ag₃PO₄、BiVO₄和Sr₂MgSi₂O₇:(Eu²⁺, Dy³⁺)三者耦合后双Z型异质结的构建有效促进了光电子-空穴的分离,有效保留了Ag₃PO₄和BiVO₄高氧化电位价带,光照条件下Sr₂MgSi₂O₇:(Eu²⁺, Dy³⁺)通过缺陷能量填充积累能量,黑暗环境中释放能量激发Ag₃PO₄和BiVO₄发生电荷分离,价带上高氧化活性空穴将H₂O氧化为羟基自由基(·OH),在·OH和空穴的作用下实现了有机染料MB的高效降解。

关键词: Ag₃PO₄; BiVO₄; Sr₂MgSi₂O₇:(Eu²⁺, Dy³⁺); 全天候光催化; 双Z型异质结; 亚甲基蓝

中图分类号: O643.3

文献标识码: A

文章编号: 2097-2806(2026)06-0729-10

经济快速增长加速了纺织印染行业的扩张,导致印染废水排放量逐渐增加。印染废水中含有大量的有机污染物,包括有机染料和各种化学助剂等^[1]。未经处理直接排放到自然环境中,会对生态系统和人类健康构成重大威胁。因此,减少染整行业的用水量和废水排放量,对于缓解污水处理系统的压力、减轻印染废水对水资源和人体健康的影响至关重要^[2]。因此,如何实现印染废水的高效绿色处理十分重要。

光催化技术是一种高效绿色和可持续发展的废水处理技术,逐渐受到研究学者的关注^[3]。光催化技术依赖于稳定的光源和高效稳定的光催化剂^[4]。光催化过程是一个光诱导的氧化还原过程。当光子能量超过半导体的带隙能时,会发生电荷分离产生光电子和空穴,光电子和空穴与H₂O和O₂等发生反应,产生高氧化活性的自由基。这些光电子、空穴和自由基在有机物降解过程中起着至关重要的作用^[5]。TiO₂由于其高稳定性和优异的光催化活性得到广泛应用。尽管如此,但TiO₂的光响应仅限于紫外光区,这极大地限制了TiO₂的性能和应用^[6]。近年来,BiVO₄和Bi₂MoO₆等具有良好可见光响应的铋基光催化剂逐渐受到关注^[7]。然而,这些光催化剂也存在着一些缺陷,特别是光电子-空穴的重组和可见光利用率低极大地限制了光催化剂的性能和应用^[8]。可以通过O、B和S等非金属元素掺杂,Pt、Au和Pd等贵金属单质负载,纳米

片和纳米微球等形貌的调控以及两种或多种半导体耦合构建异质结等策略解决这些问题^[9,10]。其中,构建异质结被认为是最为有效的策略^[11]。Ag₃PO₄作为一种等离子体共振光催化剂,可以显著提高可见光的利用率并促进电荷分离,使其成为与其他半导体耦合构建异质结的理想材料^[12]。BiVO₄和Ag₃PO₄耦合构建异质结可以有效促进光电子-空穴的重组,提高光催化活性。研究表明,Ag₃PO₄和BiVO₄之间形成Z型异质结后,Ag₃PO₄导带(CB)上产生的大量低电势光电子迅速迁移到BiVO₄的价带(VB)并与空穴复合,BiVO₄的CB上的光电子捕获O₂将其还原为超氧自由基(·O₂⁻),Ag₃PO₄的VB上的空穴捕获H₂O将其氧化为羟基自由基(·OH),·O₂⁻和·OH等高活性自由基可以实现有机污染物的高效降解^[13]。

光催化技术除了需要高效稳定的光催化剂,还依赖于稳定的光源,但受到地域和气候等原因的限制,太阳光作为光源提供的光照并不稳定,无太阳光照条件下光催化剂的活性无法被激发,这限制了光催化剂的性能和应用^[14]。为了解决这一问题,可以通过引入自发光材料作为“光源”实现黑暗环境下的补光,激发光催化材料的光催化活性,从而实现黑暗条件下污染物的降解。长余辉发光材料可以在短暂暴露于光照环境之后持续发射磷光几秒至几十小时^[15]。长余辉材料中的大部分发光中心来自

掺杂的稀土元素,主要包括 Eu^{2+} , Ce^{3+} , Eu^{3+} 和 Dy^{3+} 等。由于其独特的发光特性,长余辉材料已广泛应用于生物成像和信息存储等领域^[16]。长余辉发光材料在光催化领域的应用鲜有报道。长余辉发光材料在与光催化材料结合使用时,不仅需要考虑到长余辉材料的发光持续时间和强度,还需考虑其物理化学稳定性。其中,硅酸盐基长余辉发光材料因其高发光强度、持久性、耐酸碱性和抗水解特性而备受关注。 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 长余辉材料受到光源激发时, Eu^{2+} 的基态电子被激发,从 $4f^65d^1$ 态跃迁, Eu^{2+} 转化为 Eu^{3+} 。当部分电子回落到基态时,会产生磷光,同时部分电子会被 Dy^{3+} 捕获^[17,18]。在能量驱动下被捕获的电子会返回原始基态,以持续发光的形式释放能量。由于 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 优异的太阳光响应特性,其吸收边界位于530和550 nm,而 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 的发射波长范围在430~570 nm之间,最高发射峰位于475 nm附近^[19,20]。根据长余辉材料与光催化材料的匹配原理^[21],理论上 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 发出的磷光能够在光源关闭后激发 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 发生电荷分离,发挥光催化活性。然而,目前并未发现关于光催化材料 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 与长余辉发光材料 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 耦合制备复合光催化材料的相关报道。

基于以上理论,本研究制备了一种新型具有全天候光催化活性的 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{BiVO}_4/\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 复合材料,评价了复合材料全天候光催化降解有机染料亚甲基蓝活性和稳定性。提出了双Z型的电荷转移机制,分析了光照和黑暗环境下的光催化机理。

1 实验部分

1.1 主要材料、试剂与仪器

AgNO_3 、氨水、 Na_2HPO_4 、无水乙醇、 NH_4VO_3 、稀硝酸、 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、对苯醌($p\text{-BQ}$)、异丙醇(IPA)、三乙醇胺(TEA)和亚甲基蓝(MB),均为分析纯,国药集团化学试剂公司; BaSO_4 ,光谱纯,阿拉丁试剂公司; $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$,路明科技集团有限公司。

K-Alpha型X射线光电子能谱仪,Thermo Fisher Scientific公司;Sigma 300型扫描电子显微镜,Zeiss公司;UV-3600型紫外可见漫反射光谱仪,Shimadzu公司;FLS1000型光致发光光谱仪,Edinburgh公司;VSP-300型电化学工作站,Biologic公司;A300型电子顺磁共振波谱仪,Bruker公司。

1.2 实验方法

1.2.1 复合材料的制备

1) Ag_3PO_4 的制备

通过离子交换法制备 Ag_3PO_4 。将0.145 mol的 AgNO_3 和0.048 mol的 Na_2HPO_4 分别溶于15 mL去离子水中,持续搅拌使其完全溶解。搅拌条件下将 AgNO_3 溶液缓慢滴加到 Na_2HPO_4 溶液中,持续搅拌3 h,过滤,去离子水洗涤固体3~5次,然后置于烘箱中60 °C干燥24 h,制备得到 Ag_3PO_4 。

2) BiVO_4 的制备

通过水热法制备 BiVO_4 。 NH_4VO_3 和 $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 按照1:1摩尔比加入到40 mL浓度2.0 mol/L的 HNO_3 溶液中,搅拌30 min,滴加氨水调节溶液pH=2.0,继续搅拌120 min后移入水热反应釜中,200 °C反应24 h,冷却至室温,离心分离,将得到的固体使用无水乙醇和去离子水交替洗涤3次,置于烘箱中60 °C干燥24 h,制备得到 BiVO_4 。

3) ABS复合材料的制备

通过蒸发溶剂法制备ABS复合材料。将 Ag_3PO_4 , BiVO_4 和 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 按照1:1:30, 1:1:40和1:1:50的质量比投加到盛有25 mL去离子水的烧杯中,室温下置于黑暗环境中持续搅拌3 h,70 °C水浴加热并持续搅拌6 h,蒸发溶剂得到不同质量比的ABS复合材料。

1.2.2 ABS复合材料的表征

通过扫描电子显微镜(SEM)观察ABS复合材料的微观形貌;使用X射线光电子能谱(XPS)表征ABS复合材料的化学组成,Al K α 靶;使用紫外可见漫反射光谱(UV-vis DRS)表征ABS复合材料的光谱吸收响应能力, BaSO_4 作为参比;使用光致发光光谱(PL)表征ABS复合材料的光电子-空穴重组和分离,波长范围400~640 nm;使用电化学工作站测定ABS复合材料的交流阻抗(EIS);使用电子顺磁共振波谱仪(EPR)检测ABS复合材料在光源开启和关闭光源条件下的 $\text{DMPO}-\cdot\text{O}_2^-$, $\text{DMPO}-\cdot\text{OH}$ 和 $\text{DMPO}-\text{h}^+$ 信号。

1.2.3 亚甲基蓝全天候降解实验

参考文献^[22]进行亚甲基蓝全天候降解实验。首先,将50 mg的ABS复合材料均匀分散到100 mL质量浓度为100 mg/L的MB染料溶液中,黑暗环境下磁力搅拌30 min达到吸附-脱附平衡,开启500 W氙灯模拟太阳光照射15 min,关闭氙灯,黑暗环境中继续搅拌15 min,每间隔5 min进行取样,0.45 μm 过滤器过滤,使用紫外可见漫反射光谱仪测定最大吸收波

长(664 nm)处的吸光度,根据Lambert-Beer定律浓度和吸光度之间的关系,通过公式(1)计算降解率。

$$\zeta = \left(\frac{A_0 - A_t}{A_0} \right) \times 100\% = \left(\frac{\rho_0 - \rho_t}{\rho_0} \right) \times 100\% \quad (1)$$

其中: ζ 为MB的降解率,%; A_0 和 A_t 分别为初始和 t 时刻MB的吸光度; ρ_0 和 ρ_t 分别为初始和 t 时刻MB的质量浓度,mg/L。

2 结果与讨论

2.1 ABS复合材料SEM分析

为了分析复合材料的微观形貌和元素组成,通过SEM和EDS对 Ag_3PO_4 、 BiVO_4 、 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 和ABS(1:1:40)复合材料进行了表征,如图1所示。由图1a可以看出, Ag_3PO_4 呈现分散均匀的光滑纳米球形貌,纳米球粒径约为100~300 nm。由图1b可以看出, BiVO_4 呈现聚集的纳米球形貌,纳米球粒径约为50~110 nm。由图1c可以看出, $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 呈现块状形貌,表面粗糙。由图1d可以看出, Ag_3PO_4 和 BiVO_4 纳米球均匀分散在块状 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 表面,三者的紧密接触不仅有利于促进光电子-空穴的分离,而且有利于 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 自发光材料在黑暗环境中作为光源激发 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 的光催化活性。为进一步确定ABS(1:1:40)复合材料中

元素分布的均匀性及其化学完整性,进行了EDS表征,如图1e所示。由图1e可以看出,Ag, Bi, Sr和Mg元素的分布呈现出紧密且相似的分布特征,这进一步说明了 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 纳米球均匀分散在块状 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 表面。

2.2 ABS复合材料XPS分析

为了分析复合材料的化学组成,通过XPS对 Ag_3PO_4 、 BiVO_4 、 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 和ABS(1:1:40)复合材料进行了表征,全谱图以及Ag 3d, P 2p, Bi 4f, V 2p, Sr 3d, Mg 1s和Si 2p高分辨率谱图如图2所示。由图2a可以看出, Ag_3PO_4 由Ag, P和O三种元素组成, BiVO_4 由Bi, V和O三种元素组成, $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 自发光材料由Sr, Mg, Si和O四种元素组成,ABS复合材料由Ag, P, O, Bi, V, Sr, Mg和Si八种元素组成。由图2b可以看出, Ag_3PO_4 和ABS复合材料在结合能373.81和367.72 eV位置分别对应了Ag 3d_{5/2}和Ag 3d_{3/2}的特征峰,这说明Ag元素的存在形式为 Ag^{+} [23]。由图2c可以看出, Ag_3PO_4 在结合能134.40和133.22 eV位置分别对应了P 2p_{3/2}和P 2p_{1/2}的特征峰,这说明P元素的存在形式为 P^{5+} [24]。与 Ag_3PO_4 相比,ABS复合材料的P 2p_{3/2}和P 2p_{1/2}的特征峰均表现出向高结合能方向偏移。由图2d可以看出, BiVO_4 在结合能164.20和158.88 eV位置分别对应了Bi 4f_{7/2}和Bi 4f_{5/2}的特征峰,这说明Bi元素的存在形式为 Bi^{3+} [25]。与 BiVO_4 相比,ABS复合材料的Bi 4f_{7/2}和Bi 4f_{5/2}特征峰向低结合能方向偏移。由图2e可以看出, BiVO_4 在结合能在531.35和529.81 eV位置分别对应于V 2p_{1/2}和V 2p_{3/2}的特征峰,这说明V元素的主要存在形式是 V^{5+} , 524.48和516.94 eV位置的特征峰和 V^{4+} 和 V^{3+} 有关,这说明 BiVO_4 存在杂质相。相比 BiVO_4 ,ABS复合材料的V 2p_{1/2}和V 2p_{3/2}特征峰均向低结合能方向偏移。由图2f可以看出, $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 在结合能136.01和134.18 eV位置分别对应于Sr 3d_{3/2}和Sr 3d_{5/2}的特征峰,这说明Sr元素的存在形式为 Sr^{2+} [26]。相比 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$,ABS复合材料的Sr 3d_{3/2}和Sr 3d_{5/2}特征峰向低结合能方向偏移。由图2g可以看出, $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 在结合能1304.93和1303.91 eV出现了两个Mg 1s的特征峰,Mg元素主要以 Mg^{2+} 形式存在。与 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 相比,ABS复合材料的两个Mg 1s特征峰均向低结合能方向偏移。由图2h可以看出, $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 在结合能102.94 eV出现了Si 2p的特征峰。与 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 相比,ABS复合材料的Si 2p的特征峰向低结合能方向偏移。

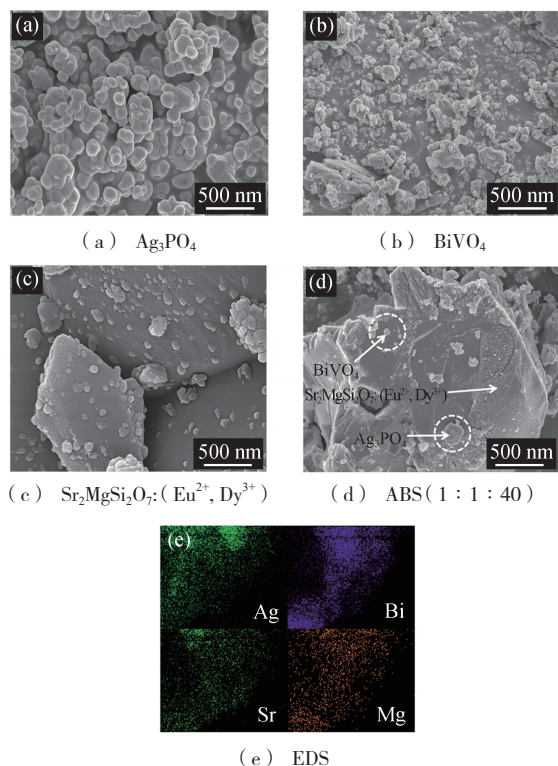


图1 ABS复合材料的SEM和EDS图

Fig.1 SEM and EDS images of ABS composite

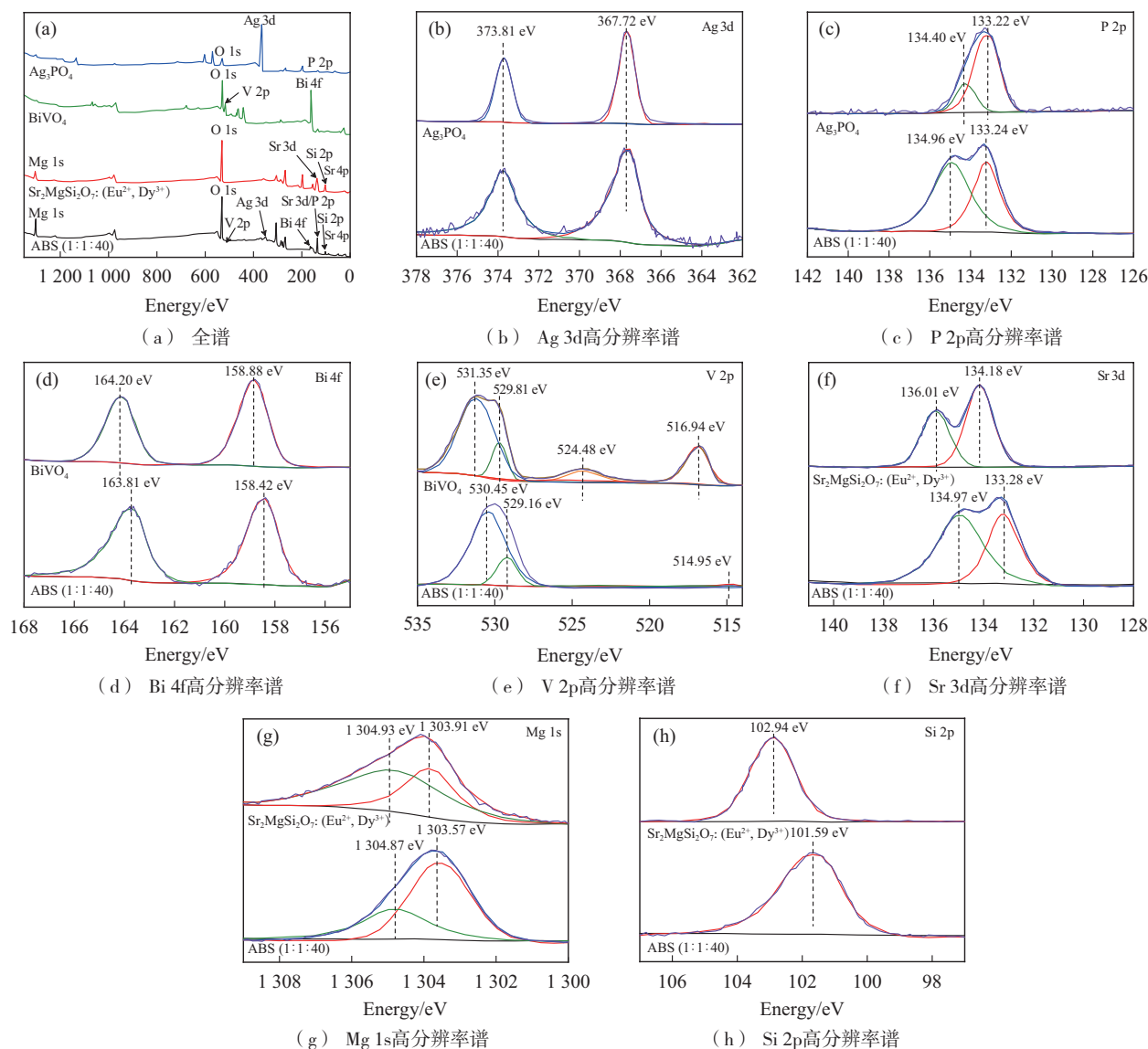


图2 ABS复合材料的XPS谱图
Fig.2 XPS spectra of ABS composite

元素的结合能来源于原子核和核外电子之间的库仑力,结合能变化会引起电子云密度的变化,反映了原子核对核外电子的束缚能力^[27]。以上各元素结合能的变化说明了 Ag_3PO_4 、 BiVO_4 和 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 之间并不是简单的物理混合,而是通过耦合形成了异质结,异质结的构建有效促进了光电子-空穴的分离,有利于全天候催化活性的提高。

2.3 ABS复合材料UV-vis DRS分析

为了分析复合材料的光谱吸收能力,通过UV-vis DRS对 Ag_3PO_4 、 BiVO_4 、 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 和ABS (1:1:40) 复合材料进行了表征,如图3a所示。由图3b可以看出, BiVO_4 和 Ag_3PO_4 的吸收边界分别为530和550 nm,这说明 BiVO_4 和 Ag_3PO_4 具备可见光

响应能力。 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 自发光材料的吸收边界为475 nm,具备可见光响应能力,但可见光响应能力弱于 BiVO_4 和 Ag_3PO_4 。 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 在360 nm位置的吸收峰来源于 Eu^{2+} 由 $4f^7$ 能级向 $4f^65d^1$ 能级的跃迁,这赋予了自发光的特殊光学特性^[28]。ABS复合材料的吸收边界为520 nm,相比 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 自发光材料吸收边界发生了明显的红移,提高了自发光材料的可见光响应能力,使得其可见光响应能力更加接近 BiVO_4 和 Ag_3PO_4 。通过利用Kubelka-Munk方程可绘制出 $(ah\nu)^2-h\nu$ 的Tauc曲线并得到带隙能 E_g ,如图3b所示。由图3b可以看出, Ag_3PO_4 、 BiVO_4 、 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 和ABS (1:1:40) 复合材料的带隙能分别为2.45、2.52、2.78和2.48 eV,带隙能对于全天候催化机理十分重要。

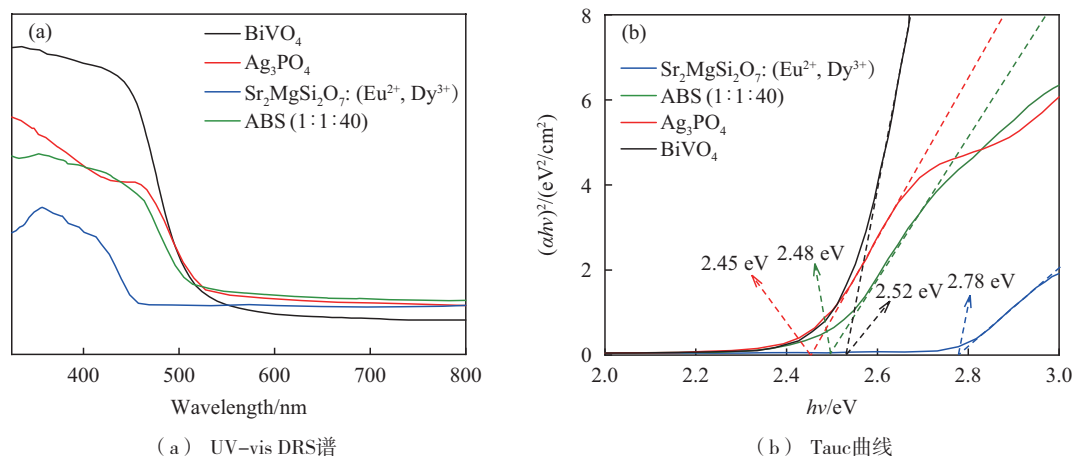


图3 ABS复合材料的UV-vis DRS谱和Tauc曲线

Fig.3 UV-vis DRS spectrum and Tauc curve of ABS composite

2.4 ABS复合材料PL分析

为了分析复合材料的光电子-空穴重组和分离,通过PL对 Ag_3PO_4 , BiVO_4 , $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 和 $\text{ABS} (1:1:40)$ 复合材料进行了表征,如图4所示。由图4可以看出, $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 自发光材料在波长469 nm位置表现出一个宽的荧光发射峰,发射峰强度较高,这说明自发光材料的光电子-空穴重组率较高,限制了自发光材料的光催化性能,造成这一结果的原因可能与 Eu^{2+} 由 $4f^7$ 能级向 $4f^65d^1$ 能级的跃迁相关^[29]。 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 的荧光发射峰分别出现在波长495和484 nm位置,荧光发射峰强度较弱,说明二者具备较低的光电子-空穴重组率。相比 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 自发光材料, $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 自发光材料与 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 耦合后荧光发射峰强度发生显著降低,有效促进了光电子-空穴的分离,有利于催化性能的提升,这得益于 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 自发光材料与 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 耦合后异质结的构建。

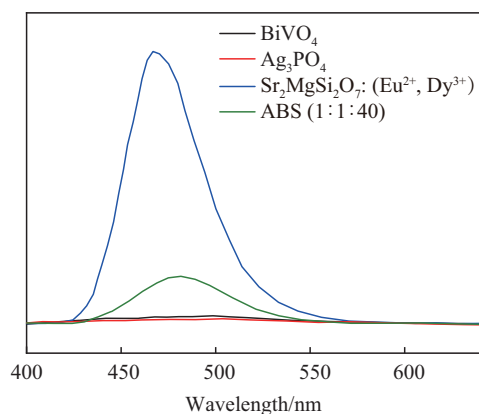


图4 ABS复合材料的PL谱图

Fig.4 PL spectrum of ABS composite

2.5 ABS复合材料EIS分析

为了分析复合材料的界面转移电阻,通过EIS对 Ag_3PO_4 , BiVO_4 和 $\text{ABS} (1:1:40)$ 复合材料进行了表征,如图5所示。由图5可以看出, Ag_3PO_4 和 BiVO_4 表现出较大的Nyquist圆弧半径,这说明 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 具有较大的界面转移电阻,这不利于光电子的转移。 $\text{ABS} (1:1:40)$ 复合材料表现出较小的Nyquist圆弧半径, $\text{ABS} (1:1:40)$ 复合材料具有较小的界面转移电阻,这有利于光电子在 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 之间的迁移, $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 作为桥梁连接 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 两种光催化材料,双Z型异质结有效促进了光电子-空穴的分离,有利于提高催化活性。

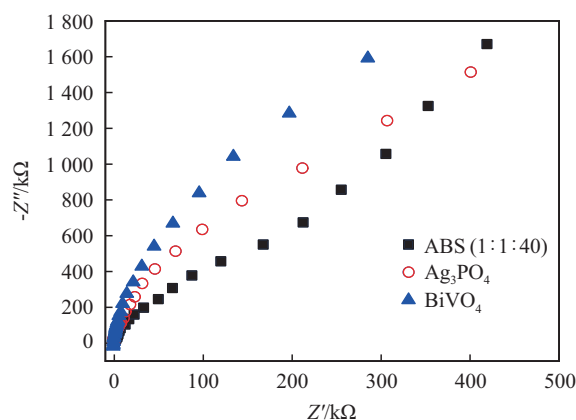


图5 ABS复合材料的EIS谱图

Fig.5 EIS spectrum of ABS composite

2.6 ABS复合材料全天候催化活性评价

图6为 Ag_3PO_4 , BiVO_4 , $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 和 $\text{ABS} (1:1:40)$ 复合材料全天候催化降解MB染料活性。由图6可以看出, 在无催化剂存在的条件

下, MB染料在光照-黑暗交替的条件下并未发生降解。氙灯 ($\lambda > 420 \text{ nm}$) 模拟可见光照射15 min, Ag_3PO_4 , BiVO_4 和 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 对MB染料的降解率分别为48.4%, 20.4%和3.8%, 关闭氙灯后明显地发现MB染料并未发生进一步的降解, 这说明单组分材料黑暗条件下无法表现出光催化活性。可见光照射15 min, 质量比1:1:30, 1:1:40和1:1:50的ABS复合材料对MB染料的降解率分别为61.5%, 67.8%和54.7%。ABS复合材料的降解活性明显高于单组分材料, 这主要得益于 Ag_3PO_4 , BiVO_4 和 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 耦合后双Z型异质结的构建, 有效促进了光电子-空穴分离, 拓宽了光谱吸收范围, 提升了光催化降解活性。关闭氙灯后ABS复合材料可以继续催化实现MB染料的降解, 这得益于可见光照射条件下ABS复合材料内部积累了光子能量, 黑暗条件下释放后触发 Eu^{2+} 由 $4f^7$ 能级向 $4f^65d^1$ 能级的跃迁, 进而激发光催化活性中心 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 发生电荷分离, 产生光生载流子。 Ag_3PO_4 , BiVO_4 和 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 按照1:1:40的质量比进行简单物理混合后其对MB染料的降解率为76.9%。质量比1:1:40的ABS复合材料表现出优异的全天候催化降解活性, 光照-黑暗条件下MB染料的降解率达到了98.8%。ABS复合材料的全天候催化降解活性明显高于 Ag_3PO_4 , BiVO_4 和 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 三者物理混合材料, 这进一步说明了, Ag_3PO_4 , BiVO_4 和 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7: (\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 三者并不是简单的物理混合, 而是形成了异质结。

除此之外, 还比较了不同光催化材料的光催化性能, 结果见表1。由表1可知, 相较于文献报道中的光催化材料, ABS复合材料不仅表现出优异的光催化活性, 同时得益于长余辉发光材料的自发光特性, ABS复合材料还具备黑暗环境中降解污染物的能力。

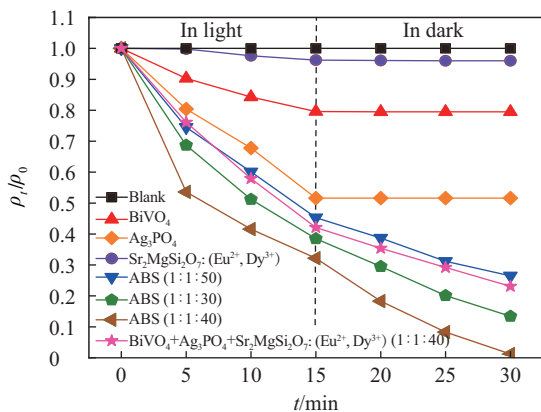


图6 ABS复合材料全天候催化降解MB活性

Fig.6 All-weather catalytic degradation of MB by ABS composites

表1 不同光催化材料性能对比

Tab.1 Comparison of the performance of different photocatalytic materials

材料	光源	污染物	初始质量浓度/(mg/L)	光照时间/min	降解率/%	来源
$\text{SnS}_2/\text{C}_3\text{N}_4$	太阳光	MB	50	60	96.6	[30]
$\text{CdIn}_2\text{S}_4/\text{ZnIn}_2\text{S}_4$	可见光	MB	10	90	96.7	[31]
$\text{TiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$	太阳光	MB	20	110	92.4	[32]
$\text{Ag}_6\text{Si}_2\text{O}_7/\text{TiO}_2$	可见光	MB	30	20	98.6	[33]
$\text{WSe}_2/\text{BiVO}_4$	可见光	MB	10	120	94.5	[34]
ABS (1:1:40)	太阳光	MB	100	15	98.8	本研究

2.7 ABS复合材料循环稳定性评价

图7为ABS (1:1:40) 复合材料全天候催化降解MB染料稳定性。由图7可以看出, 经过5次光照-黑暗交替后, ABS (1:1:40) 复合材料全天候催化降解MB染料的降解率为98.5%, 相比新鲜ABS复合材料对MB染料的降解率下降并不明显, 这说明ABS (1:1:40) 复合材料具备良好的全天候催化降解MB染料稳定性, 实际应用中具备重要意义。

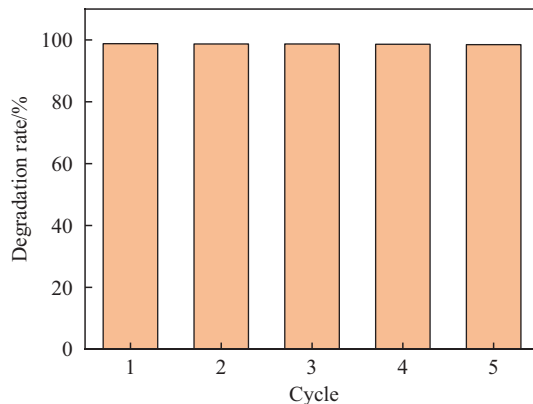


图7 ABS复合材料全天候催化降解MB稳定性

Fig.7 Stability of ABS composite for all-weather catalytic degradation of MB

2.8 ABS复合材料活性物种捕获分析

为了研究ABS复合材料全天候催化降解MB染料过程中活性物种的作用, 分别加入IPA, TEA和 $p\text{-BQ}$ 作为羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$)、空穴 (h^+) 和超氧自由基 ($\cdot\text{O}_2^-$) 掩蔽剂^[35], 结果如图8所示。由图8可以看出, IPA, TEA和 $p\text{-BQ}$ 等掩蔽剂加入后经过光照-黑暗交替后, ABS (1:1:40) 复合材料对MB染料的降解率分别为11.1%, 21.3%和78.4%, 这说明掩蔽剂加入后不同程度抑制了ABS (1:1:40) 复合材料全天候降解MB染料反应, $\cdot\text{OH}$ 和 h^+ 在反应体系中发挥主要作用。

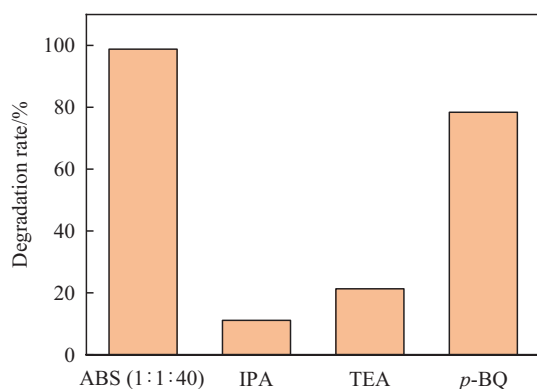


图8 ABS复合材料全天候催化降解MB活性物种捕获结果

Fig.8 Results of trapping of active species for all-weather catalytic degradation of MB by ABS composite

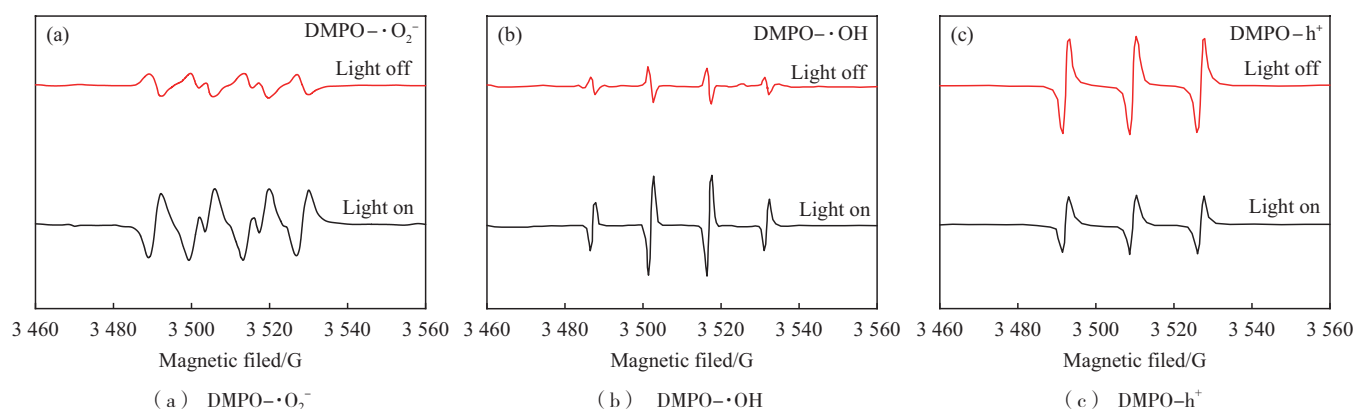


图9 ABS复合材料的EPR谱图

Fig.9 EPR spectra of ABS composite

2.10 ABS复合材料全天候催化机理分析

能带结构对于催化机理的分析十分重要。根据公式 $E_{VB}=X-E_C+0.5E_g$ (E_C 为自由电子的标准氢电极电位, $E_C=4.5$ eV; X 为绝对电负性, Ag_3PO_4 , $BiVO_4$ 和 $Sr_2MgSi_2O_7:(Eu^{2+}, Dy^{3+})$ 的 X 分别为6.16, 6.33和3.71 eV)^[36, 37]可以计算出半导体材料的价带电位(E_{VB})分别为2.88, 3.09和0.60 eV, 利用公式 $E_{CB}=E_{VB}-E_g$ 可以计算得到 Ag_3PO_4 , $BiVO_4$ 和 $Sr_2MgSi_2O_7:(Eu^{2+}, Dy^{3+})$ 的导带电位(E_{VB})分别为0.43, 0.57和-2.18 eV。基于能带结构提出了ABS复合材料在光照-黑暗条件下光催化的双Z型机理, 如图10所示。由图10a可以看出, 光照条件下光催化过程中主要分为三个阶段: 一是光吸收阶段; 二是能量转移阶段; 三是缺陷填充阶段。光吸收阶段 $Sr_2MgSi_2O_7:(Eu^{2+}, Dy^{3+})$ 中 Eu^{2+} 吸收光子能量发生 $4f^65d^1$ 跃迁。能量转移阶段 $Sr_2MgSi_2O_7:(Eu^{2+}, Dy^{3+})$ 中被激发 Eu^{2+} 的部分能量通过非辐射方式转移到 Dy^{3+} , Dy^{3+} 可以高效地储存这些能量^[38]。同时由于 $Sr_2MgSi_2O_7:(Eu^{2+}, Dy^{3+})$ 的价带电位略高于 Ag_3PO_4

2.9 ABS复合材料EPR分析

图9为ABS复合材料的DMPO- $\cdot O_2^-$, DMPO- $\cdot OH$ 和DMPO- h^+ 的EPR谱图。由图9可以看出, 氙灯($\lambda>420$ nm)模拟可见光照射条件下, 观察到了明显DMPO- $\cdot O_2^-$, DMPO- $\cdot OH$ 和DMPO- h^+ 的EPR信号, 这说明光照条件下ABS复合材料全天候催化降解MB染料体系生成了 $\cdot O_2^-$, $\cdot OH$ 和 h^+ 等活性物种, 这些活性物种在光催化过程中起到了至关重要的作用。关闭氙灯, 依然可以明显地检测到DMPO- $\cdot O_2^-$, DMPO- $\cdot OH$ 和DMPO- h^+ 的EPR信号, 这说明黑暗条件下ABS复合材料全天候催化降解MB染料体系依然可以生成 $\cdot O_2^-$, $\cdot OH$ 和 h^+ 等活性物种。

和 $BiVO_4$ 的导带电位, 使得 $Sr_2MgSi_2O_7:(Eu^{2+}, Dy^{3+})$ 的价带上 h^+ 快速迁移到 Ag_3PO_4 和 $BiVO_4$ 的导带与 e^- 发生重组。同时由于 Ag_3PO_4 和 $BiVO_4$ 的价带电位比 $\cdot OH/H_2O$ 的标准电位(+1.99 eV)更大, Ag_3PO_4 和 $BiVO_4$ 的价带上的 h^+ 可以高效地将 H_2O 氧化为 $\cdot OH$ 。除此之外, $Sr_2MgSi_2O_7:(Eu^{2+}, Dy^{3+})$ 的导带电位比 $O_2/\cdot O_2^-$ 标准电位(-0.33 eV)更负, 因此导带上的 e^- 可以将 O_2 还原为 $\cdot O_2^-$ 。在 $\cdot OH$, h^+ 和 $\cdot O_2^-$ 等活性物种的共同作用下实现了有机染料MB的高效降解。缺陷填充阶段剩余的部分能量填充了 $Sr_2MgSi_2O_7:(Eu^{2+}, Dy^{3+})$ 的缺陷, 实现了能量的储存, 同时可以提高材料的稳定性。双Z型异质结的构建有效保留了 $Sr_2MgSi_2O_7:(Eu^{2+}, Dy^{3+})$ 的导带电子以及 Ag_3PO_4 和 $BiVO_4$ 的价带空穴, 提高了光催化效率。

由图10b可以看出, 黑暗条件下 $Sr_2MgSi_2O_7:(Eu^{2+}, Dy^{3+})$ 缺陷中的能量逐渐释放, Dy^{3+} 由高能态回落到低能态, 最终导致 Eu^{2+} 从 $4f^65d^1$ 能级跃迁回基态, 这一过程中伴随着光子能量的产生, 可以辐射到约475 nm范围^[39]。 $Sr_2MgSi_2O_7:(Eu^{2+}, Dy^{3+})$ 辐射的光子

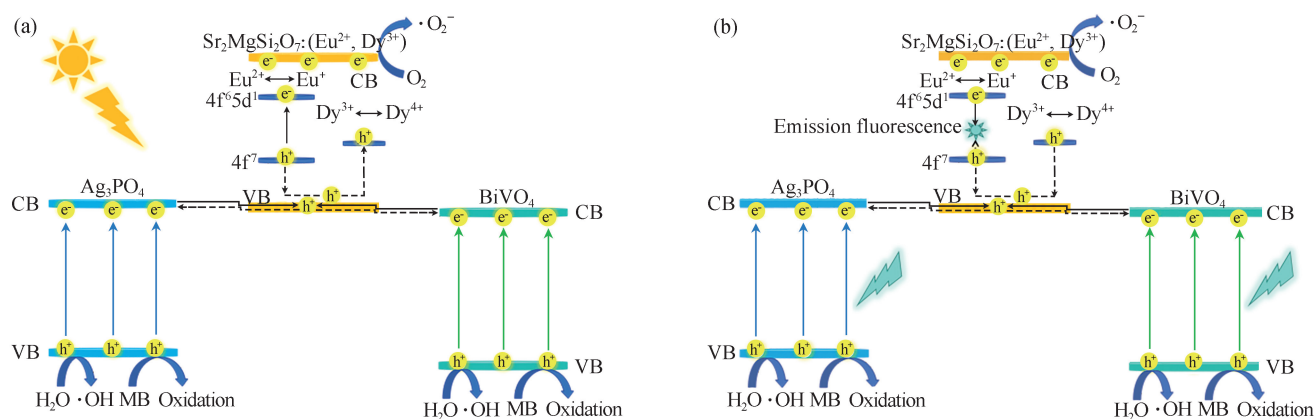


图10 光照 (a) 和黑暗 (b) 环境中ABS复合材料的双Z型光催化机理

Fig.10 Dual Z-scheme photocatalytic mechanism of ABS composites in light (a) and dark (b) environments

能量足以激发 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 产生光电子-空穴对,驱动光催化反应进行。 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 价带上 h^+ 快速迁移到 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 的导带与 e^- 发生重组, $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 导带上的 e^- 以及 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 价带上的 h^+ 有效保留。 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 价带上的 h^+ 将 H_2O 高效氧化为 $\cdot\text{OH}$,在 $\cdot\text{OH}$ 和 h^+ 等活性物种的作用下实现了有机染料MB的高效降解。 Ag_3PO_4 , BiVO_4 和 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 三者耦合后双Z型异质结的构建有效保留了 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 的高氧化价带,丰富的 h^+ 作为有效的氧化位点促进光催化降解过程的进行。同时,在双Z型异质结体系中建立了多层电子迁移机制,显著提高了光生电子的迁移和分离效率,并有效抑制了光生载流子的复合,体系内保存的更多数量的光生载流子维持了较高的光催化活性。此外,双Z型异质结的构建拓展了光谱响应范围,优化了光子捕获和能量转换效率,从而进一步提高了太阳能利用效率^[40]。

3 结论

通过蒸发溶剂法制备了 $\text{Ag}_3\text{PO}_4/\text{BiVO}_4/\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 复合材料,三者质量比为1:1:40的复合材料表现出优异的全天候光催化活性和稳定性,光照-黑暗环境中MB染料溶液的降解率最高达到了98.8%,循环使用5次后对MB染料溶液的降解率仍达到了98.5%。 Ag_3PO_4 , BiVO_4 和 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 之间双Z型异质结的构建有效促进了光电子-空穴的分离,拓宽了光谱响应范围,保留了 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 高氧化电位的价带,多层电子转移机制提高了光催化效率。光照条件下 $\text{Sr}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7:(\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+})$ 通过缺陷填充积累能量,黑暗条件下能量被释放激发 Ag_3PO_4 和 BiVO_4 发生电荷分离,实现黑暗条件下的光催化降解。全天候光催化过程中 $\cdot\text{OH}$ 和 h^+ 等活性物种起到关键作

用。后续可利用长余辉材料自发光特性与其他半导体材料构建双S型异质结以获得性能优异的光催化材料,解决有机染料的污染问题。

参考文献:

- [1] Mao J E, Chen H Y, Xu X Y, et al. Assessing greenhouse gas emissions from the printing and dyeing wastewater treatment and reuse system: Potential pathways towards carbon neutrality [J]. The Science of the Total Environment, 2024, 927: 172301.
- [2] Xu J H, Ma S Y. High-efficiency photocatalytic degradation of RhB by protonation of g- C_3N_4 with Ag-loaded TiO_2 nanofibers [J]. Journal of Crystal Growth, 2023, 617: 127290.
- [3] Wang J, Chen C C, Zhao Z H, et al. Construction of N-doped g- $\text{C}_3\text{N}_4/\text{NH}_2\text{-MIL-125}(\text{Ti})$ S-scheme heterojunction for enhanced photocatalytic degradation of organic pollutants: DFT calculation and mechanism study [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 922: 166288.
- [4] Huang G Z, Liu S L, Tian C, et al. Construction of S scheme $\text{ZnO}/\text{g-}\text{C}_3\text{N}_4$ heterojunction for the removal of pyridine from coal chemical wastewater [J]. Optical Materials, 2024, 150: 115288.
- [5] 卜义夫, 刘思乐, 宋丹丹, 等. 废旧涤纶基活性炭负载g- C_3N_4 光催化剂的制备及其对亚甲基蓝的光催化降解 [J]. 毛纺科技, 2023, 51(2): 40-48.
- [6] Wang X Q, Wang F, Chen B, et al. Promotion of phenol photodecomposition and the corresponding decomposition mechanism over g- $\text{C}_3\text{N}_4/\text{TiO}_2$ nanocomposites [J]. Applied Surface Science, 2018, 453: 320-329.
- [7] 姚华, 马雯雯, 杨林蛟, 等. BiVO_4 的制备方法及其与POMs/ BiVO_4 和MOFs/ BiVO_4 复合催化剂的光催化性能研究进展 [J]. 中国科学: 化学, 2025, 55(3): 565-611.
- [8] Zhang G X, Li S L, Jiang H F. Facile method for improving the catalytic performance of g- C_3N_4 by electrostatic self-assembled with $\text{Bi}_2\text{MoO}_6/\text{kaolinite}$ composite [J]. Materials Letters, 2023, 347: 134594.
- [9] 罗嘉宏, 张刚, 史伟. $\text{AgBr}/\text{Ag}_3\text{PO}_4$ 复合材料可见光催化去除无机废水中的氨氮 [J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2023, 55

- (5): 65–71.
- [10] 肖力光, 王一鸣, 雷潭. 钒酸铋基异质结光催化剂研究进展[J]. 应用化工, 2024, 53(2): 408–413.
- [11] 杨静静, 何勇平, 蒋文明, 等. BiVO₄/g-C₃N₄复合物光催化降解罗丹明B的性能研究[J]. 化学研究与应用, 2023, 35(9): 2053–2062.
- [12] 朱建君, 刘佩婷, 韩雯博, 等. TiO₂/g-C₃N₄/Ag₃PO₄异质结的制备及可见光催化性能研究[J]. 无机盐工业, 2025, 57(5): 116–124.
- [13] Wu J R, Li X Y, Fan S Y, et al. Combined effects of annealing treatment and compounding with FeOOH cocatalyst on efficiency and stability of BiVO₄/Ag₃PO₄ photoanode [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2024, 965: 118367.
- [14] Liu S L, Bu Y F, Cheng S, et al. Synthesis of TiO₂/g-C₃N₅ heterojunction for photocatalytic degradation of methylene blue wastewater under visible light irradiation: Mechanism analysis [J]. Diamond & Related Materials, 2023, 136: 110062.
- [15] 马占峰, 刘硕, 裴浪, 等. Sr₂MgSi₂O₇: Eu²⁺, Dy³⁺长余辉材料的余辉机理及应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(15): 54–66.
- [16] 杨晓宇, 王翔昱, 曹雪娟, 等. 基于第一性原理计算的Sr₂MgSi₂O₇: Eu²⁺, Dy³⁺长余辉材料持续发光机理[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(3): 775–782.
- [17] Zheng L B, Zhu Y A, Pang Z Y, et al. Luminescence properties of composite material Sr₂MgSi₂O₇: Eu²⁺, Dy³⁺/light conversion agent with multilayer structure [J]. Journal of Rare Earths, 2022, 40(1): 34–40.
- [18] 杨晓宇, 唐伯明, 曹雪娟, 等. 具有持续反应活性的g-C₃N₄/Sr₂MgSi₂O₇: Eu²⁺, Dy³⁺复合材料的光学-催化行为研究[J]. 材料导报, 2023, 37(12): 52–58.
- [19] Ma X H, He S Y, Zhang Z R, et al. Fabrication of double S-scheme Sr₂MgSi₂O₇: Eu²⁺, Dy³⁺/ZnIn₂S₄/UiO-66-NH₂ heterojunctions with photon storage effect for enhanced round-the-clock photocatalysis [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1010: 176993.
- [20] 唐双, 张雪乔, 蒋莉萍, 等. 煤矸石/BiVO₄复合光催化剂的制备及其对黄药废水的降解[J]. 复合材料学报, 2023, 40(12): 6703–6717.
- [21] 范小暄, 郑永灵, 徐丽荣, 等. 基于富氧空位LiYScGeO₄: Bi³⁺长余辉光催化剂的自激活余辉驱动有机污染物芬顿降解[J]. 无机材料学报, 2025, 40(5): 481–490.
- [22] Hyun L D, Shielah M, Bumrae C, et al. Enhanced photocatalytic decomposition of methylene blue and toluene gas with hydrothermally coated TiO₂-supported on Ag-CaAl₂O₄: Eu²⁺, Nd³⁺ long-lasting phosphor [J]. Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis, 2023, 137: 571–585.
- [23] 吴金往, 谢琦靖, 张成亮, 等. 自旋极化增强ZnFe_{1.2}Co_{0.8}O₄/BiVO₄ S型异质结光催化性能降解四环素[J]. 物理化学学报, 2025, 41(5): 120–129.
- [24] 钱震, 童熙, 安国芳, 等. BiVO₄-TiO₂光催化剂的超声辅助合成及其可见光性能[J]. 分子催化(中英文), 2024, 38(6): 567–577.
- [25] Yao C L, Wu Y, Yuan Y J, et al. Preparation of Ag₃PO₄-based photocatalyst and its application of photocatalytic degradation [J]. Journal of the Indian Chemical Society, 2025, 102: 101746.
- [26] Chen H J, Kang C L, Zhao S Y, et al. Synergistic effect of oxygen vacancies and Z-scheme in Ag₃PO₄/FeSnO(OH)₅ for ultrafast degradation of indomethacin via photogenerated h⁺ [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 366: 132802.
- [27] Li S J, Wang C C, Cai M J, et al. Designing oxygen vacancy mediated bismuth molybdate (Bi₂MoO₆)/N-rich carbon nitride (C₃N₅) S-scheme heterojunctions for boosted photocatalytic removal of tetracycline antibiotic and Cr(VI): Intermediate toxicity and mechanism insight [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 624: 219–232.
- [28] 芦博慧, 史慕杨, 逢增媛, 等. SrAl₂O₄: Eu²⁺, Dy³⁺/Sr₂MgSi₂O₇: Eu²⁺, Dy³⁺/光转换剂红光发光材料的制备与表征[J]. 中国稀土学报, 2022, 40(4): 591–601.
- [29] 蔡永丰, 刘作涛, 常石岩, 等. Yb³⁺共掺杂Sr₂MgSi₂O₇: Eu²⁺, Dy³⁺长余辉发光材料的制备与性能研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2019, 47(2): 45–49.
- [30] 韩龙, 刘思乐, 张申奥, 等. SnS₂/C₃N₅光催化剂的制备及其对亚甲基蓝的光催化降解[J]. 印染, 2025, 51(1): 10–14.
- [31] 张博, 李雪梅, 朱文祺. 新型复合CdIn₂S₄/ZnIn₂S₄异质结的制备及其光催化性能[J]. 复合材料学报, 2023, 40(12): 6649–6659.
- [32] Zhang Y, Cui T Y, Zhao J B, et al. Fabrication and study of a novel TiO₂/g-C₃N₅ material and photocatalytic properties using methylene blue and tetracycline under visible light [J]. Inorganic Chemistry Communications, 2022, 143: 109815.
- [33] 蒋文雯, 莫慧琳, 樊婷玥, 等. Ag₆Si₂O₇/TiO₂复合光催化剂的制备及其对亚甲基蓝的降解性能[J]. 纺织学报, 2021, 42(4): 107–113.
- [34] Xia Z H, Wang X G, Liu K, et al. Preparation and photocatalytic properties of WSe₂/BiVO₄ p-n heterojunction photocatalytic materials [J]. Catalysis Communications, 2024, 187: 106857.
- [35] 朱砚, 李薇, 邱小燕. CdS/g-C₃N₄复合材料的制备及对刚果红的光催化降解[J]. 日用化学工业(中英文), 2025, 55(5): 573–580.
- [36] Cheng Y, Yu T, Lei X F, et al. Construction of charge transport channels and strong interfacial electric fields in BiVO₄/Cu₂O type-II heterojunction for enhanced piezo-photocatalytic performance [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13: 116763.
- [37] 马喜峰. Ag/Ag₃PO₄/TiO₂双异质结催化剂的制备及光催化性能研究[J]. 化学与生物工程, 2021, 38(10): 37–40, 45.
- [38] Yang C, Zhang Z, Liu X, et al. Sustainable photocatalytic process using non-silver agent ZnO/P-g-C₃N₄/Sr₂MgSi₂O₇: Eu²⁺, Dy³⁺ for antibacterial activity [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1005: 176017.
- [39] Xu C, Feng P Q, Shao J W, et al. Mechanism and dynamic analysis of persistent luminescence in phosphors Sr₂MgSi₂O₇: Eu²⁺, Dy³⁺ [J]. Ceramics International, 2024, 50: 32793–32801.
- [40] Ma M X, Yan X, Mao Y L, et al. All-solid-state Z-scheme AgBr/Bi₂CrO₆ heterostructure with metallic Ag as a charge transfer bridge for boosted charge transfer and photocatalytic performances [J]. Applied Surface Science, 2024, 654: 159471.

(编辑: 周 婷)