

文章编号 1672-6634(2024)06-0049-07

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024080006

非润湿碳化 BiOBr 蒸发器的构筑及其 在清洁水生产中的应用

秦元辉¹, 张晓龙¹, 葛博¹, 张同辉¹, 任桂娜²

(1. 聊城大学 材料科学与工程学院, 山东 聊城 252059; 2. 烟台大学 环境与材料工程学院, 山东 烟台 264405)

摘要 半导体光催化剂已被广泛应用于溶解性污染物去除, 但是对于漂浮的有机污染物却无能为力。为此, 以碳化 BiOBr 光催化剂为载体, 利用原位修饰策略在合成疏水碳化 BiOBr 的基础上, 构筑了超疏水织物漂浮层(SF), 对水的接触角达到了 156.9° 。SF 层不仅具有光降解污染物能力, 而且具有选择性吸附漂浮有机溶剂的能力。另外, 碳化 BiOBr 作为光热转换层, 嵌入琼脂气凝胶网络得到同时具备亲水和光热转换的气凝胶(AAG)。由 SF 层和 AAG 层组装的蒸发器, 实现了 $1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸汽产生速度。

关键词 光降解; 油水分离; 环境修复; 非润湿; 光热

中图分类号 TB34

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



文后附电子版增强出版内容。

Construction of Non-Wetting Carbonized BiOBr and Its Application in Clean Water Production

QIN Yuanhui¹, ZHANG Xiaolong¹, GE Bo¹, ZHANG Tonghui¹, REN Guina²

(1. School of Materials Science and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2. School of Environmental and Material Engineering, Yantai University, Yantai 264405, China)

Abstract Semiconductor photocatalysts have been widely used to remove soluble pollutants, but they can not be used for the removal of floating organic pollutants. Therefore, carbonized BiOBr photocatalysts were used as the carrier and the hydrophobic modification of the catalyst was achieved. Then, the superhydrophobic fabric floating layer (SF) was constructed, and the contact angle of water reached 156.9° . The SF layer not only had the ability to photodegrade pollutants, but also selectively adsorbed floating organic solvents. In addition, the carbonized BiOBr as a photothermal conversion layer was embedded in the agar aerogel network to obtain an aerogel (AAG) with the capacity of both hydrophilic and photothermal conversion. The evaporator containing SF and AAG layers achieved a steam generation rate of $1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$.

Key words photodegradation; oil/water separation; environmental remediation; non-wetting; photothermal

收稿日期: 2024-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(52305196); 山东省自然科学基金项目(ZR2022ME073)资助

通信作者: 葛博, 男, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 表界面功能材料, E-mail: gebo11@163.com。

0 引言

随着工业化进程的推进,水体污染以及饮用水短缺成为制约社会发展的因素^[1-3]。根据溶解性不同,污染物可分为溶解性和非溶解性污染物。针对水溶性污染物,常用的方法有吸附^[4]和光降解方法^[5-7]。然而,吸附的方法存在饱和以及容易造成二次污染的问题。BiOX ($X = \text{Br}, \text{Cl}, \text{I}$)具有稳定的物理化学性质和易于合成的优势引起了研究者的兴趣^[8-10],其中 BiOBr 具有合适的禁带宽度和可见光响应能力^[11],已成为研究的热点。Zhou 团队^[12]以木质素磺酸盐作为碳源和表面活性剂合成了 BiOBr/C 催化剂,可有效去除四环素污染物。Pan 团队^[13]采用一步法构筑了 C/BiOBr@Co-MOF 核壳光催化剂,对溶解性亚甲基蓝的降解效率达到了 96%。Liu 团队^[14]采用溶剂热法合成了碳量子点和 N 掺杂的 BiOBr,实现了磺胺异噁唑的降解。上述研究证明了半导体光催化剂在降解溶解性污染物方面的优势,但是对于非水溶性的漂浮有机污染物却无能为力。

非润湿材料的出现为漂浮有机污染物的去除提供了借鉴,研究者已实现多种材料的超疏水化,包括金属有机框架化合物(MOF)^[15]、三聚氰胺海绵^[16]、聚多巴胺/SiO₂^[17]和不锈钢网^[18]等。构筑方法包括冷冻干燥^[19, 20]、浸涂^[21]、原位发泡^[22]、静电纺织^[23]和惰性气氛保护下的烧结^[24]等。Li 团队^[25]首先在三聚氰胺海绵表面生长聚多巴胺,再在上面固定 Co-MOF,最后通过聚二甲基硅氧烷降低表面张力,合成了超疏水海绵,实现了二氯甲烷/水的分离。Zhang 团队^[26]在织物表面生长聚多巴胺,然后通过正硅酸乙酯的原位水解生成 SiO₂,在氟化嵌段共聚物作用下降低表面张力,合成了超疏水织物,实现了甲苯/水的分离。超疏水材料在选择性去除漂浮有机溶剂方面表现出高效率。目前面临的挑战包括同步去除溶解性和非溶性污染物以及实现清洁水生产。

本文以蔗糖作为碳源,合成了碳化 BiOBr(C-BiOBr)。为了实现表面浮油的同步去除,设计了十六胺对 C-BiOBr 进行修饰,得到疏水 C-BiOBr。在聚二甲基硅氧烷辅助下,构筑了超疏水 C-BiOBr 漂浮层。该漂浮层不仅解决了粉末催化剂难以回收利用的难题,还实现了漂浮的甲苯污染物选择性吸附和乙醇辅助下溶解性污染物的降解。同时,C-BiOBr 作为光热转换层与漂浮层协同作用还能实现清洁水生产。希望碳化 BiOBr 的多功能设计为污水处理和清洁水生产带来新的解决方案。

1 实验部分

蔗糖、十六胺、琼脂粉和五水硝酸铋[Bi(NO₃)₃ · 5H₂O]均为分析纯,购买于上海麦克林试剂公司;十六烷基三甲基溴化铵(分析纯)由上海阿拉丁试剂公司提供;聚二甲基硅氧烷和固化剂由道康宁公司提供。

1.1 样品合成

1.1.1 C-BiOBr 漂浮层的合成。将 7.5 g Bi(NO₃)₃ · 5H₂O 溶解在 30 mL 乙二醇中(A 溶液)。将 5.6 g 十六烷基三甲基溴化铵溶解于 30 mL 无水乙醇中(B 溶液)。将 B 溶液加入 A 溶液中,搅拌 40 min 后转移至水热釜中,在 180 °C 下反应 10 h。将产物离心洗涤得到 BiOBr 粉末。将 0.2 g 蔗糖溶解在 10 mL 去离子水中,加入 0.6 g BiOBr,超声波分散 5 min 后,在 75 °C 下搅拌蒸干得到蔗糖-BiOBr 混合物。将混合物放入马弗炉中,1 h 升温至 200 °C,保温 1 h;然后,1 h 升温至 300 °C,保温 3 h,得到 C-BiOBr。将 0.2 g C-BiOBr 和 0.1 g 十六胺分散至 30 mL 无水乙醇中,搅拌 3 h。将产物离心收集,用无水乙醇洗涤两次得到疏水 C-BiOBr (SH-C-BiOBr)。将 0.05 g 聚二甲基硅氧烷和 0.005 g 固化剂溶解在 40 mL 乙酸乙酯中,加入 0.1 g SH-C-BiOBr,超声波分散均匀后,放入织物基底 25 min,取出在 130 °C 下处理 40 min。上述过程重复五次得到超疏水漂浮层。

1.1.2 清洁水生产蒸发器的构筑。将 0.5 g 琼脂粉加入 50 mL 去离子水中,在 85 °C 下回流将琼脂粉全部溶解得到琼脂溶液。取 5 mL 琼脂溶液,在 85 °C 下加入不同质量的未疏水化 C-BiOBr,继续搅拌 5 min。放入聚氨酯海绵将琼脂溶液全部吸附后,室温干燥。最后,将超疏水漂浮层和琼脂海绵组装为蒸发器,实物照片见图 S1。

1.2 样品表征

用配备有能谱仪的 Merlin Compact 场发射扫描电子显微镜(SEM, Zeiss 公司)观察样品的形貌表征;用

D8 X 射线粉末衍射仪(XRD,Bruker 公司)分析样品的物相组成;用透射电子显微镜(TEM,FEI 公司)分析样品的形貌和微观结构;用 DSA25S 接触角测量仪(Krüss 公司)分析非润湿织物、仅负载聚二甲基硅氧烷的织物和纯织物对水和十二烷的润湿性;用 CHI600E 电化学工作站(上海辰华公司)分析光催化剂的莫特-肖特基曲线;用 UH4150 紫外/可见/近红外分光光度计(日立公司)分析光催化剂的固体紫外漫反射(DRS)光谱。用全自动超高精度三站比表面微孔介孔分布和蒸汽吸附仪(Belsorp 公司)分析光催化剂的孔径结构信息。

1.3 光催化降解和光热蒸发性能测试

将非润湿织物在乙醇中浸泡以改变其表面润湿性,然后将其放入 50 mL 罗丹明 B(RhB)水溶液(10 mg/L)中,暗处理 30 min。在 200 mW/cm^2 的光照下,间隔 20 min 取样 2.5 mL。在 554 nm 条件下,测试样品的吸光度。光热实验:将组装好的蒸发器放在盛水的烧杯中,在 100 mW/cm^2 的光照下进行光热实验,间隔半小时计算质量损失。

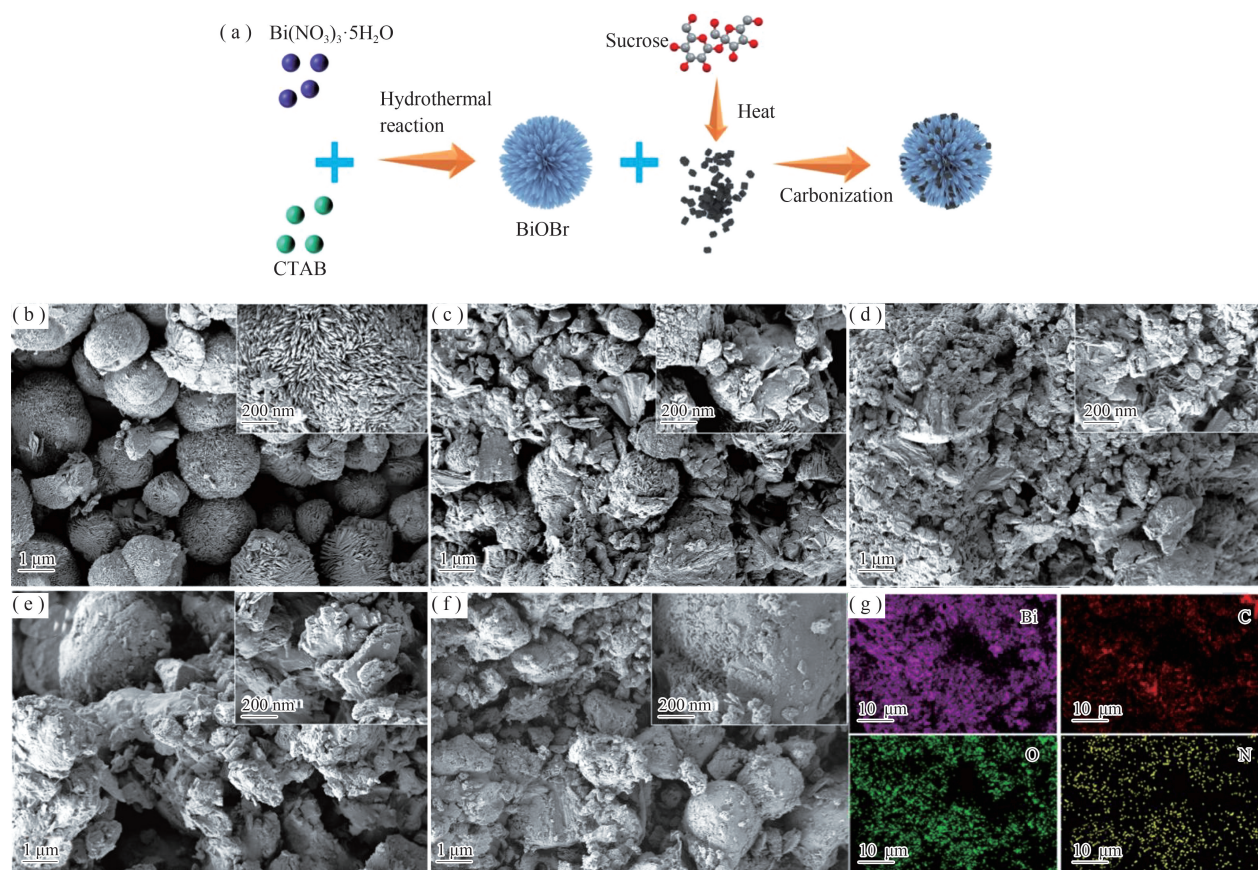


图 1 (a) C-BiOBr 的合成流程;不同样品的 SEM 图:(b) BiOBr、(c) 0.1 g C-BiOBr、(d) 0.2 g C-BiOBr、(e) 0.3 g C-BiOBr 和(f)超疏水 0.2 g C-BiOBr;(g)超疏水 0.2 g C-BiOBr 的元素分布图

Fig. 1 (a) The synthesis process of C-BiOBr; Morphologies of C-BiOBr with different C content: (b) BiOBr, (c) 0.1 g C-BiOBr, (d) 0.2 g C-BiOBr, (e) 0.3 g C-BiOBr and (f) superhydrophobic 0.2 g C-BiOBr; (g) Elemental distribution of superhydrophobic 0.2 g C-BiOBr

2 结果与讨论

为了实现污水治理和清洁水生产,本文采用 C-BiOBr 作为多功能化的载体。采用空气气氛下的蔗糖碳化工工艺合成 C-BiOBr,合成过程如图 1(a)所示。从表面形貌中可以看出,纯蔗糖碳化形成块状形貌(图 S2)。没有添加蔗糖的 BiOBr 呈现出微米球状形貌,从高倍 SEM 图像[图 1(b)]中可以看出微米球是由纳米片组装而成。如图 1(c)所示,当蔗糖含量为 0.1 g 时,C-BiOBr 的形貌中出现不规则的块状,这种块状为碳化的蔗糖。当蔗糖含量为 0.2 g 时,不规则的块状形貌比例增大[图 1(d)]。随着蔗糖含量提高至 0.3 g[图 1

(e)], 碳化蔗糖的聚集导致 C-BiOBr 的均匀性变差。因此, 确定最佳的蔗糖含量为 0.2 g。如图 1(f) 所示, 蔗糖含量为 0.2 g 的 C-BiOBr 经过修饰后, 表面形貌未发生明显变化。从 SH-C-BiOBr 的元素分布图[图 1(g)] 中可以看到 Bi、C、O 和 N 元素具有相同的分布, 证明了十六胺在 C-BiOBr 表面的成功修饰。

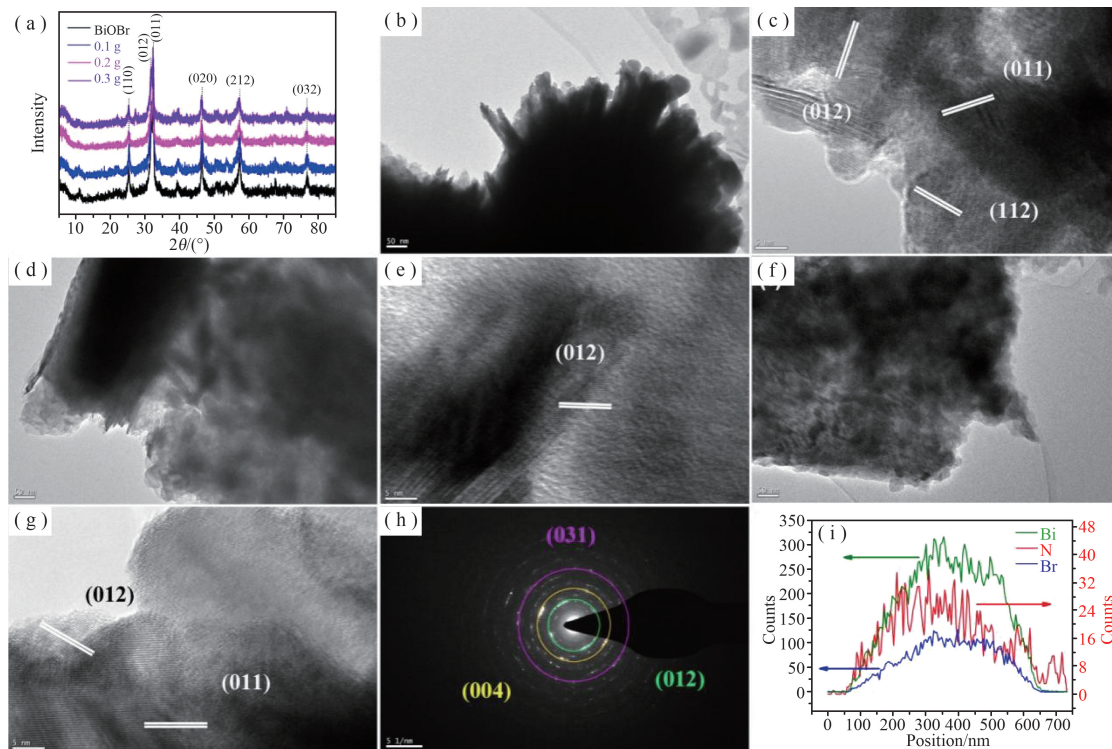


图 2 (a) 样品的 XRD 图谱; (b, c) BiOBr、(d, e) 0.2 g C-BiOBr 以及 (f~i) SH-C-BiOBr 的 TEM 图像

Fig. 2 (a) XRD patterns of samples; TEM images of (b, c) BiOBr, (d, e) 0.2 g C-BiOBr and (f~i) SH-C-BiOBr

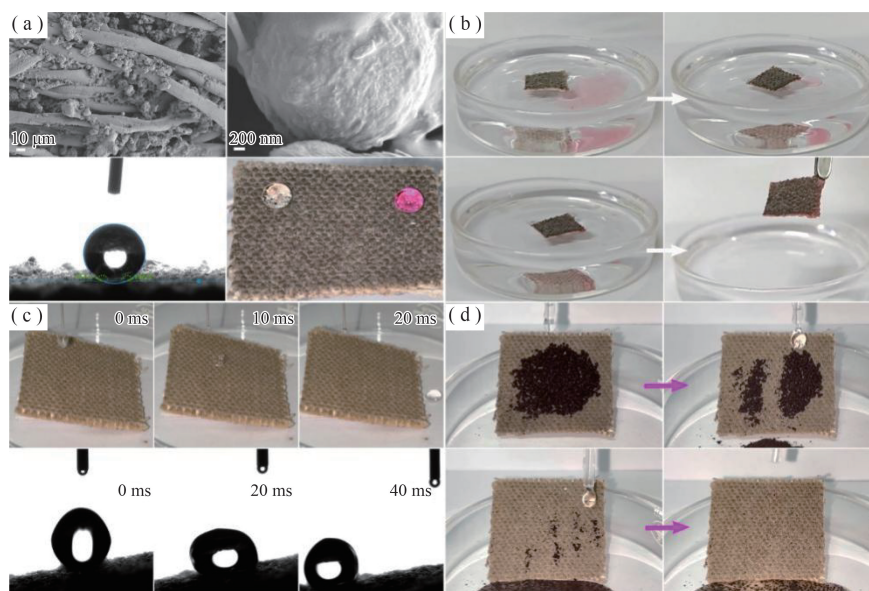


图 3 (a) 非润湿织物的表面形貌和润湿行为; (b) 非润湿织物的选择性去除漂浮有机污染物能力; (c) 水珠粘附和 (d) 自清洁实验

Fig. 3 (a) Morphology and wetting behavior of non-wetting fabric; (b) Oil/water separation performance, (c) water droplet adhesion test and (d) self-cleaning property of the non-wetting fabric

为了得到 C-BiOBr 复合材料的物相组成和微观结构, 分析了 XRD 图谱和 TEM 图像。图 2(a) 为 BiOBr 以及蔗糖含量分别为 0.1 g、0.2 g 和 0.3 g 的 C-BiOBr 复合材料 XRD 图谱, 可以观察到四方相的 BiOBr (JCPDS No. 09-0393) BiOBr 的特征衍射峰。图 2(b) 为 BiOBr 的 TEM 图像, 可以观察到片层状结构, 这与

SEM 图像中的形貌一致。在 BiOBr 的高分辨 TEM 图像[图 2(c)]中,存在属于(012)、(011)和(112)晶面的三种晶格条纹。图 2(d, e)是 0.2 g C-BiOBr 的 TEM 图像,可以观察到与 SEM 图像一致的形貌,其中的晶格条纹归属于 BiOBr 的(012)晶面。如图 2(f)所示,经过十六胺修饰后,SH-C-BiOBr 的形貌未发生明显变化,得到了属于(012)和(011)晶面的晶格条纹[图 2(g)]。通过 TEM 选区电子衍射图像[图 2(h)],得到了属于(031)、(004)和(012)晶面的衍射斑点。图 2(i)是 TEM 线扫描结果,可见 Bi、N 和 Br 元素具有相同的变化趋势,证明了十六胺在 0.2 g C-BiOBr 表面上的成功修饰。

如图 S3 所示,纯织物在空气中表现出亲水/亲油性,C-BiOBr 的引入增加了表面粗糙度,有利于实现超疏水性能。从图 S4 可以看出,仅负载聚二甲基硅氧烷的织物对水的接触角为 135.4° 。在合成 SH-C-BiOBr 织物的过程中,聚二甲基硅氧烷的作用是增加颗粒与基底之间的机械稳定性。从图 3(a)中可以看到 C-BiOBr 颗粒聚集在织物的编织结构中。接触角测试结果表明水珠在织物表面的接触角达到 156.9° 。当水珠放在织物表面的时候,以球形状态存在,为了便于观察,其中一个水珠被罗丹明 B 标记为红色。如图 3(b)所示,当水面存在漂浮的油红标记的甲苯时,甲苯可被非润湿织物选择性吸附。

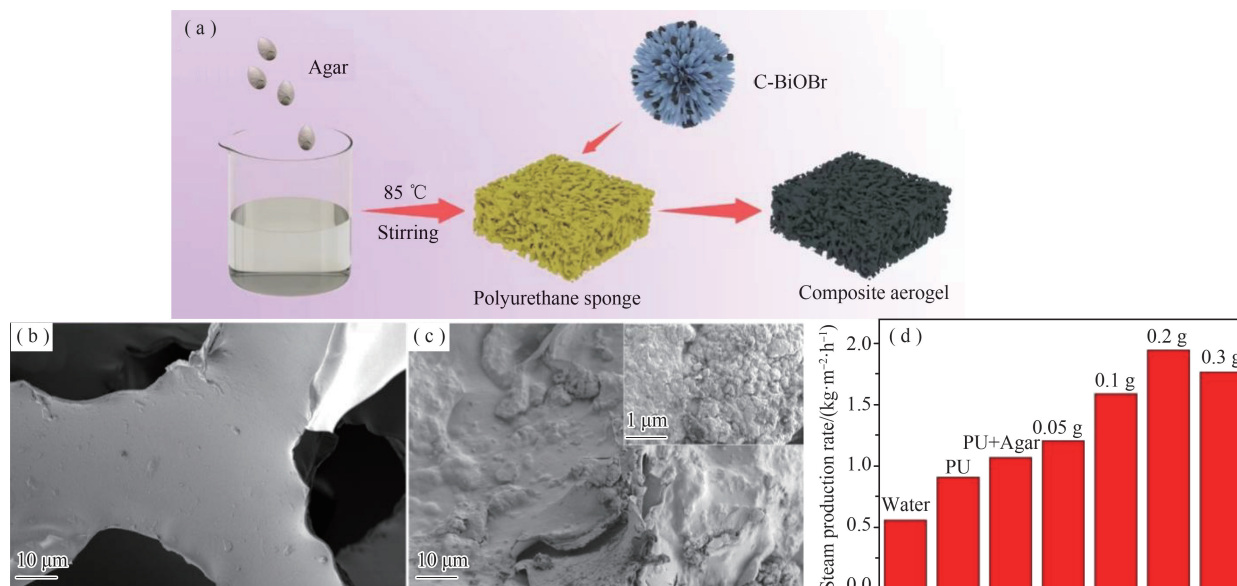


图 4 (a) 琼脂气凝胶的合成;(b) 纯聚氨酯海绵以及含有(c) 0.2 g C-BiOBr 的琼脂气凝胶的 SEM 图像;(d) 样品的蒸发速度对比

Fig. 4 (a) Synthesis process of the agar aerogel; SEM images of (b) Polyurethane sponge and (c) sponge containing 0.2 g C-BiOBr; (d) Comparison of evaporation rates of samples

为进一步验证非润湿织物的选择吸附性,将织物放在 RhB 染色的水和无色的十二烷的界面上,发现无色的十二烷被吸附,而织物表面没有被染色,这证明了其选择吸附性(图 S5)。除此以外,还进行了非润湿织物对十二烷和十六烷的选择吸附性测试,结果证明了织物优异的油水分离性能(图 S6)。当水珠接触非润湿织物的时候,在织物表面发生弹跳,并迅速离开表面,见图 3(c)。利用织物稳定的疏水性,可实现类似荷叶的自清洁效应。如图 3(d)所示,当织物表面污染有固体粉末(咖啡粉末)时,用水就可以快速冲洗掉,留下清洁的表面,而未经任何处理的纯织物不具备自清洁能力(图 S7)。为了实现 C-BiOBr 的功能化,设计了 C-BiOBr 琼脂气凝胶作为光热转换层,合成过程见图 4(a)。首先将 C-BiOBr 分散于琼脂前驱体中,再吸附在聚氨酯海绵表面形成复合气凝胶。未经修饰的聚氨酯海绵表面光滑,且能观察到三维连通的多孔结构[图 4(b)]。当海绵表面负载了 C-BiOBr 琼脂后,表面变得粗糙[图 4(c)]。图 4(d)为不同样品的水蒸发速度对比图。可以看出,纯水和纯聚氨酯海绵的蒸发速度分别为 0.559 和 $0.91 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。仅有琼脂负载的聚氨酯海绵的蒸发速度为 $1.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。随着 C-BiOBr 加入量的增加,蒸发速度逐渐增加,当 C-BiOBr 的含量为 0.2 g 时,达到 $1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。当 C-BiOBr 含量增加至 0.3 g 时,蒸发速度下降至 $1.77 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。因此,C-BiOBr 的最佳加入量为 0.2 g [图 4(d)]。优异的光热蒸发性能与供水和表面

温度有关。为此,在一个太阳光强的光照 30 min 后,测试光热转换层在干燥和润湿状态下的表面温度,发现干燥状态下的光热转换层温度为 72 °C,而润湿状态下的光热转换层温度为 32.8 °C,温度的降低是因为充足的供水具有冷却效果(图 S8)。

蔗糖碳化的目的是形成碳层增加 BiOBr 的吸光度,使 C-BiOBr 粉末既可以作为光热层又可以作为光催化剂。不同蔗糖含量下得到的 C-BiOBr 粉末对 RhB 的降解效果见图 S9。综合考虑光降解和光吸收因素选择蔗糖含量为 0.2 g。如图 5(a)所示,从吸附-脱附等温线可以看出,BiOBr、0.2 C-BiOBr 和 SH-0.2 C-BiOBr 具有第四类吸附等温线特征,证明结构中含有介孔,比表面积分别为 16.5、8.3 和 5.8 m²/g,比表面积的减小是因为碳材料的块状形貌对比表面积的贡献小。如图 5(b)所示,纯 BiOBr 截止吸收波长为 467 nm,而 C-BiOBr 的吸光度明显增大,说明其具有更高的光利用效率。进一步根据式(1)得到 BiOBr 的禁带宽度为 2.37 eV(图 S10)。

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{n/2}, \quad (1)$$

式中 E_g 、 h 、 ν 、 A 和 α 分别表示禁带宽度、普朗克常数、频率、常数和吸光度。如图 5(c)所示,根据 BiOBr 的肖特基曲线的切线与横坐标的交点,确定其平带电位为 -0.52 V(vs. SCE),即 -0.275 V(vs. NHE)。由于肖特基曲线的切线具有正的斜率,因此合成的 BiOBr 属于 n 型半导体。对于 n 型半导体,导带电位比平带电位小 0.2 V,得到 BiOBr 的导带电位为 -0.475 V。再结合禁带宽度 2.37 eV,计算得到 BiOBr 的价带电位为 1.895 V[图 5(d)插图]。以 RhB 作为模拟的水溶性污染物,非润湿织物的降解曲线如图 5(d)所示,降解效率达到了 92.1%。

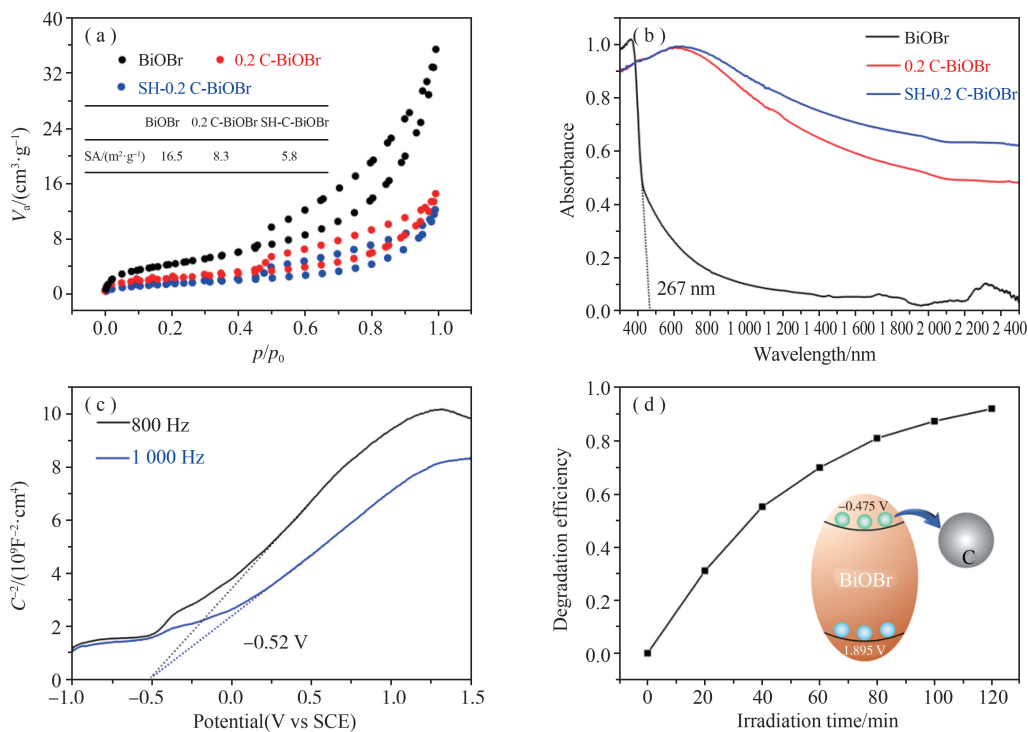


图 5 样品的(a)吸附-脱附等温线和(b)DRS 光谱分析;(c)BiOBr 的莫特-肖特基曲线;(d)非润湿织物的光降解曲线以及机理图

Fig. 5 (a) Adsorption-desorption isotherms and (b) DRS analysis of samples; (c) Mott-Schottky curves of BiOBr;

(d) Photodegradation curve and degradation mechanism of non-wetting fabric

3 结论

本文设计了具有污水处理和清洁水生产双功能的 C-BiOBr 多功能材料。通过 SEM、XRD 和 TEM 等表征,证明了十六胺对 C-BiOBr 的成功修饰,制备了疏水化 C-BiOBr。进一步在聚二甲基硅氧烷辅助下,合成了非润湿 C-BiOBr 织物,实现了表面漂浮甲苯的选择性吸附。通过水珠弹跳实验证明,非润湿织物具有优异的疏水性能,同时验证了非润湿织物的自清洁性能。为了实现清洁水生产,将未修饰的 C-BiOBr 引入

琼脂体系,构筑了 C-BiOBr-琼脂光热转换层,与非润湿漂浮层协同作用实现了 $1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 的蒸发速度。在光照下,非润湿织物实现了溶解性污染物的降解,对 RhB 的降解效率达到了 92.1%,构筑的多功能复合材料有望应用于污水处理和清洁水生产领域。

参 考 文 献

- [1] TIAN X M, WANG P C, WANG Y, et al. In situ imprinted cavity fabrication within BiOBr@porphyrin composites for selective and efficient degradation of trace norfloxacin[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2024, 12: 18381-18392.
- [2] TIAN Y H, LI S L, ZHANG G X. Enhanced photocatalytic performance of BiOBr/kaolinite composite[J]. *ChemistrySelect*, 2024, 9: e202304187.
- [3] CHENG Y Y, LUO Y X, LIU Y H, et al. A salt-resistant and self-floating Janus evaporator by electrospinning for stable solar desalination[J]. *New Journal of Chemistry*, 2024, 48: 12510-12515.
- [4] MARRAKCHI F, HAMEED B H, HUMMADI E H. Mesoporous biohybrid epichlorohydrin crosslinked chitosan/carbon-clay dsorbent for effective cationic and anionic dyes adsorption[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 163: 1079-1086.
- [5] LIU Y Q, LUO G C, LIU Y C, et al. Zinc-doped $\text{C}_4\text{N}_3/\text{BiOBr}$ S-scheme heterostructured hollow spheres for efficient photocatalytic degradation of tetracycline[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2024, 26: 19658-19672.
- [6] ZHOU X, LIU Y M, LIU X Y, et al. Sulfated lignocellulose nanofibril supported flower-like BiOBr with oxygen vacancies towards absorption-photocatalytic synergetic removal of organic pollutants[J]. *New Journal of Chemistry*, 2024, 48: 3910-3923.
- [7] SUN W J, LIU J F, RAN F T, et al. Step-scheme $\text{CsPbBr}_3/\text{BiOBr}$ photocatalyst with oxygen vacancy for efficient CO_2 photoreduction[J]. *Dalton Transactions*, 2024, 53: 14018-14027.
- [8] GAO Y H, LIU H Y, ZHANG D F, et al. One-step preparation of direct Z-scheme $\text{NH}_2\text{-UiO-66/BiOCl}$ photocatalyst for antibiotic degradation by electrostatic adsorption[J]. *New Journal of Chemistry*, 2024, 48: 12254-12265.
- [9] WANG H, ZHANG X, ZHU H Y, et al. Robust Bi-anchoring carbon dot/BiOCl sheet heterojunction photocatalysts toward superior photocatalytic activity[J]. *Nanoscale*, 2024, 16: 12670-12679.
- [10] ZHANG B, MENG Q, LEI Y, et al. Highly porous BiOBr@NU-1000 Z-scheme heterojunctions for synergistic efficient adsorption and photocatalytic degradation of tetracycline[J]. *Dalton Transactions*, 2023, 52: 17854-17860.
- [11] LI X M, DONG Q B, LI F, et al. Defective Bi@BiOBr/C microrods derived from Bi-MOF for efficient photocatalytic NO abatement; directional regulation of interfacial charge transfer via carbon-loading[J]. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 2024, 340: 123238.
- [12] SUN Y M, WU W D, ZHOU H F. Lignosulfonate-controlled BiOBr/C hollow microsphere photocatalyst for efficient removal of tetracycline and Cr(VI) under visible light[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 453: 139819.
- [13] HU S Q, PAN Y F, YANG A R, et al. The core-shell structure of C/BiOBr@Co-MOF for efficient degradation of organic dyes under visible light[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2024, 46: 103949.
- [14] LI Z C, WEN C H, LI D G, et al. Insights into nitrogen-doped BiOBr with oxygen vacancy and carbon quantum dots photocatalysts for the degradation of sulfonamide antibiotics: actions to promote exciton dissociation and carrier migration[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 492: 152449.
- [15] MA J Q, ZHANG M S, FENG R, et al. Superhydrophobic fluorinated metal-organic framework (MOF) devices for high-efficiency oil-water separation[J]. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2024, 11: 5636-5647.
- [16] MENG Y, WANG C Y, XIE R, et al. Ultrastable superhydrophobic melamine sponge via a one-step aqueous solution-based approach for oil/water separation[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 62: 105412.
- [17] MA S S, LI H B, CAO Z R, et al. Highly adhesive bioinspired membrane for efficient oil/water separation by optimization of synergistic effects of hierarchical structure and superhydrophobic modification[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2024, 202: 106002.
- [18] LI D Y, YANG F C, SHI X, et al. Utilizing a layer-by-layer self-assembly strategy to construct eco-friendly and sustainable superhydrophobic C-S@PDMS/SiO₂ coatings on engineering materials for efficient oil-water separation[J]. *Materials Today Sustainability*, 2024, 27: 100830.
- [19] DU B, WANG S N, YANG K N, et al. Wood sponge with photothermal, magnetically driven, and superhydrophobic characteristics for high-viscosity oil-water separation[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 696: 134238.

(下转第 86 页)

- applications[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 71: 625-644.
- [39] NUCHUCHUA O, NEJADNIK M R, GOULOOZE S C, et al. Characterization of drug delivery particles produced by supercritical carbon dioxide technologies[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2017, 128: 244-262.
- [40] 曾素梅, 蔡文坚, 曾少群, 等. 湿法介质研磨技术制备注射用纳米混悬剂及其质量评价研究进展[J]. *中国医药工业杂志*, 2022, 53(09): 1251-1261.
- [41] WANG L, DU J, ZHOU Y, et al. Safety of nanosuspensions in drug delivery[J]. *Nanomedicine*, 2017, 13(2): 455-469.
- [42] URAL M S, DARTOIS E, MATHURIN J, et al. Quantification of drug loading in polymeric nanoparticles using AFM-IR technique: a novel method to map and evaluate drug distribution in drug nanocarriers[J]. *Analyst*, 2022, 147(23): 5564-5578.
- [43] WANG Y T, LI H N, WANG L C, et al. Mucoadhesive nanocrystal-in-microspheres with high drug loading capacity for bioavailability enhancement of silybin[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2021, 198: 111461.
- [44] 杨子毅, 盛利娟, 朱霖, 等. 纳米药物体外溶出测定方法研究进展[J]. *医药导报*, 2022, 41(11): 1615-1621.
- [45] LIU Q, MAI Y P, GU X S, et al. A wet-milling method for the preparation of cilnidipine nanosuspension with enhanced dissolution and oral bioavailability[J]. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 2020, 55: 101371.
- [46] BERTRAM-RALPH E, AMARE M. Factors affecting drug absorption and distribution[J]. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, 2023, 24(4): 221-227.
- [47] PINAR S G, CANPINAR H, TAN C, et al. A new nanosuspension prepared with wet milling method for oral delivery of highly variable drug Cyclosporine A: development, optimization and in vivo evaluation[J]. *European Journal of Pharmaceutical Sciences: Official Journal of the European Federation for Pharmaceutical Sciences*, 2022, 171: 106123.
- [48] GONZALEZ-GONZALEZ O, RAMIREZ I O, RAMIREZ B I, et al. Drug stability: ICH versus accelerated predictive stability studies [J]. *Pharmaceutics*, 2022, 14(11): 2324.
- [49] HUYNH-BA K, MICHAEL D. Stability studies and testing of pharmaceuticals: an overview[J]. *Lc Gc North America*, 2020, 38: 325.

(责任编辑:刘庆松)

(上接第 55 页)

- [20] CHEN H L, GUO Y P, LIU G. Conversion of chitosan and biomass fiber into recyclable superhydrophobic aerogel for efficient oil/water separation through a facile and green approach[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 334: 122021.
- [21] XUE Q W, WU W H, WU J Q, et al. Nano-Fe₃O₄/chitosan-based superhydrophobic coatings with magnetic oil-water separation and photothermal conversion properties[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2024, 689: 133698.
- [22] YIN L, ZHOU M Q, SHI Y Q, et al. Construction of superhydrophobic flexible polyurethane with dual nano-enhancement effect for solar-assisted high-viscosity oil cleanup and oil-water separation[J]. *Applied Surface Science*, 2024, 660: 159971.
- [23] DONG Z H, QU N, JIANG Q S, et al. Preparation of polystyrene and silane-modified nano-silica superhydrophobic and superoleophilic three-dimensional composite fiber membranes for efficient oil absorption and oil-water separation[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12: 112690.
- [24] XU Y, XU S M, LIU S L, et al. Ultralight, shapeable, and superhydrophobic polyacrylonitrile/ polybenzoxazine aerogel for high oil-water separation capacity[J]. *Materials Today Chemistry*, 2024, 38: 102058.
- [25] HE X T, LU J H, LIU J X, et al. Superhydrophobic Co-MOF-based sponge for efficient oil-water separation utilizing photothermal effect [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 469: 134090.
- [26] ZHOU X Y, YU Q, LI Y, et al. Durable superhydrophobic cotton fabrics based on fluorinated alternating copolymer and silica nanoparticle: preparation and oil-water separation[J]. *European Polymer Journal*, 2024, 211: 113029.

(责任编辑:蒲锡鹏)

文章编号 1672-6634(2024)06-0049-07

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024080006

支撑材料

Supporting Information

非润湿碳化 BiOBr 蒸发器的构筑及其 在清洁水生产中的应用

Construction of Non-Wetting Carbonized BiOBr and Its Application in Clean Water Production

秦元辉¹, 张晓龙¹, 葛博¹, 张同辉¹, 任桂娜²

QIN Yuanhui¹, ZHANG Xiaolong¹, GE Bo¹, ZHANG Tonghui¹, REN Guina²

(1. 聊城大学 材料科学与工程学院, 山东 聊城 252059; 2. 烟台大学 环境与材料工程学院, 山东 烟台 264405)

(1. School of Materials Science and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China; 2. School of Environmental and Material Engineering, Yantai University, Yantai 264405, China)

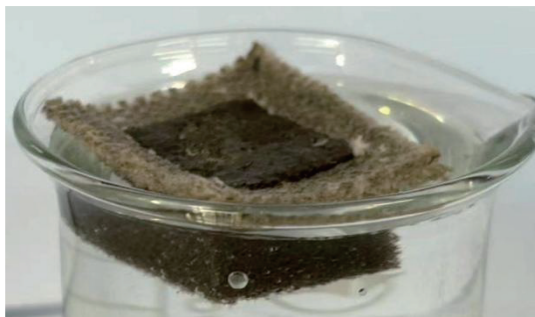


图 S1 蒸发器的实物照片

Fig. S1 Photos of the interface evaporator

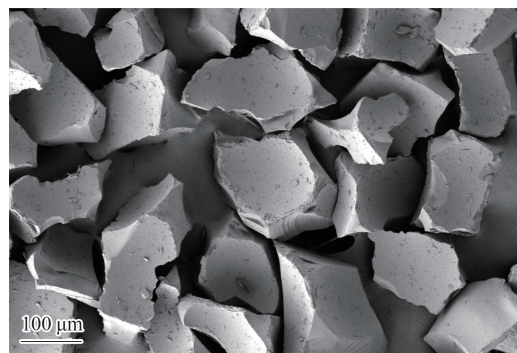


图 S2 纯蔗糖碳化的 SEM 图像

Fig. S2 The SEM image of pure sucrose after carbonization

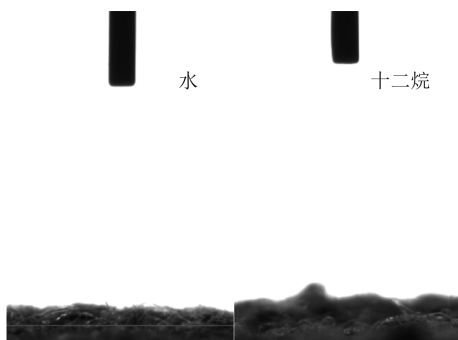


图 S3 纯织物对水和十二烷的接触角

Fig. S3 Contact angles of water and dodecane on the fabric surface

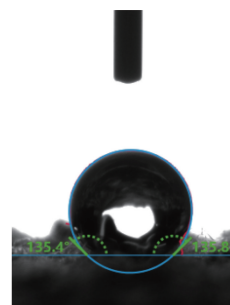


图 S4 仅负载聚二甲基硅氧烷的织物表面对水的接触角

Fig. S4 The water contact angle of fabric with PDMS loading

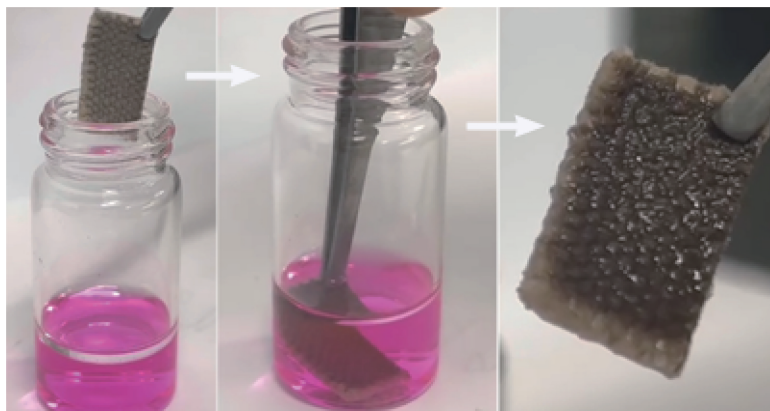


图 S5 选择性油水分离实验,其中无色的是十二烷,而水被 RhB 染色

Fig. S5 Selective oil-water separation experiments. The dodecane is colorless and the water is stained with RhB

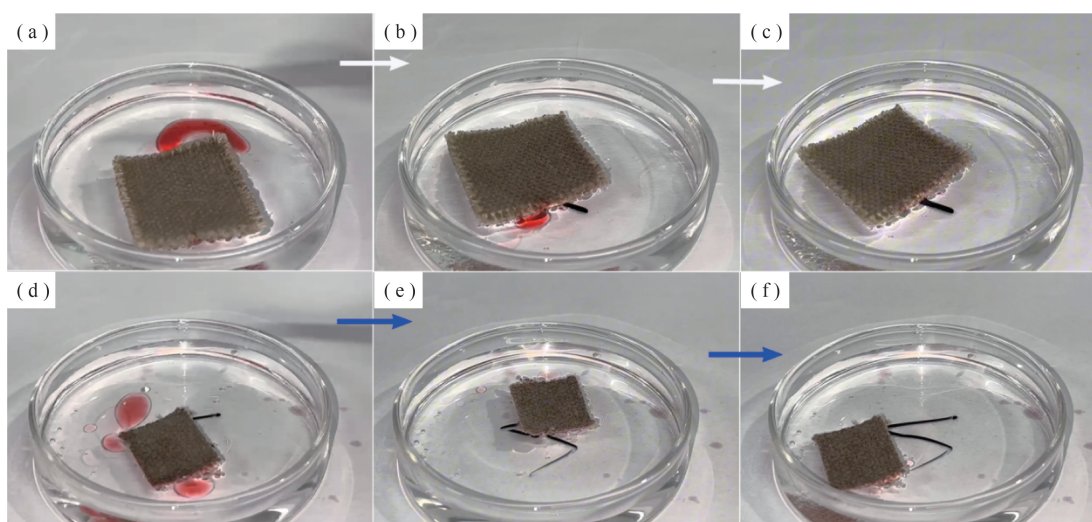


图 S6 超疏水织物对(a~c)十二烷和(d~f)十六烷的吸附过程

Fig. S6 The adsorption process of dodecane (a~c) and hexadecane (d~f) by superhydrophobic fabric

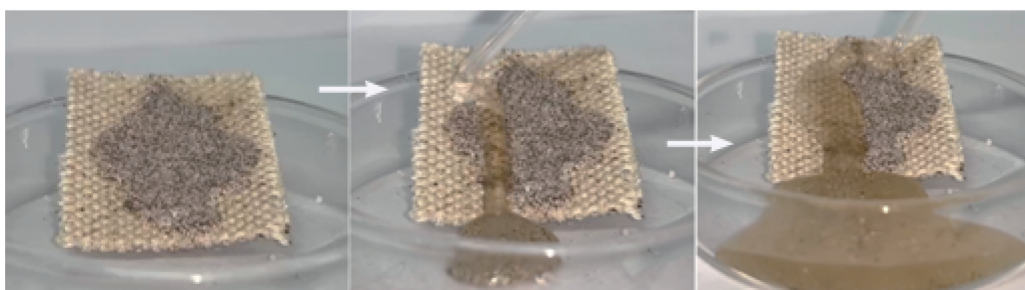


图 S7 纯织物的自清洁性能测试

Fig. S7 Self-cleaning test of pure fabric

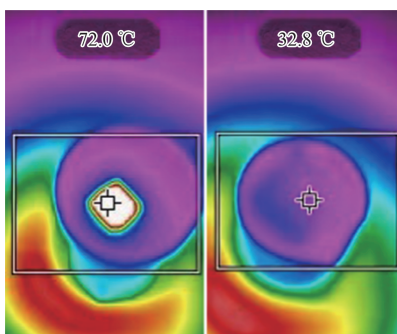


图 S8 干燥和润湿状态下,光热层的表面温度

Fig. S8 The surface temperature of the photothermal layer in the dry and wetting states

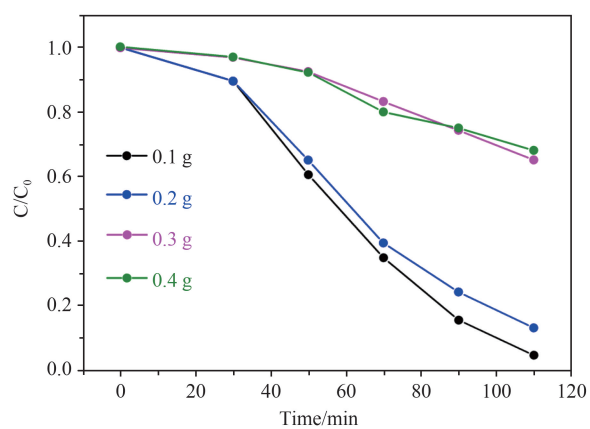


图 S9 不同蔗糖含量(0.1, 0.2, 0.3 和 0.4 g)的 C-BiOBr 对 RhB 的降解曲线

Fig. S9 Degradation curves of RhB by C-BiOBr with different sucrose content (0.1, 0.2, 0.3, and 0.4 g)

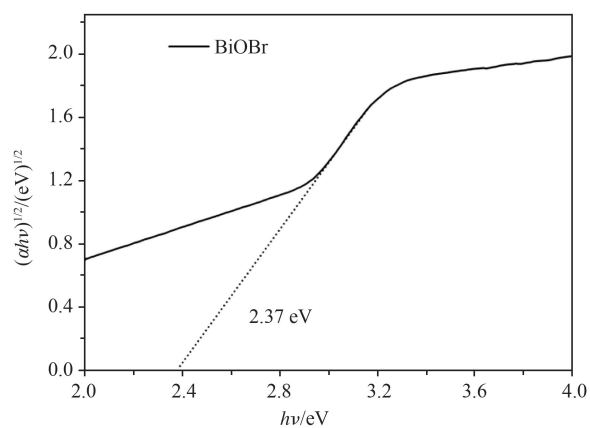


图 S10 BiOBr 的带隙分析

Fig. S10 Band gap analysis of BiOBr

(责任编辑:蒲锡鹏)