

引用:何祝平,王宇环,尚天琪,等. $\text{MgFe}_2\text{O}_4\text{-LaFeO}_3$ 光催化剂活化过硫酸盐高效降解甲基橙研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025, 38(5): 747-755.

Citation:HE Zhuping, WANG Yuhuan, SHANG Tianqi, WANG Zhao, LI Huiyuan, GAO Wenwen. $\text{MgFe}_2\text{O}_4\text{-LaFeO}_3$ photocatalyst activating persulfate for the efficient degradation of methyl orange[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(5): 747-755.

文章编号 1672-6634(2025)05-0747-09

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025010002

$\text{MgFe}_2\text{O}_4\text{-LaFeO}_3$ 光催化剂活化过硫酸盐 高效降解甲基橙研究

何祝平¹,王宇环¹,尚天琪¹,王昭¹,李慧元¹,高雯雯^{1,2}

(1. 榆林学院 化学与化工学院,陕西 榆林 719000;2. 榆林学院 煤制半焦衍生液
高值利用陕西省高校工程研究中心,陕西 榆林 719000)

摘要 采用一步溶胶-凝胶法制备不同 La 含量的 $\text{MgFe}_2\text{O}_4\text{-LaFeO}_3$ (MFO-LFO) 光催化剂,采用 X 射线衍射图谱、扫描电子显微镜、透射电子显微镜、X 射线光电子能谱和紫外-可见漫反射光谱等手段进行表征,对比不同 MFO-LFO 光催化剂活化过二硫酸盐(PDS)降解甲基橙(MO)的性能,其中 MFO-5LFO 对甲基橙的降解率最高,为 90.3%。捕获实验表明单线态氧、超氧自由基和空穴是 MFO-5LFO 光助活化 PDS 降解 MO 过程中的主要活性物质。另外,MFO-5LFO 具有优良的重复使用性。最后,提出了 Z 型异质结 MFO-5LFO 光催化剂活化过硫酸盐降解 MO 机理。

关键词 铁酸镁;铁酸镧;Z 型异质结;光催化;过硫酸盐

中图分类号 X703;O644.1;O643.36 **文献标志码** A **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**



$\text{MgFe}_2\text{O}_4\text{-LaFeO}_3$ photocatalyst activating persulfate for the efficient degradation of methyl orange

HE Zhuping¹, WANG Yuhuan¹, SHANG Tianqi¹, WANG Zhao¹,
LI Huiyuan¹, GAO Wenwen^{1,2}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Yulin University, Yulin 719000, China;
2. Value-Added Utilization of Carbocoal Derivative Liquid-Shaanxi University Engineering
Research Center, Yulin University, Yulin 71900, China)

Abstract $\text{MgFe}_2\text{O}_4\text{-LaFeO}_3$ (MFO-LFO) photocatalysts with varying La content were synthesized using a one-step sol-gel method and characterized by X-ray diffraction, scanning electron microscope, transmission electron microscope, X-ray photoelectron spectroscopy and ultraviolet-visible diffuse reflectance spectroscopy. The performance of different MFO-LFO photocatalysts in activating persulfate (PDS) for the degradation of methyl orange (MO) was compared, with MFO-5LFO showing the highest degradation rate of

收稿日期:2025-01-05

基金项目:国家自然科学基金项目(52062047);陕西省教育厅重点科学研究计划项目(24JR173);榆林市科技局项目(2023-CXY-154);榆林学院研究生创新基金项目(2024YLYCX24)资助

通信作者:高雯雯,女,汉族,博士,教授,研究方向:无机复合材料和水资源化利用,E-mail:wenwengao2008@163.com。

90.3%。Trapping experiments indicated that singlet oxygen, superoxide radicals and holes are the main active species in the MFO-5LFO-assisted activation of PDS for MO degradation. Additionally, MFO-5LFO demonstrated excellent reusability. Finally, the mechanism of Z-scheme MFO-5LFO photocatalyst activating PDS to degrade MO was proposed.

Keywords magnesium ferrite; lanthanum ferrite; Z-type heterojunction; photocatalysis; persulfate

0 引言

随着现代工业发展,染料废水排放对生态环境和人类健康构成了严重威胁,因此染料废水处理成为研究热点。染料废水来源广泛,如纺织印染、皮革加工和造纸等行业。由于成分复杂,极大地增加了处理难度,其危害包括影响水体环境、毒害水生生物,甚至危及人类健康^[1]。目前处理方法有吸附法、膜分离技术、化学氧化法、混凝沉淀法和生物法等^[2]。

光助活化过硫酸盐(PS)技术作为新兴高级氧化技术,具有氧化能力强、环境友好和能耗低等优点,其原理是在光照射下,PS产生具有强氧化活性的羟基自由基($\cdot\text{OH}$)和硫酸根自由基($\text{SO}_4^-\cdot$),可高效分解有机污染物^[3-4]。近年来,紫外光和可见光催化PS活化技术在水处理领域得到了广泛应用,特别是在难降解有机污染物的去除方面展现出显著优势。光辐照能够使PS的O—O键断裂,达到直接活化PS的目的。此外,光辐照还能激发非均相光催化剂产生光生电子-空穴对,进而间接活化过硫酸盐。研究表明,与暗态条件下的PS活化相比,可见光催化活化过程不仅显著提升了难降解污染物的去除效率,还大幅提高了污染物的矿化率。这一特性使得该技术在环境治理领域具有重要的应用价值^[5]。在光助活化PS技术中常用的催化剂主要有金属基、碳基及复合型光催化材料,开发具有可见光响应、高催化活性和可重复利用的催化剂是当前研究的热点^[6]。

尖晶石铁酸镁(MFO)为典型的反尖晶石型结构,因其独特的结构和优异的物理化学性质,使其在环境治理、催化和磁性材料等领域有着广泛的应用^[7-8]。然而,MFO光催化剂存在一些局限性,它主要吸收紫外光或可见光中的特定波段,对太阳光的利用率较低,光生载流子复合率较高,稳定性不足,催化活性相对较低。为改善这些问题,可将其与半导体材料进行复合制备Z型异质结。由于不同半导体费米能级的差异导致能带发生弯曲,进而在异质结界面处形成内建电场。在光照下,内建电场能够驱动光生电子-空穴对实现高效分离,使得电子从一种半导体转移到另一种半导体,拓宽其光吸收范围,促进光生载流子分离,提高其催化活性^[7-14]。铁酸镧(LaFeO_3 , LFO)是一种典型的钙钛矿结构稀土复合金属氧化物,具有较窄的带隙能(2.07 eV)和较强的可见光吸收能力^[15-16],MFO与LFO复合后,能够形成异质结结构,促进光生载流子的分离和转移,显著提高光催化效率^[17]。同时,该复合光催化剂还能够有效活化过硫酸盐,产生大量的活性自由基,进一步增强对盐酸四环素的降解能力^[18]。然而,鲜少有关于LFO-MFO异质结光催化材料降解甲基橙(MO)的报道。

因此,本文通过一步溶胶-凝胶法制备了LFO/MFO复合材料,以提高其可见光辅助活化过二硫酸盐(PDS)催化活性。LFO-5MFO复合材料中LFO和MFO成功构建了Z型异质结,二者间的紧密界面为MO的吸附和光子捕获提供了充足的空间,增强了其对MO的光助活化过硫酸盐催化降解性能。

1 实验

1.1 试剂

硝酸铁 $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}]$ 、硝酸镁 $[\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ 、硝酸镧 $[\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ 、氨水、MO、过硫酸钠(PS)、乙二胺四乙酸(EDTA)、叔丁醇(TBA)、柠檬酸、糠醇(FOL)、对苯醌(*p*-BQ)和甲醇(MEOH)购自国药集团化学试剂有限公司,且均为分析纯。

1.2 催化剂的制备

1.2.1 MFO光催化剂的制备。取4 mmol $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 和2 mmol $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 溶解于20 mL去离子水中,加入2.22 mmol柠檬酸,在常温下磁力搅拌30 min使之溶解。然后,将20 mL氨水加入到

混合物中,在 60 °C 下搅拌 3 h,溶胶转变成凝胶,在 100 °C 下干燥 12 h。最后,将干燥的凝胶研磨并在 500 °C 下煅烧 3 h,得到的样品记为 MFO。

1.2.2 MFO-LFO 复合光催化剂的制备。取 4 mmol Fe(NO₃)₃ · 9H₂O 溶解于 20 mL 去离子水中,另取总金属离子物质的量为 2 mmol 的 Mg(NO₃)₂ · 6H₂O 和 La(NO₃)₃ · 6H₂O 溶于上述溶液中,使 $n(\text{La}^{3+}):n(\text{Mg}^{2+})$ 分别为 2.5%、5%、10%、20% 和 30%,其它的实验步骤同 MFO 的制备,所得产物分别标记为 MFO-2.5LFO、MFO-5LFO、MFO-10LFO、MFO-20LFO、MFO-30LFO。

1.3 材料表征

晶体结构采用 X 射线衍射仪(XRD,D/Max-3c,日本岛津有限公司)测定;形貌采用配备能谱仪(EDS)的场发射扫描电子显微镜(SEM,Sigma 300,德国蔡司公司)和透射电子显微镜(TEM,Thermo Talos F200x, USA)进行观察;材料表面元素及价态采用 X 射线光电子能谱仪(XPS,美国赛默飞有限公司)测定;催化剂的紫外-可见漫反射光谱(UV-Vis DRS)及 MO 的浓度采用紫外-可见仪(UV2600,日本岛津有限公司)测定。

1.4 光催化活性实验

取 0.02 g MFO-LFO 样品加入 50 mL 10 mg/L 的 MO 溶液中,在黑暗中磁力搅拌 30 min,使其达到动态吸附-解吸平衡。加入 0.05 mmol/L PDS,同时打开氙灯(250 W)开始光催化反应。在不同时间,取 2 mL 反应液,经过滤后的上清液用紫外可见分光光度计测量 462 nm 处的吸光度,并计算 MO 浓度。在单因素实验中,仅改变溶液的 pH 或 PDS 添加量,其他步骤不变。

为了明确 MFO-LFO 光催化剂活化过硫酸盐降解 MO 过程中起主导作用的活性基团,向反应溶液中分别添加 1 mmol 相应的捕获剂 FOL、*p*-BQ、EDTA、TBA 和 MeOH,用于捕获¹O₂、·O₂⁻、h⁺、·OH 和 SO₄⁻·,其他步骤不变,开展光催化活性实验。

1.5 稳定性实验

为了考察 MFO-LFO 光催化剂的稳定性,通过将前次反应所得的催化剂收集,用无水乙醇和蒸馏水交替洗涤,在 60 °C 下真空干燥后,再次进行光催化活性实验,重复多次。

2 结果与讨论

2.1 催化剂的晶型分析

图 1 所示为纯 MFO、纯 LFO 以及不同 MFO-LFO 样品的 XRD 图谱。对于 MFO,在 30.1°、35.5°、43.1°、53.5°、57.1° 和 62.5° 处出现的特征衍射峰分别对应立方相 MFO(JCPDS NO. 17-0464)的(111)、(220)、(311)、(400)、(422)、(511)和(440)晶面^[15],说明制备了纯相的 MFO。随着 La 含量的增加,MFO-LFO 样品中 MFO 对应特征衍射峰强度逐渐降低,并且在 32.3°、38.7° 和 46.5° 处出现了新的特征衍射峰,分别对应 LFO(JCPDS NO. 37-1493)的(112)、(022)和(004)晶面^[16],且新衍射峰强度逐渐增强,没有出现其他杂峰,说明成功制备了 MFO-LFO 复合催化剂。

2.2 催化剂的形貌分析

如图 2(a)所示,纯 MFO 表面疏松且有明显孔隙和层片状结构。图 2(b~f)中,MFO-LFO 复合催化剂表面疏松,具有丰富的孔道和海绵状结构,这是由于凝胶燃烧过程释放气体引起的。随着 La 含量的增加,表面逐渐粗糙并均匀附着 LFO 颗粒。图 2(g)为 MFO-5LFO 的 TEM 图,MFO 为片状结构,其表面紧密附着 LFO 纳米颗粒,这有利

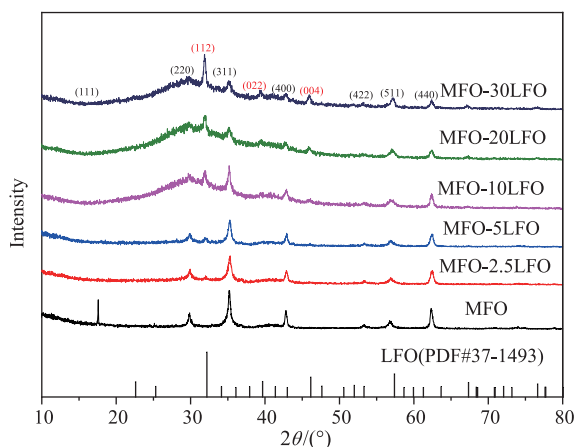
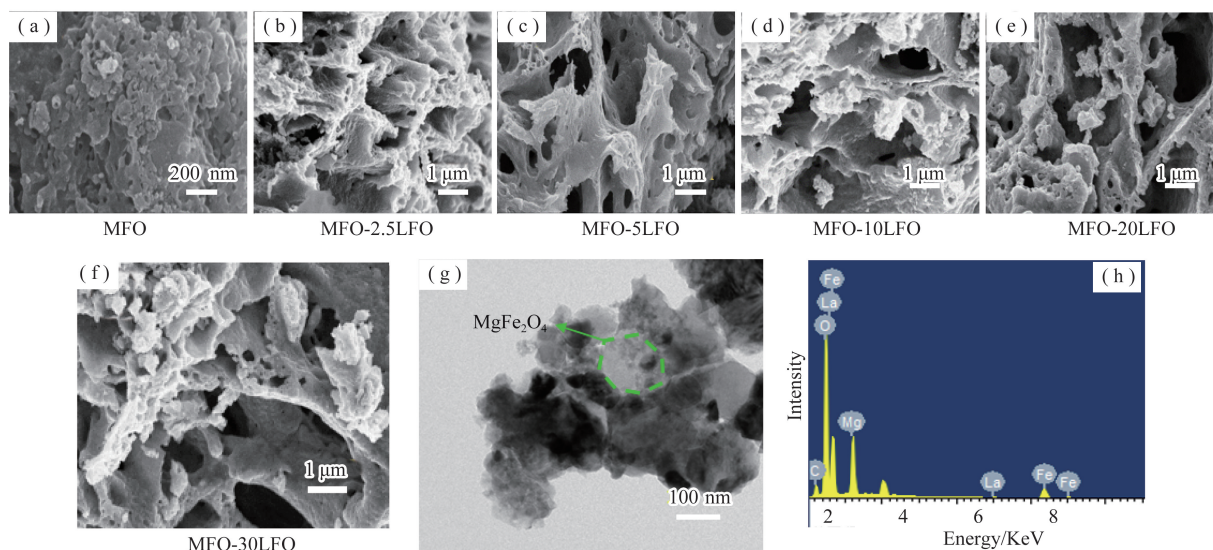


图 1 纯 MFO、纯 LFO 及不同 MFO-LFO 样品的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of pure MFO, pure LFO and different MFO-LFO samples

于电子的快速传递,能够抑制光生电子-空穴对的复合几率,从而提高 MFO-5LFO 复合材料的催化活性。由图 2(h)得,MFO-5LFO 中存在 Zn、Mg、La、Fe 和 O 等元素,进一步证实成功制备了 MFO-5LFO。



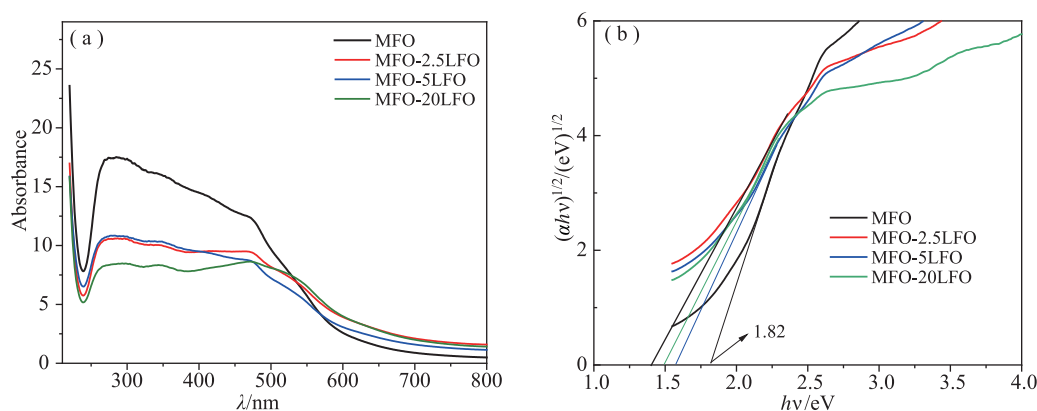
注:(a~f) 纯 MFO 及不同 MFO-LFO 样品 SEM 图;(g) MFO-5LFO 的 TEM 图和(h) EDS 图。

图 2 样品的 SEM 图、TEM 图和 EDS 图

Fig. 2 SEM images, TEM image and EDS pattern of samples

2.3 催化剂的光学性能分析

图 3 为纯 MFO 及不同 MFO-LFO 样品的 UV-vis DRS 光谱,MFO 在紫外光区(220~400 nm)具有良好的吸收,在可见光区也有一定的吸光能力。随着 La 含量的增加,MFO-LFO 对紫外光的吸收减弱,在可见光区的吸收带边发生红移,说明其禁带宽度降低。由 Kubelka-Munk 公式^[19]可得,MFO、MFO-2.5LFO、MFO-5LFO 和 MFO-20LFO 的禁带宽度 E_g 分别为 1.82、1.42、1.58、1.49 eV。较低的禁带宽度意味着激发材料所需光的能量较小,同时也将伴随着更大的光生电子-空穴对复合的几率;禁带宽度较大的半导体,对可见光的利用率较小,因此合适的禁带宽度直接决定了材料的光催化活性。



注:(a) UV-vis DRS 光谱;(b) $(\alpha h\nu)^{1/2}$ 与 $h\nu$ 的关系曲线。

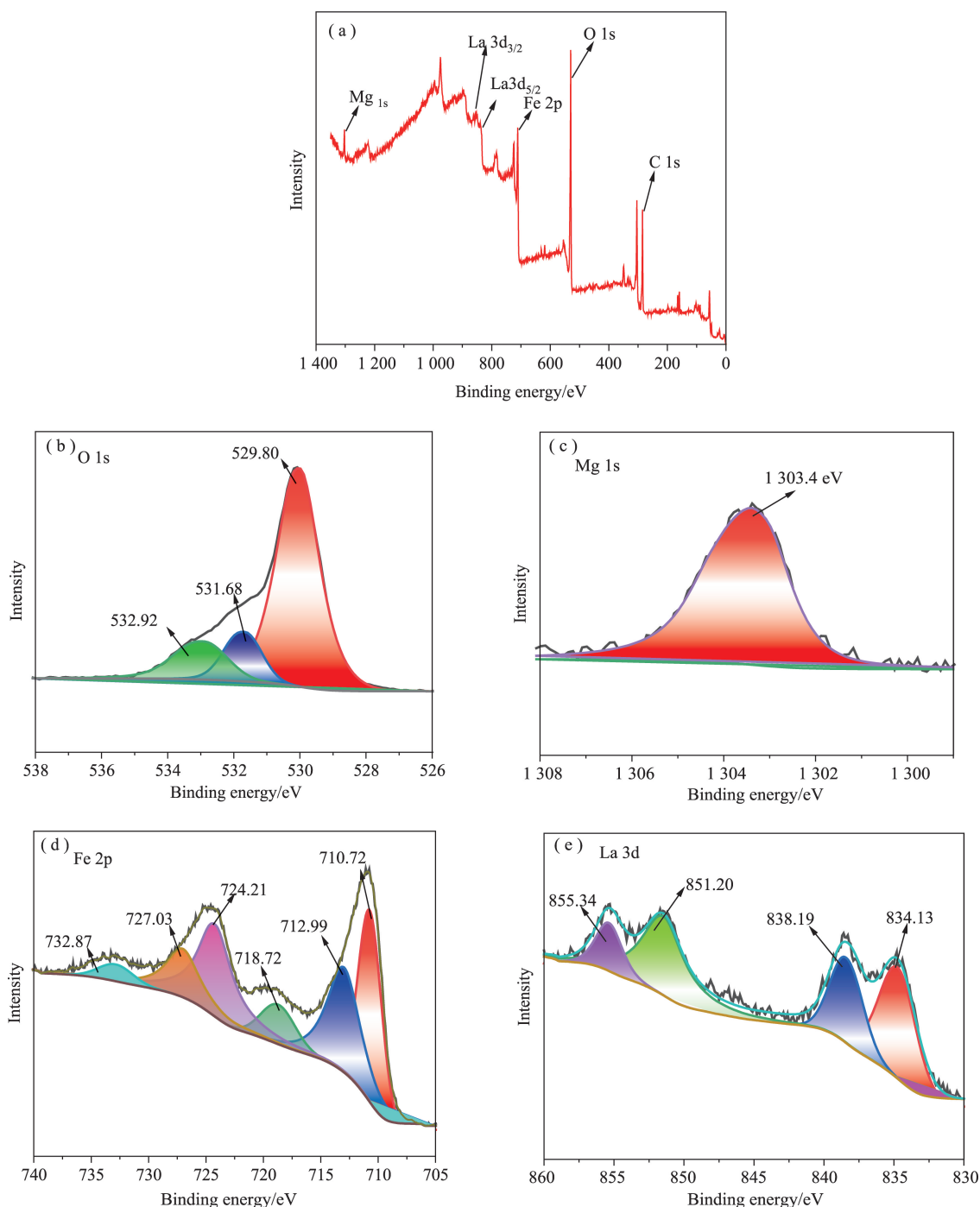
图 3 纯 MFO 及不同 MFO-LFO 样品的 UV-vis DRS 光谱与对应的 $(\alpha h\nu)^{1/2}$ 与 $h\nu$ 的关系曲线

Fig. 3 UV-vis DRS spectra of pure MFO and different MFO-LFO samples and their corresponding $(\alpha h\nu)^{1/2}$ and $h\nu$ relationship curves

2.4 催化剂的表面元素及价态分析

图 4(a)为 MFO-5LFO 的 XPS 总谱图,MFO-5LFO 复合材料是由 O、Fe、La 和 Mg 元素组成,与 XRD 和 EDS 图谱结果一致。通过对 O 1s 的精细谱分析[图 4(b)],529.80、531.68 和 532.92 eV 处的特征峰分别对应晶格氧、表面羟基(或吸附氧)和晶格氧(La—O 和 Fe—O)^[20-21]。图 4(c)中 Mg 1s 谱表明 MFO-

5LFO 复合材料中 Mg 元素主要以 Mg²⁺ 的形式存在^[19]。对于 La 3d[图 4(d)], 出现明显的 La 3d_{3/2} 和 La 3d_{5/2} 峰, 说明 MFO-5LFO 中 La 元素以 La³⁺ 形式存在^[22]; 图 4(e) 中 Fe 2p 由 Fe 2p_{1/2}、Fe 2p_{3/2} 及两个卫星峰组成。Fe 2p_{3/2} 分为 710.72 和 712.99 eV 峰, Fe 2p_{1/2} 分为 724.21 和 727.03 eV 峰, 其中 710.72 和 724.21 eV 的峰对应 Fe²⁺, 712.99 和 727.03 eV 的峰对应 Fe³⁺^[23], 说明 MFO-5LFO 复合材料存在 Fe²⁺ 和 Fe³⁺。



注: (a) 全谱; (b) O 1s; (c) Mg 1s; (d) La 3d; (e) Fe 2p。

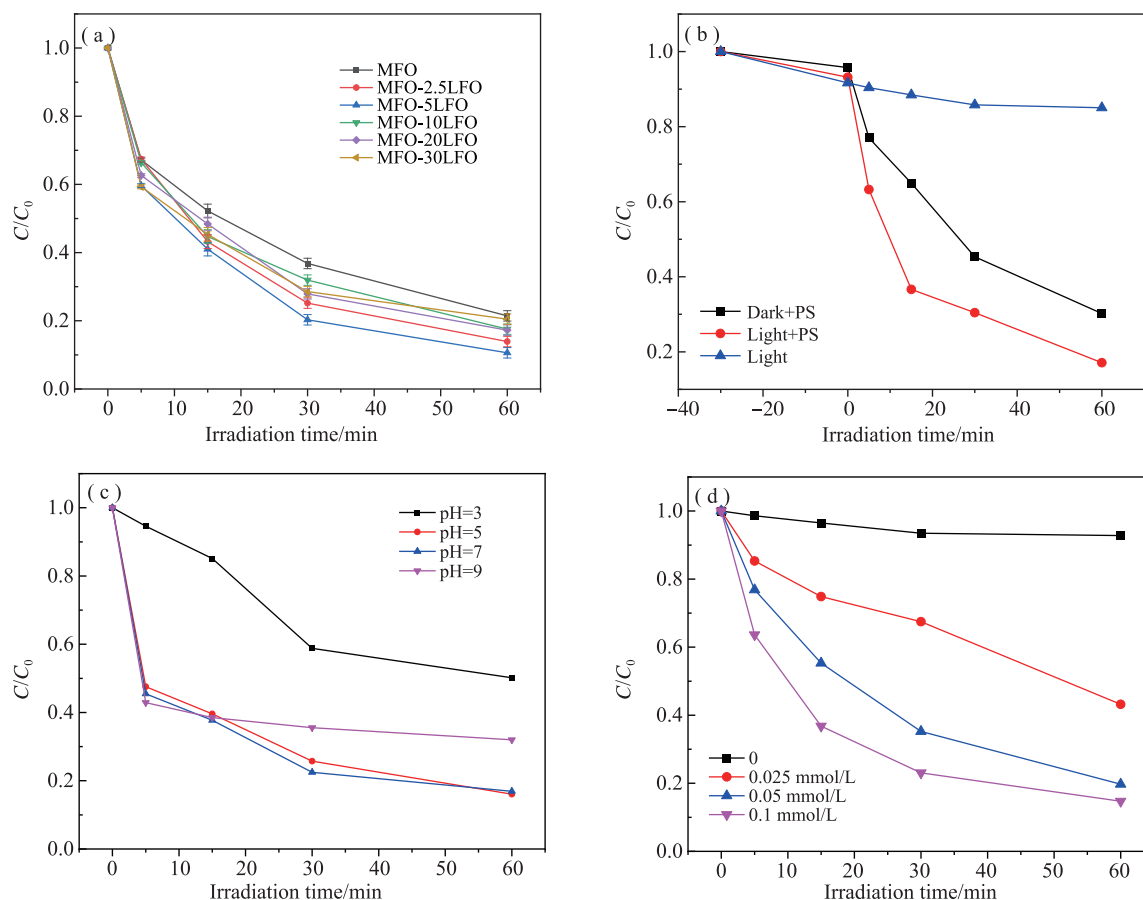
图 4 MFO-5LFO 的 XPS 光谱

Fig. 4 XPS spectra of MFO-5LFO

2.5 催化剂的光催化活性分析

图 5(a) 为纯 MFO 及不同 MFO-LFO 样品对 MO 的降解性能。纯 MFO 对 MO 的降解率为 79.8%, 说明其具有较高的催化活性。当 La 的含量由 2.5% 提高到 5% 时, MFO-5LFO 复合材料对 MO 的降解率提高到 90.8%, 可能是 LFO 的加入降低了 MFO-LFO 催化剂的禁带宽度, 使得激发光生电荷所需的能量减

少,提升了光响应效率,从而增强了 PDS 活化效率。当 La 的含量进一步提高时,MFO-LFO 复合材料对 MO 的降解率略有下降,但整体水平仍高于纯 MFO,其原因是过量的 LFO 覆盖了 MFO-LFO 的活性位点,导致 MFO-LFO 催化活性未能持续提升。图 5(b)为不同反应条件下 MFO-5LFO 对 MO 的降解性能。在可见光辐射下,MFO-5LFO 对 MO 的降解率仅为 15.2%。仅 PDS 活化 MFO-5LFO 时,降解率为 69.3%,而在可见光和 PDS 共同作用下,MFO-5LFO 对 MO 的降解率提升到 90.2%,这是由于在可见光照射下,MFO-5LFO 催化剂表面激发的电子被 PDS 捕获。一方面是因为生成更多的自由基,加速 MO 的降解;另一方面是因为加速电子迁移速率,抑制了光生电子-空穴对的复合速率,提高催化剂的催化效能^[24]。图 5(c)为不同 MO 溶液 pH 值对 MFO-5LFO 降解 MO 性能的影响。在酸性(pH=3)和碱性(pH=9)条件下,MFO-5LFO 对 MO 的降解率较小,分别为 45%和 62%。在强酸性条件下,高浓度的 H^+ 可能会影响 PDS 的活化过程,降低 $SO_4^{\cdot-}$ 的生成效率^[25]。而在碱性条件下, OH^- 的浓度增加可能会与 PDS 反应生成 $SO_4^{\cdot-}$,但由于 OH^- 与 $SO_4^{\cdot-}$ 的竞争反应,可能会降低 $SO_4^{\cdot-}$ 的浓度和活性。当 MO 溶液接近中性(pH=5)和中性(pH=7)时,MFO-5LFO 对 MO 的降解率非常接近,约为 90%,这是由于在中性或接近中性的 pH 条件下,PDS 的活化更为有效,能够产生更多的 $SO_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot OH$,这些自由基对 MO 具有较强的氧化能力^[26]。图 5(d)为不同 PDS 投加量对 MFO-5LFO 降解 MO 性能的影响。当 PDS 的投加量逐渐增加到 0.05 mmol/L 时,MFO-5LFO 对 MO 的降解率明显提高,这是因为 PDS 量越大,通过其分解产生更多的氧化物质,如 $SO_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot OH$,从而加快了反应速率,提高了 MO 的降解率^[27]。进一步增加 PDS 投加量,对 MO 降解率影响较小,这是因为 MFO-5LFO 光催化剂的数量有限,无法快速催化多余的 PDS 分解,已达到 PDS 分解能力的阈值^[28]。



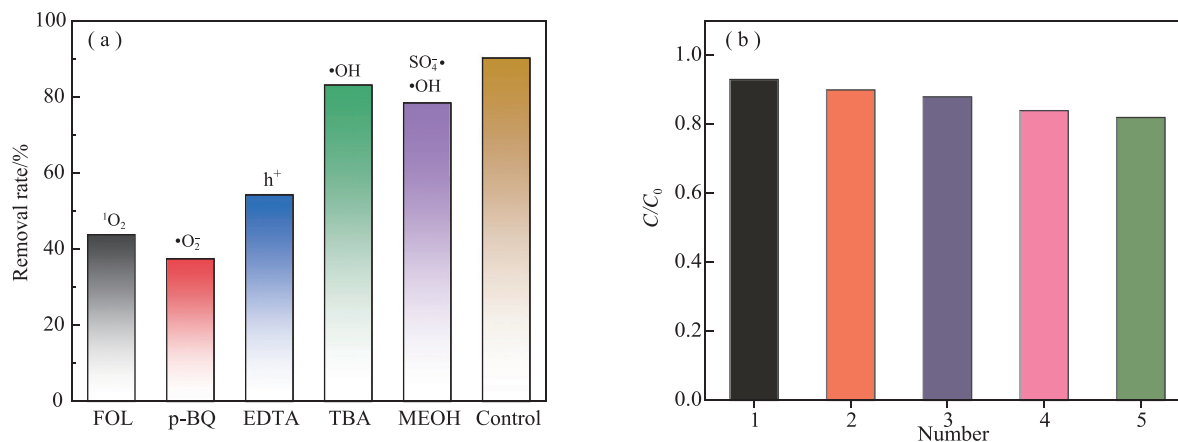
注:(a) 纯 MFO 及不同 MFO-LFO 样品对 MO 的降解性能;(b) 不同反应条件下 MFO-5LFO 对 MO 的降解性能;(c) 不同 MO 溶液 pH 和 (d) 不同 PDS 添加量对 MFO-5LFO 降解 MO 性能的影响。

图 5 催化剂的光催化活性分析

Fig. 5 Photocatalytic activity analysis of catalysts

2.6 机理实验及稳定性实验

通过机理实验确定 MFO-5LFO 光助活化 PDS 降解 MO 过程中的主要活性物质。如图 6(a)所示,在相同条件下,加入 TBA 和 MEOH 时,MO 的降解率有所下降,而加入 FOL、*p*-BQ 和 EDTA 后,MO 的降解率明显下降,这表明 MFO-5LFO 光助活化 PDS 降解 MO 过程中起主要作用的是¹O₂、 $\cdot\text{O}_2^-$ 和 h^+ [29]。图 6(b)为 MFO-5LFO 的稳定性实验,MFO-5LFO 催化剂在 5 次循环后,对 MO 的降解率由 93.2%下降至 82.4%,仍具有良好的催化活性,说明 MFO-5LFO 具有良好的光催化活性和稳定性。



注:(a) MFO-5LFO 光助活化 PDS 降解 MO 机理实验;(b) MFO-5LFO 的稳定性实验。

图 6 MFO-5LFO 机理实验及稳定性实验

Fig. 6 Mechanism experiment and stability tests of MFO-5LFO

根据 $E_{VB} = \chi - E_C + 0.5E_g$ 和 $E_{CB} = E_{VB} - E_g$, 计算半导体的导带位置, 式中 E_g 是半导体的带隙能量, 单位为 eV; E_{VB} 和 E_{CB} 分别为半导体的价带和导带值, 单位为 eV; E_C 是参考电极氧化还原水平到绝对真空标度(4.5 eV); χ 是半导体的原子绝对电负性的几何平均值[30]。由于 MFO 的 E_g 和 χ 分别为 1.82 和 5.72 eV, 则 MFO 的 E_{VB} 和 E_{CB} 值分别为 2.13 和 0.31 eV。LaFeO₃ 的禁带宽度 E_g 为 1.72 eV, E_{VB} 和 E_{CB} 值分别为 1.17 和 -0.55 eV[31]。

结合 LFO 和 MFO 的价带、导带值及捕获实验结果, 推测 MFO-5LFO 光助活化 PDS 降解 MO 机理, 如图 7 所示。在可见光照射下, LFO 和 MFO 被激发产生电子和空穴(公式 1), 形成 Z 型异质结, MFO 导带上的电子迁移到 LFO 的价带位置, 有效减小了光生电子-空穴对的复合几率, 提高了催化剂的催化性能。由于 LFO 的 E_{CB} 值低于 $\text{O}_2/\cdot\text{O}_2^-$ 的标准电极电位, 因此在 LFO 的导带位置电子还原 O_2 生成 $\cdot\text{O}_2^-$ (公式 2), $\cdot\text{O}_2^-$ 进一步生成¹O₂ (公式 3 和公式 4); MFO 的 E_{VB} 值高于 $\text{OH}^-/\cdot\text{OH}$ 的标准电极电位, 在 MFO 的价带位置空穴氧化 OH^- 生成 $\cdot\text{OH}$ (公式 5)[32-33]。同时, PDS 可捕获电子和空穴生成 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ (公式 6 和公式 7)[34]。另外, MFO-5LFO 中的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的循环氧化还原反应能促进 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 的生成 (公式 8 和公式 9)[35], 因此, MFO-5LFO 具有优异的光助活化 PDS 降解 MO 性能。

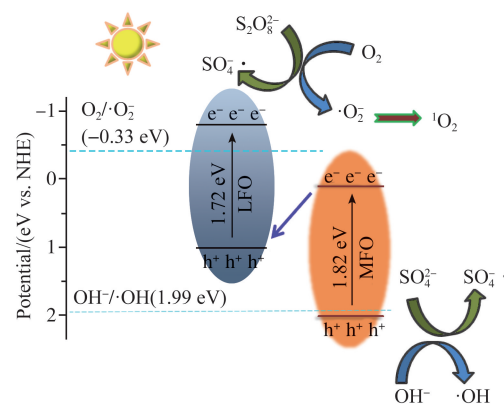
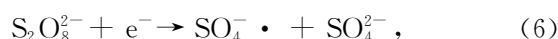
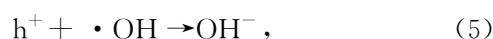
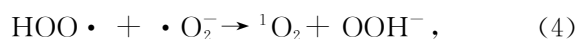
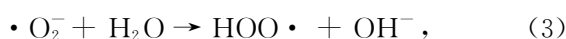
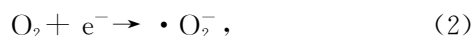
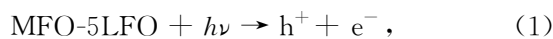


图 7 MFO-5LFO 光助活化 PDS 降解 MO 机理示意图

Fig. 7 Photo-assisted activation of PDS mechanism by MFO-5LFO for MO degradation



3 结论

采用一步溶胶-凝胶法制备了 MFO-LFO 光催化剂, MFO-5LFO 在活化 PDS 降解 MO 时展现出最高的降解效率, 达到 90.3%, MFO-5LFO 光催化剂表现出良好的重复使用性和稳定性, 通过捕获实验确定了体系的主要活性物质, 并提出 Z 型 MFO-5LFO 异质结催化活化过硫酸盐反应机理, 表明其在染料废水处理中具有显著的应用潜力, 为环境净化技术提供了新的思路。

参 考 文 献

- [1] 贾赵平, 粟迪, 林若妍, 等. Ag/Zn 改性桑叶生物质炭及其光催化降解染料性能[J]. 林业工程学报, 2024, 9(6): 133-141.
- [2] 范顶, 王黎明, 刘峰强, 等. $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ 复合材料的制备及其光催化性能[J]. 无机化学学报, 2023, 39(10): 1941-1949.
- [3] 张佳颖, 王聪, 王雅君. CNT-Co/ Bi_2O_3 催化剂光催化协同过硫酸盐活化高效降解四环素[J]. 化工学报, 2024, 75(9): 3163-3175.
- [4] 徐银, 蔡洁, 陈露, 等. 异相可见光催化耦合过硫酸盐活化技术在水污染控制中的研究进展[J]. 化工学报, 2023, 74(3): 995-1009.
- [5] 郭金鸽, 覃程荣, 张健, 等. 碳掺杂氮化碳光催化活化过硫酸盐处理 AOX 的研究[J]. 中国造纸, 2023, 42(5): 140-146.
- [6] YUAN D, LI X, XIONG S, et al. Improving sludge dewaterability via Fe^{2+} chelated citrate activated peroxydisulfate oxidation[J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, 125: 223-233.
- [7] 高荣贞, 李晓冬, 刘文凤, 等. 分级结构类球形 $\text{MgFe}_2\text{O}_4/\text{C}$ 复合材料的制备及其储锂性能[J]. 材料研究学报, 2018, 32(9): 713-720.
- [8] 王超, 陈建刚, 朱华青, 等. 高效 MFe_2O_4 ($M=\text{Zn}, \text{Mg}, \text{Cu}$ 和 Mn) 尖晶石催化剂应用于费托合成(英文)[J]. 燃料化学学报(中英文), 2024, 52(5): 667-676.
- [9] ZHANG Z, CAI W, RONG S, et al. Hollow $\text{CuFe}_2\text{O}_4/\text{MgFe}_2\text{O}_4$ heterojunction boost photocatalytic oxidation activity for organic pollutants[J]. Catalysts, 2022, 12(8): 910.
- [10] 于佳慧, 董继先, 赵玉彤, 等. $\text{BiVO}_4:\text{Yb}^{3+}, \text{Er}^{3+}$ 光催化剂的形貌调控及其全光谱降解四环素性能研究[J]. 燃料化学学报(中英文), 2025, 53(3): 348-359.
- [11] 顾杰, 李双硕, 崔天伊, 等. 生物质炭掺杂 BiOBr 的制备及其光催化性能研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025, 38(1): 68-75.
- [12] ZHANG Q, XIONG Y, GAO Y, et al. First-principles high-throughput inverse design of direct momentum-matching band alignment van der waals heterostructures utilizing two-dimensional indirect semiconductors[J]. Nano Letters, 2024, 24(12): 3710-3718.
- [13] TANG C, BAO T, LI S, et al. Rapid charge transfer endowed by hollow-structured Z-scheme heterojunction for coupling benzylamine oxidation with CO_2 reduction[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(7): 2415280.
- [14] 杨玉蓉, 马远驰, 刘宇飞. Z 型异质结的结构及其在光催化领域的应用[J]. 黑河学院学报, 2022, 13(4): 181-183.
- [15] ZHANG H, MENG F, WEI H, et al. Novel Z-scheme $\text{MgFe}_2\text{O}_4/\text{Bi}_2\text{WO}_6$ heterojunction for efficient photocatalytic degradation of tetracycline hydrochloride: Mechanistic insight, degradation pathways and density functional theory calculations[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 652: 1282-1296.
- [16] PENG H, JI C, YANG R, et al. $\text{LaFeO}_3/\text{MgFe}_2\text{O}_4$ hybrids for boosting the solar-light photocatalytic persulfate oxidation of tetracycline hydrochloride[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, 696: 134340.
- [17] JIA J, DU X, ZHANG Q, et al. Z-scheme $\text{MgFe}_2\text{O}_4/\text{Bi}_2\text{MoO}_6$ heterojunction photocatalyst with enhanced visible light photocatalytic activity for malachite green removal[J]. Applied Surface Science, 2019, 492: 527-539.
- [18] GAO W, WANG Y, LI W, et al. A Z-scheme $\text{LaFeO}_3\text{-CuFe}_2\text{O}_4$ composite for sulfate radical-based photocatalytic process: synergistic effect and mechanism[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2024, 73(9): 256-269.
- [19] HUANG J, LI D, LI R, et al. One-step synthesis of phosphorus/oxygen co-doped $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{anatase TiO}_2$ Z-scheme photocatalyst for significantly enhanced visible-light photocatalysis degradation of enrofloxacin[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 386: 121634.
- [20] ZHAO Y, HUANG B, AN H, et al. Enhanced activation of peroxymonosulfate by Sr-doped LaFeO_3 perovskite for Orange I degradation in the water[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 256: 117838.
- [21] CHENG C, GAO S, ZHU J, et al. Enhanced performance of LaFeO_3 perovskite for peroxymonosulfate activation through strontium doping towards 2,4-D degradation[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 384: 123377.
- [22] 廖素芬. 磁性铋系光催化剂的制备及其降解丁基黄药废水的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [23] XU Y, DING L, WEN Z, et al. Core-shell $\text{LaFeO}_3@\text{g-C}_3\text{N}_4$ p-n heterostructure with improved photoelectrochemical performance for fabricating streptomycin aptasensor[J]. Applied Surface Science, 2020, 511: 145571.

- [24] MCDONALD K D, BARTLETT B M. Microwave synthesis of spinel MgFe₂O₄ nanoparticles and the effect of annealing on photocatalysis[J]. *Inorganic Chemistry*, 2021, 60(12): 8704-8709.
- [25] 王晓云, 付爱民. Ag 掺杂 MnFe₂O₄/UV 活化过硫酸盐降解废水中对硝基苯酚[J]. *环境科学学报*, 2024, 44(9): 245-260.
- [26] SABRI M, HABIBI-YANGJEH A, CHAND H, et al. Activation of persulfate by novel TiO₂/FeOCl photocatalyst under visible light: facile synthesis and high photocatalytic performance[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 250: 117268.
- [27] FU H, MA S, ZHAO P, et al. Activation of peroxymonosulfate by graphitized hierarchical porous biochar and MnFe₂O₄ magnetic nano-architecture for organic pollutants degradation: Structure dependence and mechanism[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 360: 157-170.
- [28] 杨晴, 孙昕, 李鹏飞, 等. 超声活化过硫酸盐降解甲基橙的影响因素研究[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(8): 2715-2721.
- [29] LIANG C, LIN Y T, SHIN W H. Persulfate regeneration of trichloroethylene spent activated carbon[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168(1): 187-192.
- [30] LI X, LIU X, LIN C, et al. Cobalt ferrite nanoparticles supported on drinking water treatment residuals: an efficient magnetic heterogeneous catalyst to activate peroxymonosulfate for the degradation of atrazine[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 367: 208-218.
- [31] LI Y, FAN J, FENG X, et al. Degradation of organics using LaFeO₃ as a persulfate activator under low-intensity ultra-violet-light irradiation: Catalytic performance and mechanism[J]. *Journal of Rare Earths*, 2022, 40(7): 1043-1052.
- [32] HE J, SHAO D W, ZHENG L C, et al. Construction of Z-scheme Cu₂O/Cu/AgBr/Ag photocatalyst with enhanced photocatalytic activity and stability under visible light[J]. *Applied Catalysis. B, Environmental*, 2017, 203: 917-926.
- [33] YE Y, YANG H, WANG X, et al. Photocatalytic, Fenton and photo-Fenton degradation of RhB over Z-scheme g-C₃N₄/LaFeO₃ heterojunction photocatalysts[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2018, 82: 14-24.
- [34] HE N, YU Z, YANG G, et al. Selective adsorption and photocatalytic degradation of antibiotics by LaFeO₃ modified Ag₃PO₄@ sepiolite composite[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 672: 131712.
- [35] JING J, CAO C, MA S, et al. Enhanced defect oxygen of LaFeO₃/GO hybrids in promoting persulfate activation for selective and efficient elimination of bisphenol A in food wastewater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 407: 126890.

(责任编辑:蒲锡鹏)

(上接第 714 页)

- [18] QIN D M, CHENG F Y, CAO M L, et al. Unraveling the incompatibility mechanism of ethylene carbonate-based electrolytes in sodium metal anodes[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2024, 94: 560-567.
- [19] CHEN J Q, BAI Z H, LI X T, et al. Reduced graphene oxide-modified aluminum foils as highly conductive and corrosion-resistant cathode current collectors for Li-ion batteries[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 606: 155002.
- [20] WU H, ZHOU X, YANG C, et al. Concentration-gradient Nb-doping in a single-crystal LiNi_{0.83}Co_{0.12}Mn_{0.05}O₂ cathode for high-rate and long-cycle lithium-ion batteries[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(15): 18828-18835.
- [21] LIU C L, LI Z J, JIANG L L, et al. Dipole-dipole interactions in electrolyte to facilitate Li-ion desolvation for low-temperature Li-ion batteries[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2025, 104: 678-686.
- [22] WU Y, WANG Z Y, WANG Z L, et al. Tailoring stress-relieved structure for ternary cobalt phosphoselenide@N/P codoped carbon towards high-performance potassium-ion hybrid capacitors and potassium-ion batteries[J]. *Energy Storage Materials*, 2023, 57: 180-194.
- [23] LI X, LUO F, YU M M, et al. Enhancing lithium metal battery performance with a perfluorinated bisalt electrolyte achieving high-voltage stability up to 4.8 V[J]. *Energy Storage Materials*, 2025, 75: 104048.
- [24] SUN Z Y, LI F K, DING J Y, et al. High-voltage and high-temperature LiCoO₂ operation via the electrolyte additive of electron-defect boron compounds[J]. *ACS Energy Letters*, 2023, 8(6): 2478-2487.
- [25] DENG Y K, LI C F, GUO R Y, et al. Breaking kinetic barriers in silicon anodes via strategic electrolyte additive engineering[J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(8): 2415820.
- [26] CHENG F Y, ZHANG X Y, WEI P, et al. Tailoring electrolyte enables high-voltage Ni-rich NCM cathode against aggressive cathode chemistries for Li-ion batteries[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(21): 2225-2234.

(责任编辑:蒲锡鹏)