

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.09.005

纳米TiO₂&LDH吸附-光催化协同去除SDBS动力学

张立成¹, 候瑞颖¹, 刘澈^{1,2}, 王辛¹, 刘维¹

(1. 沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 世源科技工程有限公司, 北京 100142)

摘要: 为探究纳米TiO₂&LDH对十二烷基苯磺酸钠(SDBS)的吸附和光降解性能及动力学机制,通过溶胶凝胶法和尿素水热法制备TiO₂及复合材料TiO₂&LDH,采用XRD、SEM对材料进行表征,通过动力学模型拟合,并结合吸附与光催化试验分析降解机理与去除效果。结果表明,TiO₂&LDH的吸附与光催化效能比单独的TiO₂和LDH更佳。暗吸附30 min去除率达42.81%,显著高于LDH(31.94%)与TiO₂(19.54%),吸附符合准二级动力学模型和Langmuir等温模型,证实其为化学单层吸附。光催化240 min后总去除率达95.50%,其反应速率常数(0.009 7 min⁻¹)分别为TiO₂和LDH的4.6倍和8.1倍。自由基捕获试验证实羟基自由基(·OH)为降解过程中的主要活性物种。纳米TiO₂&LDH通过吸附与光催化协同机制实现SDBS的高效降解,并具有良好的循环稳定性。

关键词: 吸附; 光催化; 纳米TiO₂&LDH; 十二烷基苯磺酸钠

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)09-0032-08

Kinetics of Synergistic Removal of SDBS by Nano-TiO₂&LDH Adsorption and Photocatalysis

ZHANG Licheng¹, HOU Ruiying¹, LIU Che^{1,2}, WANG Xin¹, LIU Wei¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. SY. Technology, Engineering and Construction Co. Ltd., Beijing 100142, China)

Abstract: To explore the adsorption and photocatalytic degradation performance and kinetics mechanism of sodium dodecylbenzene sulfonate (SDBS) by nano-TiO₂&LDH, TiO₂ and composite TiO₂&LDH were prepared by sol-gel method and urea hydrothermal method respectively. The materials were characterized by XRD and SEM. The removal mechanism was analyzed through the fitting of dynamic models, and adsorption and photocatalytic experiments. The results showed that the adsorption and photocatalytic efficiency of TiO₂&LDH was better than that of TiO₂ and LDH alone. The removal rate of dark adsorption reached 42.81% after 30 minutes, significantly higher than that of LDH (31.94%) and TiO₂ (19.54%). The adsorption behavior conformed to the quasi-second-order kinetic model and the Langmuir isothermal model, confirming that it was a chemical monolayer adsorption. After 240 minutes of photocatalysis, the total removal rate reached 95.50%. The reaction rate constant (0.009 7 min⁻¹) was 4.6 times and 8.1 times that of TiO₂ and LDH, respectively. The free radical capture test confirmed that hydroxyl radical (·OH) was the main active species during the degradation process. Nano-TiO₂&LDH

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFE0114100)

通信作者: 候瑞颖 E-mail: h17331809845@163.com

achieved efficient degradation of SDBS through the adsorption and photocatalytic synergistic mechanism and demonstrated excellent cycling stability.

Keywords: adsorption; photocatalysis; nano-TiO₂&LDH; sodium dodecylbenzene sulfonate

以十二烷基苯磺酸钠(SDBS)为典型代表的阴离子表面活性剂作为添加剂常被应用于电镀等工业生产,是影响电镀除油废水及多种洗涤废水中COD浓度的重要成分之一。电镀除油废水常采用微生物降解、泡沫分离及沉淀法处理,然而这些方法对SDBS的去除效果均不理想^[1]。吸附可以有效去除电镀废水中的各种有机物和重金属,因便捷易用、成本低廉等特点而得到了广泛应用^[2-4],但该方法只是将目标污染物从水相转移到固体吸附剂的表面,并非真正意义上的分解去除,存在二次污染现象。近年来,光催化由于其良好的化学稳定性、优越的降解效果、无二次污染等优点被用来降解工业废水中的酚类化合物、染料以及表面活性剂等^[5]。其中,纳米TiO₂的禁带宽度在3.0~3.2 eV之间,能够被紫外光激发产生光生电子-空穴对,将水中污染物矿化为H₂O、CO₂等无毒无害物质,并具有尺寸小、比表面积大、活性高等优点,备受青睐。

吸附与光催化结合既能将污染物彻底降解,又可解决二次污染、吸附剂再生等问题,因此开发兼具吸附与光催化功能的复合材料是值得探索的方向。已有学者致力于构筑碳基吸附材料与常见光催化剂的复合材料,以期利用吸附-光催化的协同作用实现对水中污染物的彻底降解^[6-8]。碳基材料在反应过程中会被光催化剂氧化,导致结构变形、光催化剂脱落^[9],因此,寻找兼具抗氧化能力与高吸附容量的载体材料是实现吸附与光催化双功能的关键。层状双氢氧化物(LDH)是一种非碳基型负载材料,因具有较大的比表面积和较高的吸附容量,被证明是去除水中阴离子的有效吸附剂^[10]。同时,LDH本身具有半导体特性,能带带隙在2.0~3.4 eV之间^[11],是一种理想的TiO₂负载材料。目前,纳米TiO₂负载LDH的复合材料已被用于水氧化、CO₂还原等方面^[12-13],但将其用于阴离子表面活性剂的“吸附-光催化”协同去除还鲜有报道。基于此,笔者利用尿素水热法制备了TiO₂&LDH纳米复合材料,选用低压紫外灯作为光源,以确保TiO₂能够被高效、稳定地激发,系统研究该复合材料对SDBS的吸附-

光催化协同去除机制,以期为后续开发可见光型TiO₂&LDH复合材料,实现能耗优化奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试剂和仪器

试剂:硝酸镁、硝酸铝、十二烷基苯磺酸钠、钛酸四丁酯、氢氧化钠、尿素、无水乙醇、盐酸、冰醋酸、叔丁醇、对苯醌,均为分析纯。

试验仪器:PTX-FA120型电子天平;pH-10型pH计;UV-6000紫外可见分光光度计;聚四氟乙烯水热反应釜;MS-H-Pro+型恒温磁力搅拌器;Kq-50b型超声波清洗仪;LG-3535型低压紫外灯;SX2-12-10G箱式马福炉;101-00A电热鼓风干燥箱。

1.2 试验装置

试验装置的主体由500 mL圆筒形反应器与一个18 W低压紫外灯(365 nm)组成,紫外灯放置于密闭的石英套管内,管外冷凝水管接口与自来水龙头相连,使反应器温度保持恒定(见图1)。将装置通过支架固定在磁力搅拌器上,反应过程中进行持续搅拌。取样过程中,采用针孔式注射器经取样口精准抽取反应液,取样量控制在3~5 mL。

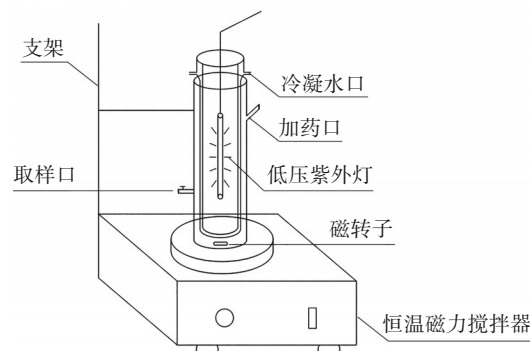


图1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of test device

1.3 材料制备方法

1.3.1 纳米TiO₂

采用溶胶凝胶法合成纳米TiO₂粉末。室温下,取10 mL钛酸四丁酯缓慢滴加至30 mL无水乙醇中,磁力搅拌30 min,得到溶液A;将20 mL乙醇、6 mL冰乙酸与2 mL蒸馏水混合,磁力搅拌30 min,制

得溶液B。将溶液B缓慢滴入溶液A中,磁力搅拌一定时间至形成均匀乳白色凝胶,阴凉条件下陈化2 h,随后放入电热干燥箱中100℃干燥6 h,研磨过筛,在马福炉中550℃煅烧2 h,得到纳米TiO₂粉末。

1.3.2 LDH

采用尿素水热法制备LDH。室温下,按照Mg²⁺与Al³⁺物质的量之比为2:1称取1.30 g Mg(NO₃)₂和0.95 g Al(NO₃)₃以及1.31 g 尿素,加入80 mL蒸馏水,磁力搅拌15 min形成均匀混合液,随后转移至水热反应釜内,在140℃烘箱中反应24 h。待反应完成后,冷却至室温,用蒸馏水洗涤数次并干燥,得到LDH粉末。

1.3.3 纳米TiO₂&LDH

称取0.15 g TiO₂粉末加入到40 mL蒸馏水中,超声分散20 min,记作溶液1;按照上述LDH制备中药品投加量称取药品溶于40 mL蒸馏水中并混合均匀,记作溶液2。将溶液1与溶液2等体积混合均匀,磁力搅拌30 min。随后,将所得混合液转移至水热反应釜,140℃烘箱中反应24 h。待反应完成并冷却至室温后,取出混合物以2 000 r/min离心分离,用蒸馏水洗涤数次并干燥,获得纳米TiO₂&LDH粉末(TiO₂与LDH的质量比为1:4)。

1.4 试验方法

1.4.1 暗吸附试验

试验开始前,用铝箔纸包裹住反应器,营造黑暗试验环境,以消除外界光线对试验产生的干扰,使试验结果更加准确。试验条件:转速为400 r/min、反应温度为25℃、pH为7、催化剂投加量为400 mg/L、SDBS初始浓度为100 mg/L,分别在不同时间节点用针孔注射器取样3~5 mL,经0.22 μm水系微孔膜过滤,采用紫外分光光度计于波长为223 nm处测定样品中的SDBS浓度。

1.4.2 吸附动力学试验

为研究不同时间对SDBS吸附过程的影响,在暗环境下,保持催化剂投加量为400 mg/L, SDBS初始浓度为100 mg/L,温度为25℃,转速为400 r/min,反应时间为5、10、15、20、30、40、60、80、100、120 min时分别测定SDBS浓度。采用准一级、准二级以及颗粒内扩散模型^[14]对数据进行动力学拟合。

1.4.3 等温吸附试验

Langmuir模型适于模拟材料对污染物的单分子层吸附, Freundlich模型则模拟材料对污染物的多

分子层吸附^[15-16]。为研究不同温度对SDBS吸附过程的影响,在保持暗环境条件下,投加400 mg/L催化剂至不同浓度(50~150 mg/L)的SDBS溶液中,保持转速为400 r/min、pH为5,在25、35、45℃下分别反应2 h,达到吸附平衡后,测定SDBS去除效果,采用Langmuir与Freundlich等温吸附方程进行拟合。

1.4.4 光催化试验

保持pH为5、温度为25℃、SDBS浓度为100 mg/L,以及纳米TiO₂、LDH和纳米TiO₂&LDH的投加量均为400 mg/L,暗吸附30 min后打开紫外灯,在反应进程中按时间节点分阶段取样、过滤,测定溶液中剩余SDBS浓度。

1.4.5 自由基捕获试验

将400 mg/L纳米TiO₂&LDH分别与10 mmol/L叔丁醇和1 mmol/L对苯醌加入到SDBS溶液中,其他操作与光催化最佳试验条件保持一致。

2 结果与讨论

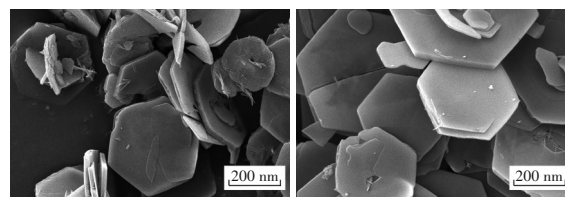
2.1 催化剂表征

2.1.1 X射线衍射(XRD)分析

纳米TiO₂、纳米TiO₂&LDH材料的XRD分析显示,纳米TiO₂&LDH在2θ为25.41°、38.72°、48.07°、54.30°、55.42°、62.78°和75.31°处(标准卡PDF: 73-1764)分别对应于锐钛矿TiO₂的(101)、(004)、(200)、(105)、(211)、(204)和(215)晶面,由此可以说明TiO₂与基底材料LDH复合成功。

2.1.2 SEM分析

图2为LDH和纳米TiO₂&LDH的SEM照片。



a. LDH

b. 纳米TiO₂&LDH

图2 LDH和纳米TiO₂&LDH的扫描电镜照片

Fig.2 SEM photographs of LDH and nano-TiO₂&LDH

由图2可以看出,两者均呈现出六边形片状结构,且片层间相互交叉堆叠。LDH表面粗糙,而纳米TiO₂&LDH表面光滑,仅在部分LDH片状结构表面观察到少量裸露的纳米TiO₂小颗粒,绝大多数纳米TiO₂颗粒在LDH表面未被观察到,表明其可能嵌入在层状结构中。加入纳米TiO₂后,LDH的形貌基

本保持不变,说明纳米TiO₂的加入对LDH层状结构没有明显影响。

2.2 纳米TiO₂&LDH暗吸附处理SDBS

2.2.1 纳米TiO₂&LDH的吸附能力分析

在pH为7、SDBS初始浓度为100 mg/L、催化剂投加量均为400 mg/L的条件下进行吸附试验,分析LDH、纳米TiO₂、纳米TiO₂&LDH对SDBS的去除效果,结果如图3所示。可以看出,所有材料在0~30 min内对SDBS的吸附速率较快,30 min后吸附速率均逐渐趋于平衡。前30 min,单独纳米TiO₂对SDBS的吸附去除率仅有19.54%,吸附量为50.00 mg/g;LDH对SDBS的吸附去除率可达到31.94%,吸附量为88.88 mg/g;负载纳米TiO₂后,吸附能力有所提升,30 min内对SDBS的吸附去除率可达到42.81%,吸附量提升至108.33 mg/g。这主要是由于纳米TiO₂的负载诱导复合材料产生微孔隙,LDH层间暴露出更多吸附活性位点,进而提高了吸附效能^[17]。

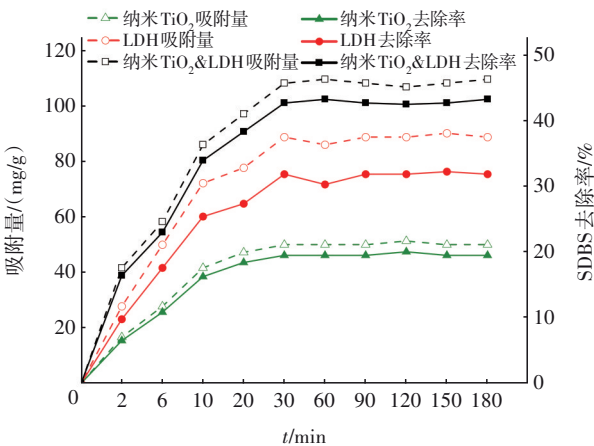


图3 不同类型材料对SDBS吸附去除效果

Fig.3 SDBS adsorption removal by different types of materials

2.2.2 纳米TiO₂&LDH的吸附动力学分析

在pH=5、SDBS初始浓度为100 mg/L、反应温度为25℃、催化剂投加量均为400 mg/L的条件下,采用准一级与准二级动力学模型分别模拟LDH与纳米TiO₂&LDH对SDBS的吸附过程,相关动力学参数如表1所示。两种材料在前30 min内均表现出对SDBS的快速吸附,这主要是由于在吸附初始阶段,材料表面存在大量吸附位点,能够快速捕捉吸附SDBS分子;随着吸附时间延长至大于30 min,材料表面的吸附位点逐渐被SDBS占据,导致吸附位点数量降低,SDBS扩散至材料吸附位点的时间增加;

随着吸附位点被SDBS完全占据,两种材料对污染物的吸附达到平衡。由表1可知,相较于准一级动力学模型,准二级动力模型能够更好地描述LDH与纳米TiO₂&LDH对SDBS的吸附过程,这与Suh等人^[18]采用TiO₂&LDH吸附甲基橙和2,4-二氯苯氧乙酸的研究结果一致。同时,较低的SSE(误差平方和)和APE(平均百分比误差)以及 χ^2 值也进一步验证了模型拟合结果的有效性,吸附过程中化学吸附为主要控速步骤^[19]。

表1 吸附动力学相关参数

Tab.1 Related parameters of adsorption kinetics

项目	准一级动力学			准二级动力学		
	$q_e / (\text{mg/g})$	k_1 / min^{-1}	R^2	$q_e / (\text{mg/g})$	k_2 / min^{-1}	R^2
纳米TiO ₂ &LDH	134.2	0.132	0.949	146.0	0.001 3	0.993
LDH	101.9	0.124	0.956	111.4	0.001 6	0.988

保持上述试验条件不变,利用颗粒内扩散模型对吸附数据进行拟合,以揭示污染物在纳米TiO₂&LDH中的扩散机制。拟合曲线见图4。

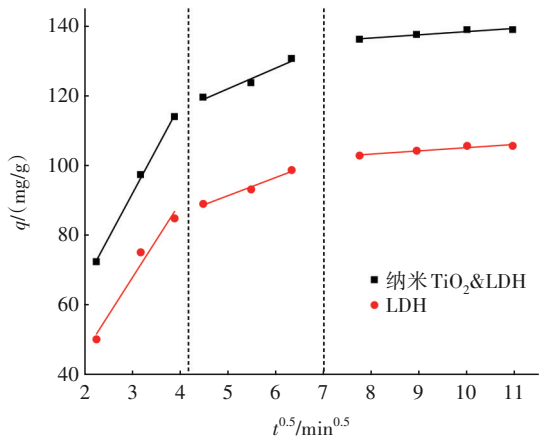


图4 颗粒内扩散模型

Fig.4 Intra-particle diffusion model

纳米TiO₂&LDH对SDBS的吸附过程可分为三个阶段,扩散速率大小为 $k_{1d} > k_{2d} > k_{3d}$ (见表2)。第一阶段为吸附的初始阶段,属于快速扩散阶段,大量污染物分子吸附在吸附剂的外表面。随着外表面吸附位点达到饱和,污染物分子开始扩散进入吸附剂的孔隙中,进入吸附的第二阶段,由于可能存在孔隙堵塞,吸附速率显著降低。随着扩散的继续进行,污染物分子浓度迅速减小且吸附剂内表面活性位点的吸附逐渐趋于平衡,导致吸附速率迅速减小,扩散进入第三阶段,即吸附平衡阶段。吸附过

程被拟合为三个阶段,每个阶段的线性相关系数均在 0.9 以上,说明各阶段拟合良好。拟合直线均未通过坐标原点,说明内扩散并不是唯一的速率控制因素,同时还存在外扩散和边界扩散等影响^[20-21]。

表2 颗粒内扩散模型相关参数
Tab.2 Related parameters of intra-particle diffusion model

项目	过程1			过程2			过程3		
	$k_{1d}/[mg/(g \cdot min^{0.5})]$	$C_{1d}/(mg/g)$	R^2	$k_{2d}/[mg/(g \cdot min^{0.5})]$	$C_{2d}/(mg/g)$	R^2	$k_{3d}/[mg/(g \cdot min^{0.5})]$	$C_{3d}/(mg/g)$	R^2
LDH	21.500	3.457	0.970	4.686	67.466	0.983	0.923	95.821	0.917
纳米 TiO ₂ &LDH	25.525	15.558	0.998	5.690	92.973	0.964	0.920	129.180	0.917

2.2.3 纳米 TiO₂&LDH 的吸附等温线分析

在 pH=5、SDBS 初始浓度为 100 mg/L、催化剂投量为 400 mg/L 条件下,采用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附方程对吸附等温线进行拟合,结果如表 3 所示。在 25、35、45 ℃温度条件下,纳米 TiO₂&LDH 和 LDH 吸附 SDBS 的等温线拟合效果均是 Langmuir 好于 Freundlich,说明负载前后的材料对 SDBS 分子的吸附均属于单分子层吸附^[22]。这一吸附特征与

SDBS 在 PA 微塑料^[23]、Q235 碳钢^[24]等其他均质吸附材料异相界面上的吸附结果一致,表明 SDBS 分子倾向于通过磺酸基团与吸附剂表面的活性位点形成单层定向排列。此外,Langmuir 模型中的 K_L 值与 Freundlich 模型中的 $1/n$ 值均在 0~1 之间,说明纳米 TiO₂&LDH 和 LDH 对 SDBS 的吸附属于优惠吸附过程^[25]。同时,在不同温度下,LDH 和纳米 TiO₂&LDH 均能够保持对 SDBS 分子良好的吸附效果。

表3 吸附等温线模型相关参数
Tab.3 Related parameters of adsorption isotherm models

项目	温度/ ℃	Langmuir			Freundlich		
		$q_m/(mg/g)$	$K_L/(L/mg)$	R^2	$K_F/(mg/g)$	$1/n$	R^2
纳米 TiO ₂ &LDH	25	149.52	0.240	0.988	81.99	0.130	0.904
	35	151.39	0.351	0.975	91.99	0.112	0.923
	45	157.75	0.541	0.985	103.27	0.099	0.950
LDH	25	133.19	0.076	0.930	43.29	0.222	0.846
	35	138.07	0.094	0.926	50.87	0.200	0.834
	45	143.81	0.123	0.925	60.97	0.176	0.832

2.3 纳米 TiO₂&LDH 吸附-光催化降解 SDBS

2.3.1 纳米 TiO₂&LDH 光催化及动力学分析

在 pH=5、SDBS 初始浓度为 100 mg/L、反应温度为 25 ℃、催化剂投加量均为 400 mg/L 条件下,考察了纳米 TiO₂&LDH、纳米 TiO₂ 和 LDH 的光催化降解效果,结果见图 5。光照 4 h 后,相比纳米 TiO₂ 与 LDH,纳米 TiO₂&LDH 对 SDBS 的去除率能够达到 95.50%,具有较高的光催化活性。SDBS 去除率提升了 44.46%,其纯吸附去除率与光催化去除率之比约为 1.15:1。光催化反应过程的准一级动力学模型拟合结果显示,三种材料的相关系数均在 0.9 以上,纳米 TiO₂&LDH 的反应速率常数(0.009 7 min⁻¹)远高于纳米 TiO₂(0.002 1 min⁻¹)和 LDH(0.001 2 min⁻¹),纳米 TiO₂&LDH 的光催化反应速率大大提升,说明通过复合显著提高了其对 SDBS 的

光催化降解效率。可见,纳米 TiO₂&LDH 是一种兼具良好吸附与光催化活性的复合材料。

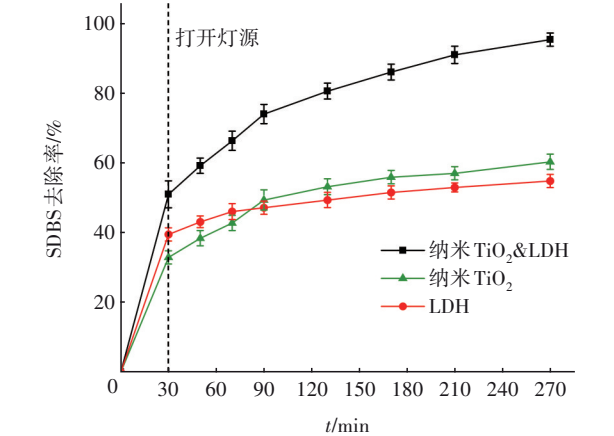


图5 最佳吸附条件下各材料的光催化性能
Fig.5 Photocatalytic performance of various materials under optimal conditions

2.3.2 光催化降解SDBS机理

为探究光降解过程中发挥作用的主要活性物质,在pH=5、SDBS初始浓度为100 mg/L、反应温度为25℃、纳米TiO₂&LDH投加量为400 mg/L的条件下,分别投加10 mmol/L叔丁醇和1 mmol/L对苯醌进行自由基捕获试验,结果如图6所示。投加不同捕获剂的两组SDBS去除率均出现一定程度的下降,投加对苯醌试验组的SDBS去除率为90.56%,反应速率常数为0.007 1 min⁻¹,下降程度较低,说明·O₂⁻对光催化过程的影响较小;而投加叔丁醇试验组的SDBS去除率降低至60.92%,反应速率常数为0.001 4 min⁻¹,说明羟基自由基(·OH)在光催化过程中发挥了重要作用^[26]。

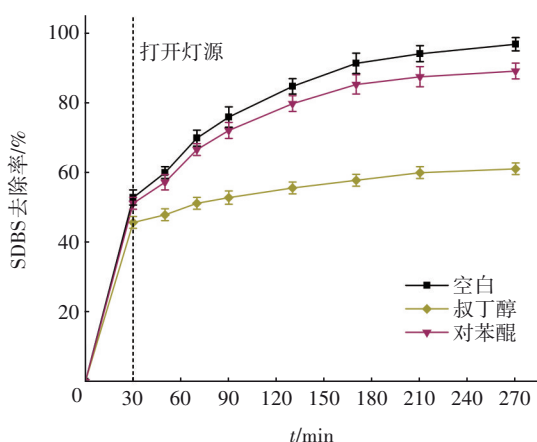


图6 不同抑制剂对纳米TiO₂&LDH去除SDBS的影响

Fig.6 Effect of different inhibitors on removal of SDBS by nano-TiO₂&LDH

暗反应过程中SDBS被吸附在纳米TiO₂&LDH表面,光照射下,TiO₂被激发并分别在价带(VB)和导带(CB)位置产生空穴(h⁺)和电子(e⁻)^[27]。CB位置的e⁻可以与溶解的O₂反应生成·O₂⁻,同时VB位置的h⁺和表面吸附的H₂O反应生成·OH。由于LDH的强抗氧化能力^[28],这些活性物种可以在不破坏LDH结构的条件下将吸附在LDH上的SDBS分子矿化为CO₂和H₂O等,同时实现LDH上吸附位点的再生。

2.3.3 循环稳定性试验

在相同条件下开展纳米TiO₂&LDH复合材料的循环稳定性试验。将每次吸附-光催化后的纳米TiO₂&LDH复合材料进行清洗、过滤,干燥后再次进行吸附-光催化试验。在4次循环试验中,SDBS去除率分别为92.03%、89.90%、86.42%、84.52%。SDBS去除率随着循环次数的增加而逐步下降,这可

能是由于回收过程中催化剂部分损耗以及长期光照条件下部分活性位点失活,但4次循环后SDBS去除率仍能保持在84%以上,表明纳米TiO₂&LDH复合材料具有良好的循环稳定性。

3 结论

① 纳米TiO₂&LDH在30 min的暗反应阶段对SDBS的单独吸附去除率可以达到42.81%,纳米TiO₂&LDH对SDBS的吸附符合准二级动力学模型,且Langmuir吸附等温线模型的拟合度较高,说明纳米TiO₂&LDH对SDBS的吸附是属于得失电子的化学单层吸附。

② 光催化反应240 min后,纳米TiO₂&LDH对SDBS的去除率可达95.50%,明显高于纳米TiO₂和LDH,光催化降解过程符合准一级动力学模型,且·OH是降解过程中发挥主要作用的活性物质。4次循环后,纳米TiO₂&LDH对SDBS的去除率能够保持在84%以上,表明其具有良好的循环稳定性。

参考文献:

- [1] 罗莎杰,曹秀君,李东梅,等. 水中十二烷基苯磺酸钠的降解方法[J]. 化学与生物工程, 2019, 36(1): 15-20, 30.
- LUO S J, CAO X J, LI D M, et al. Degradation methods of sodium dodecyl benzene sulfonate in water [J]. Chemistry & Bioengineering, 2019, 36(1): 15-20, 30 (in Chinese).
- [2] WANG X H, DENG R J, WANG C, et al. Removal of Sb(V) from complex wastewater of Sb(V) and aniline aerofloat using Fe₃O₄-CeO₂ absorbent enhanced by H₂O₂: efficiency and mechanism [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 365: 121610.
- [3] HAO L, LI L, YU S, et al. Humic acid-coated hydrated ferric oxides-polymer nanocomposites for heavy metal removal in water[J]. Science of the Total Environment, 2022, 834: 155427.
- [4] WANG Q Y, LI L P, KONG L C, et al. Compressible amino-modified carboxymethyl chitosan aerogel for efficient Cu(II) adsorption from wastewater [J]. Separation and Purification Technology, 2022, 293: 121146.
- [5] 李大军,贺惠,李芳芳. CeO₂/TiO₂-Ag₃PO₄复合催化剂去除废水中LAS的性能研究[J]. 化工新型材料, 2022, 50(12): 242-247, 254.
- LI D J, HE H, LI F F. Study on the performance of

- CeO₂/TiO₂-Ag₃PO₄ composite catalyst to remove LAS in wastewater[J]. *New Chemical Materials*, 2022, 50(12): 242-247, 254 (in Chinese).
- [6] BUKHARI S N, SHAH A A, LIU W, et al. Activated carbon based TiO₂ nanocomposites (TiO₂@AC) used simultaneous adsorption and photocatalytic oxidation for the efficient removal of rhodamine-B (RhB) [J]. *Ceramics International*, 2024, 50(21): 41285-41298.
- [7] BOUNMAD S, CANO-CASANOVA L, ROMAN-MARTINEZ M C, et al. Removal of malachite green from water: comparison of adsorption in a residue-derived AC versus photocatalytic oxidation with TiO₂ and study of the adsorption-photocatalysis synergy [J]. *Environmental Research*, 2024, 250: 118510.
- [8] ZHU J, ZHU Y, CHEN Z, et al. Fluorine-doped TiO₂/SiO₂/activated carbon ternary hybrids: enhancing adsorption and photocatalytic degradation of rhodamine B and methyl orange [J]. *Materials Research Bulletin*, 2024, 176: 112826.
- [9] ZHANG C, VALSARAJ K T, CONSTANT W D, et al. Aerobic biodegradation kinetics of four anionic and nonionic surfactants at sub- and supra-critical micelle concentrations (CMCs) [J]. *Water Research*, 1999, 33(1): 115-124.
- [10] DAI X, JING C, LI K, et al. Enhanced bifunctional adsorption of anionic and cationic pollutants by MgAl LDH nanosheets modified montmorillonite via acid-salt activation [J]. *Applied Clay Science*, 2023, 233: 106815.
- [11] 李海金, 韩秋彤, 贾虎, 等. LDHs材料的制备及光催化应用研究进展[J]. *中国材料进展*, 2019, 38(2): 91-97, 105.
- LI H J, HAN Q T, JIA H, et al. Research progress on synthesis of layered double hydroxides (LDHs) and their applications in photocatalysis [J]. *Materials China*, 2019, 38(2): 91-97, 105 (in Chinese).
- [12] LEE D E, DEYTHADE V, ABRAHAM B M, et al. An S-scheme heterointerface-engineered high-performance ternary NiAl-LDH@TiO₂/Ti₃C₂ MXene photocatalytic system for solar-powered CO₂ reduction to produce energy-rich fuels [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 480: 148227.
- [13] GUO J, MAO C, ZHANG R, et al. Reduced titania@layered double hydroxide hybrid photoanodes for enhanced photoelectrochemical water oxidation [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(22): 11016-11025.
- [14] 陈国壮, 查雨心, 郭雅婧, 等. Z型g-C₃N₄/Bi₂WO₆吸附-光催化降解左氧氟沙星: 动力学、机制与降解路径[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(8): 24-36.
- CHEN G Z, ZHA Y X, GUO Y J, et al. Z-scheme g-C₃N₄/Bi₂WO₆ adsorption-photocatalytic degradation levofloxacin: kinetics, mechanisms and degradation pathways [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(8): 24-36 (in Chinese).
- [15] 杨佳毅, 孙淑敏, 李佳骏, 等. 二氧化钛/石墨氮化碳复合材料对棒曲霉素的吸附与光催化降解作用研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(20): 260-268.
- YANG J Y, SUN S M, LI J J, et al. Adsorption and photocatalytic degradation of patulin by titanium dioxide/graphite carbon nitride composites [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2023, 14(20): 260-268 (in Chinese).
- [16] 袁雅姝, 来庆宇, 包顺宇, 等. 沸石分子筛对水中NH₄⁺-N的去除效果及再生研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2023, 39(5): 947-954.
- YUAN Y S, LAI Q Y, BAO S Y, et al. Performance and regeneration of zeolite molecular sieve for removal of NH₄⁺-N in water [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2023, 39(5): 947-954 (in Chinese).
- [17] 胡京宇, 姚戎, 潘玉航, 等. 可光助再生二氧化钛/层状双氢氧化物去除水体中有机染料[J]. *化工学报*, 2020, 71(7): 3296-3303.
- HU J Y, YAO R, PAN Y H, et al. Photo-assisted regeneration of titanium dioxide/layered double hydroxide for removal of organic dyes in water [J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(7): 3296-3303 (in Chinese).
- [18] SUH M J, SHEN Y, CHAN C K, et al. Titanium dioxide-layered double hydroxide composite material for adsorption-photocatalysis of water pollutants [J]. *Langmuir*, 2019, 35(26): 8699-8708.
- [19] 白华清, 魏业香, 曾正仁, 等. FeCl₃改性污泥水热炭的制备及对水中钼的吸附[J]. *中国给水排水*, 2025, 41(9): 81-87.
- BAI H Q, WEI Y X, ZENG Z R, et al. Preparation of FeCl₃ modified sludge hydrothermal carbon and its adsorption of vanadium in water [J]. *China Water & Wastewater*, 2025, 41(9): 81-87 (in Chinese).
- [20] 盛梦霜, 余梅, 尚静, 等. 三维氧化石墨烯气凝胶高效吸附与可见光光催化去除六价铬[J]. *科学通报*,

- 2022,67(4/5): 447-458.
- SHENG M S, YU M, SHANG J, et al. High efficient adsorption and photocatalytic removal of hexavalent chromium over three-dimensional graphene oxide aerogel under visible light [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(4/5): 447-458 (in Chinese).
- [21] 杨晶,孟晓庆,张福帅. 耐镉菌株对鳉尾吸附水中Cd²⁺的影响[J]. 中国给水排水,2021,37(15): 57-62.
- YANG J, MENG X Q, ZHANG F S. Effect of cadmium resistant strains on cadmium ion adsorption in water by iris [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(15): 57-62 (in Chinese).
- [22] 华露露,黄显怀,钱婧,等. 铁改性生物炭对水体中硝态氮的吸附特性[J]. 中国给水排水,2022,38(19): 61-68.
- HUA L L, HUANG X H, QIAN J, et al. Characteristics of iron modified biochar for nitrate nitrogen adsorption in water [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(19): 61-68 (in Chinese).
- [23] 陈金奎,章雨晨,陈雅婷,等. 聚酰胺微塑料对十二烷基苯磺酸钠的吸附[J]. 化工环保, 2024, 44(1): 60-67.
- CHEN J L, ZHANG Y C, CHEN Y T, et al. Adsorption of sodium dodecyl benzene sulfonate on polyamide microplastics [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2024, 44(1): 60-67 (in Chinese).
- [24] 唐荣茂,刘光明,师超,等. 十二烷基苯磺酸钠在模拟混凝土孔隙液中对Q235钢缓蚀及吸附行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报,2021,41(6): 857-863.
- TANG R M, LIU G M, SHI C, et al. Inhibition and adsorption behavior of sodium dodecylbenzene sulfonate on Q235 steel in simulated concrete pore fluid [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(6): 857-863 (in Chinese).
- [25] 杜晶宇,吴心怡,李瑾,等. 壳聚糖/磁性生物炭复合物的制备及其对环丙沙星的吸附性能[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2024, 54(6): 121-132.
- DU J Y, WU X Y, LI J, et al. Preparation of chitosan/magnetic biochar composites and its adsorption properties of ciprofloxacin [J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science), 2024, 54(6): 121-132 (in Chinese).
- [26] 邹建勇,林晨,孟玉,等. 声光催化膜反应器构建及其对环丙沙星的去除效能[J]. 中国给水排水,2025,41(3): 1-6.
- ZOU J Y, LIN C, MENG Y, et al. Construction of sono-photocatalytic membrane reactor and its removal efficiency for ciprofloxacin [J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(3): 1-6 (in Chinese).
- [27] 殷榕灿,崔玉民,苗慧,等. TiO₂光催化降解有机染料反应机理[J]. 水处理技术,2020, 46(3): 11-15.
- YIN R C, CUI Y M, MIAO H, et al. Reaction mechanisms of photocatalytic degradation of organic dyes with TiO₂ [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(3): 11-15 (in Chinese).
- [28] WANG B, YANG X, FANG Y, et al. Amorphization activates biocompatible MgAl-layered double hydroxide for efficient multiple free radical scavenging [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(45): 2404828.
- 作者简介:张立成(1972—),男,辽宁锦州人,博士,教授,主要研究方向为污水处理技术。
- E-mail: zlcicheng@sina.com
- 收稿日期:2025-10-08
- 修回日期:2025-10-29

(编辑:李德强)

强化依法治水,携手共护母亲河