

SiC-Ti₃C₂/TiO₂ 复合材料的构筑及声-光耦合催化性能

何靖龙, 赵俊杰, 杨昊, 孙明轩*

(上海工程技术大学材料科学与工程学院, 上海 201620)

摘要:以碳化钛(Ti₃C₂)和碳化硅(SiC)为原料,通过一步水热法合成了SiC-Ti₃C₂/TiO₂三元复合材料。采用X射线衍射仪、扫描电子显微镜、X射线光电子能谱仪等对样品的晶相、形貌和组成进行了表征分析。探讨了SiC掺杂量对复合材料声-光耦合催化降解四环素的性能影响。其中, SiC的掺杂量为7.5%的三元复合材料表现出最好的声-光耦合催化性能。对比3次循环催化实验中四环素的降解效率和循环前后样品的X射线衍射图,可以发现三元复合样品具有较好的声-光催化稳定性。活性物种捕获实验表明, ·OH在声-光催化降解四环素过程中起最主要的作用。(光)电化学测试证实,与Ti₃C₂/TiO₂材料相比, SiC-Ti₃C₂/TiO₂复合材料具有更高的光电流值、较小的界面电荷转移电阻和Tafel斜率以及更优异的本征活性。

关键词:碳化钛; 二氧化钛; 碳化硅; 复合材料; 声-光催化; 污染物降解

中图分类号: TB33

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)02-0174-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.02.028

Construction of SiC-Ti₃C₂/TiO₂ composites and its sono-photocatalytic performance

HE Jing-long, ZHAO Jun-jie, YANG Hao, SUN Ming-xuan*

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: SiC-Ti₃C₂/TiO₂ ternary composites were synthesized by in-situ hydrothermal process using titanium carbide (Ti₃C₂) and silicon carbide (SiC) as raw materials. The obtained samples were characterized by X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and X-ray photoelectron spectroscopy for the analysis of their crystal phase, morphology, and composition. The effect of SiC doping amount on the sono-photocatalytic degradation of tetracycline was investigated. Thereinto, the ternary composites with 7.5% SiC exhibit the optimized sono-photocatalytic performance. By comparing the tetracycline-degradation efficiency in three-cycle catalytic experiment and the X-ray diffraction patterns of catalysts before and after three recycles, it can be found that the ternary composites exhibit excellent sono-photocatalytic stability. Active species trapping experiments confirm that ·OH plays major roles in the sono-photocatalytic degradation of tetracycline. (Photo)electrochemical tests demonstrate that, in comparison with Ti₃C₂/TiO₂, SiC-Ti₃C₂/TiO₂ composites show a higher photocurrent, lower interfacial charge transfer resistance and Tafel slope as well as better intrinsic activity.

Key words: titanium carbide; titanium dioxide; silicon carbide; composites; sono-photocatalysis; pollutant degradation

四环素(TC)作为一种广谱抗生素,广泛应用于医疗、农业和水产养殖等领域,但其在环境中的残留不断累积,能引发严重的水环境污染问题^[1]。

声-光催化即将超声波和光催化耦合的技术,两者的协同效应在解决环境污染问题方面展现出广阔的应用前景^[2]。目前,在前沿基础及应用研究领域,二氧化钛(TiO₂)仍被认为是众多催化剂中的明星材料之一^[3]。然而, TiO₂光生电子-空穴对的快速复合,影响了其商业化应用进程。研究人员发展了多种修饰改性TiO₂的策略,以达成减缓光生电子-空穴对复合的目标^[4]。其中,负载助催化剂或

与其他半导体复合,在提高电荷的分离效率方面的效果较为突出。最近的研究发现,碳化钛(Ti₃C₂)具有优异的一类金属导电性、合适的费米能级位置以及良好的亲水性和化学稳定性等,已经被证实是一种高效的助催化剂^[5]。另外,碳化硅(SiC)具备成分无毒、稳定性高、能带结构可调等特性,且其导带能级较高,使得光生电子具有较强的还原能力,常与能带结构匹配的半导体材料构筑复合催化剂^[6]。

近年来,通过构建多元修饰复合材料,利用各组分间的协同效应来提高催化材料的性能成为人们研究的热点^[7]。基于以上分析,本文利用水热Ti₃C₂

收稿日期:2025-04-21;修回日期:2025-12-05

基金项目:上海市Ⅲ类高峰学科—材料科学与工程(高能束智能加工与绿色制造);2024年上海市大学生创新训练项目(cs2405004)

作者简介:何靖龙(2004-),男,本科生,研究方向为光催化材料,2021456217@qq.com;孙明轩(1983-),男,博士,教授,硕导,研究方向为能源环境光催化,通讯联系人,smxalan@163.com。

和 SiC 的方法,在 Ti₃C₂ 上原位生长 TiO₂ 的同时,引入 SiC,构筑了 SiC-Ti₃C₂/TiO₂ 三元复合催化材料。利用多种表征手段对样品进行了分析,并研究了其声-光催化降解四环素的性能,研究成果对声-光催化降解污染物领域的研究具有一定借鉴意义。

1 实验

1.1 样品的制备

参照文献报道[8],将 1 g 钛铝碳(Ti₃AlC₂)分散于 10 mL 氢氟酸(HF)中,在磁力搅拌下反应 24 h,然后用去离子水和乙醇洗涤数次,直至样品 pH≥6.5。最后,将离心分离后的固体沉淀在 70℃ 下真空干燥 24 h,即可制备得到 Ti₃C₂。

将 200 mg Ti₃C₂ 和一定量的 SiC 分散至 30 mL 含有 330 mg 四氟硼酸钠(NaBF₄)的 1 mol/L 盐酸溶液中,磁力搅拌 30 min 后,超声处理 10 min。将所得悬浮液转移到 100 mL 水热反应釜中,在 160℃ 下水热 12 h。冷却至室温后,用去离子水和乙醇分别洗涤沉淀 3~4 次至 pH≥6.5。最后在 70℃ 下真空干燥 24 h。所得 SiC-Ti₃C₂/TiO₂ 样品标记为 x%-SiC/TT,其中,x%为 SiC 在复合材料中的质量分数。

1.2 样品的表征

利用 X 射线衍射仪(XRD, X'Pert PRO, 荷兰帕纳科)、扫描电子显微镜(SEM, JEM2100F, 日本日电)和 X 射线光电子能谱(XPS, Thermo Scientific K-Alpha)对样品的晶相结构、形貌和元素组成进行表征。

1.3 光催化性能测试

将 50 mL TC 溶液(20 mg/L)和 20 mg 催化剂置于 100 mL 烧杯中。在暗态下磁力搅拌 60 min,每间隔 15 min 取样测试,直到催化剂和污染物 TC 之间达到吸附-脱附平衡。然后,在超声(53 kHz)和光照辐射下,每间隔 20 min 取样,离心分离,利用紫外-可见分光光度计检测上层清液的紫外-可见吸收光谱,通过其在 357 nm 处的吸光度来确定污染物浓度。另外,在光催化体系中分别加入 0.2 mmol/L 对苯醌(BQ, ·O₂ 的猝灭剂)、0.2 mmol/L 叔丁醇(TBA, ·OH 的猝灭剂)和 0.2 mmol/L 草酸铵(AO, h⁺ 的猝灭剂),探究催化降解 TC 过程中的主要活性物种。此外,利用循环实验评价样品的声-光催化稳定性。每次循环实验后,离心回收催化剂,用去离子水和无水乙醇连续洗涤数次,60℃ 真空干燥过夜,用于下一次循环测试。

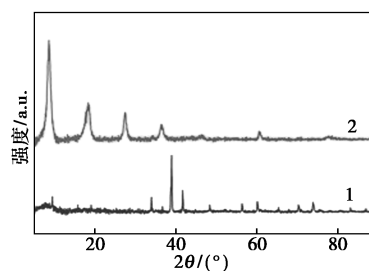
1.4 (光)电化学性能测试

利用 CHI 660E 上海辰华电化学工作站、CHF-XM 500 W 氙气灯模拟光源以及三电极体系[样品、铂丝和饱和甘汞电极(SCE)分别为工作电极、对电极、参比电极],在 0.5 mol/L Na₂SO₄ 电解液中进行(光)电化学测试。工作电极的制备方法:将 10 mg 样品和 30 μL 全氟磺酸型质子交换树脂(Nafion)分散于 2 mL 乙醇溶液中,超声处理 1 h,所得的均匀悬浮液滴涂在氟掺杂氧化锡(FTO)导电玻璃上,室温下干燥。电化学阻抗谱(EIS)的测试频率范围为 1~100 000 Hz,施加电压 0.005 V。Mott-Schottky (MS)测试频率为 1 000 Hz。

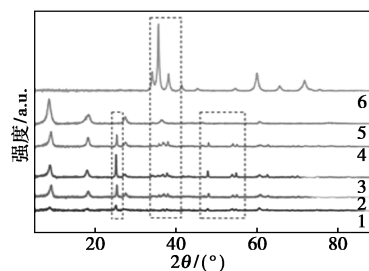
2 结果与讨论

2.1 样品的表征

图 1 为 Ti₃AlC₂、Ti₃C₂、SiC 和 x%-SiC/TT 复合材料的 XRD 图。如图 1(a)所示,经 HF 刻蚀后, Ti₃AlC₂ 位于 39.2° 处的(104)晶面的特征衍射峰消失。同时,(002)和(004)衍射峰加宽且向低角度移动。其中,(002)晶面的衍射峰从 9.8° 移到 8.9°,而(004)晶面的衍射峰从 19.2° 移到 18.1°。这一现象表明 Ti₃AlC₂ 中的 Ti-Al 键断裂,生成了 Ti₃C₂^[9]。如图 1(b)所示, SiC 的主要衍射峰位于 34.1°、35.6°、38.1°、59.9°、65.6°、71.7°,分别对应 SiC 的(101)、



1—Ti₃AlC₂; 2—Ti₃C₂
(a) Ti₃AlC₂ 和 Ti₃C₂ 的 XRD 图谱



1—TT; 2—5%-SiC/TT; 3—7.5%-SiC/TT; 4—10%-SiC/TT;
5—Ti₃C₂; 6—SiC

(b) Ti₃C₂、SiC、Ti₃C₂/TiO₂ 和 x%-SiC/TT 的 XRD 图谱

图 1 样品的 XRD 图谱

(006)、(103)、(108)、(109)、(116) 晶面。对于 $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ 样品,除了 Ti_3C_2 的特征衍射峰外,位于 25.3° 处的特征衍射峰对应锐钛矿 TiO_2 的 (101) 晶面,证明水热生成了 $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ 。而对于 $x\%-\text{SiC}/\text{TT}$ 复合材料,可以同时观察到 Ti_3C_2 、 TiO_2 和 SiC 的特征衍射峰,证明 $\text{SiC}-\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ 复合材料的成功制备。其中, SiC 的衍射峰强度较弱,这可能是由于 SiC 在复合材料中的负载量较低或分散较均匀。值得注意的是,随着 SiC 负载量增加,锐钛矿相 TiO_2 衍射峰的强度有所提高,而过量掺杂 SiC 时, TiO_2 反而下降。这可能是由于 SiC 作为异质成核位点,降低了锐钛矿相 TiO_2 的成核能垒。而过量 SiC 颗粒可能覆盖 Ti_3C_2 表面,阻碍 Ti_3C_2 表面氧化生成 TiO_2 [9]。

图 2 是 Ti_3C_2 、 SiC 和 $x\%-\text{SiC}/\text{TT}$ 复合材料的 SEM 图。如图 2(a) 所示, Ti_3C_2 呈现出手风琴形态的层状结构,显示出典型的二维过渡金属碳/氮化物 (MXene) 形貌 [9]。由图 2(b) 可以看出碳化硅为颗粒状。图 2(c)、(d) 为 $7.5\%-\text{SiC}/\text{TT}$ 复合材料的微观形貌图。经水热反应后,在层状 Ti_3C_2 结构中,横向插入许多纳米片,形成了 2D-2D 复合形貌。这些在层状 Ti_3C_2 上原位生长的纳米片归属于具有暴露 (001) 晶面的层状 TiO_2 。在 HCl 和 NaBF_4 酸性水热条件下,层状 Ti_3C_2 为 TiO_2 的生长提供 Ti 源 [10]。在导向剂 NaBF_4 的辅助下,由于 (101) 晶面吸附 F^- 的能量较低,高能 (001) 晶面的形成得到增强 [11]。暴露 (001) 面的 TiO_2 纳米片与导电性较好的层状 Ti_3C_2 紧密接触,有助于 TiO_2 光生载流子的分离,从而提高光催化活性 [12]。另外,在 2D-2D $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ 层状复合材料表面,可以观察到一些分散的纳米颗

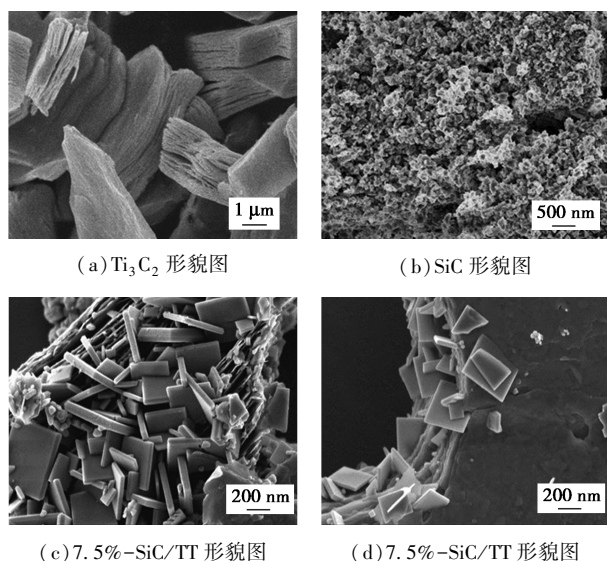


图 2 样品的 SEM 图

粒,归属于碳化硅。

利用 XPS 测试研究了 $7.5\%-\text{SiC}/\text{TT}$ 复合材料的元素组成及化学态。图 3(a) 是 $7.5\%-\text{SiC}/\text{TT}$ 复合材料的 XPS 全谱图,可以看到 Ti 、 C 、 O 、 Si 和 F 元素的特征 XPS 峰,表明样品是由 Ti 、 C 、 O 、 Si 和 F 元素组成的。其中, F 元素来自 HF 刻蚀 Ti_3AlC_2 过程中残留的 F 离子。图 3(b) 为 Ti 2p 的 XPS 精细谱。在结合能为 459.4 eV ($\text{Ti } 2p_{3/2}$) 和 465.2 eV ($\text{Ti } 2p_{1/2}$) 处的 2 个 XPS 峰归因于 TiO_2 中的 $\text{Ti}-\text{O}$ 键 [12]。而结合能为 455.6 eV ($\text{Ti } 2p_{3/2}$) 和 461.8 eV ($\text{Ti } 2p_{1/2}$) 的 2 个 XPS 峰对应于 Ti_3C_2 中的 $\text{Ti}-\text{C}$ 键。如图 3(c) 所示, $\text{C } 1s$ 的 XPS 谱在 284.8 eV 和 282.1 eV 处有 2 个明显的峰,分别归属于 sp^2 碳 ($\text{C}=\text{C}$) 和 $\text{C}-\text{Ti}$ [13],来自外来元素碳和 Ti_3C_2 。另外,在 289.1 eV 处较弱的 XPS 峰对应于残留 F 离子的 $\text{C}-\text{F}$,而在 283.2 eV 处的特征峰则对应于 $\text{C}-\text{Si}$ 键。 $\text{O } 1s$ 的 XPS 精细谱中 [图 3(d)],在结合能为 530.7 eV 和 532.2 eV 处的 2 个 XPS 峰,分别归因于 $\text{Ti}-\text{O}-\text{Ti}$ 和表面羟基 [14]。图 3(e) 为 $\text{Si } 2p$ 的 XPS 精细谱,其位于 101.6 eV 处的 XPS 峰与文献中

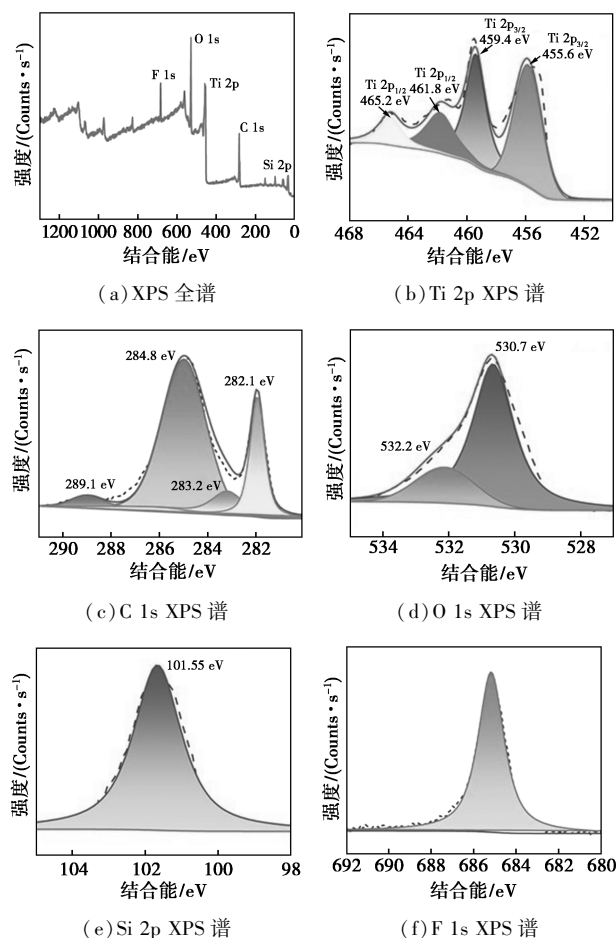


图 3 样品 $7.5\%-\text{SiC}/\text{TT}$ 的 XPS 图

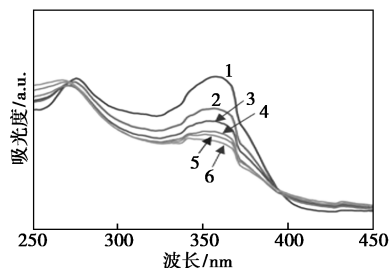
Si—C 键的 XPS 特征峰的结合能一致。如图 3(f) 所示,结合能 685.2 eV 处的 XPS 峰归属于 F—Ti 键。以上 XRD、SEM 和 XPS 测试结果证实了 SiC—Ti₃C₂/TiO₂ 复合材料的成功制备。

2.2 声-光协同催化性能

通过样品在超声和光照协同作用下催化降解四环素污染物,来评价其声-光催化性能。图 4(a) 显示了在 7.5%—SiC/TT 的声-光催化作用下,四环素溶液的紫外-可见吸收光谱随着时间的变化情况。由图可见,四环素在 357 nm 处的特征吸收峰强度随着时间的延长而不断减弱,说明在声-光耦合作用下,四环素逐渐被 7.5%—SiC/TT 催化降解。图 4(b) 对比了 $x\%$ —SiC/TT 与 Ti₃C₂/TiO₂ 体系的声-光催化降解四环素的效果。在 100 min 内,5%—SiC/TT、7.5%—SiC/TT 和 10%—SiC/TT 对四环素的声-光催化降解效率分别为 52.2%、65.1% 和 58.5%,均优于纯 Ti₃C₂/TiO₂ 降解四环素的效率(52.1%)。图 4(c) 利用一级动力学模型 $[\ln(C_0/C) = kt]$ 分析了四环素降解反应速率。7.5%—SiC/TT 的声-光催化降解四环素的速率常数 k (0.00833 min^{-1}) 分别为 5%—SiC/TT (0.00534 min^{-1})、10%—SiC/TT (0.00632 min^{-1}) 及 Ti₃C₂/TiO₂ (0.00504 min^{-1}) 的 1.55、1.31 和 1.65 倍。以上结果表明,SiC 修饰可以提高 Ti₃C₂/TiO₂ 的声-光催化活性。

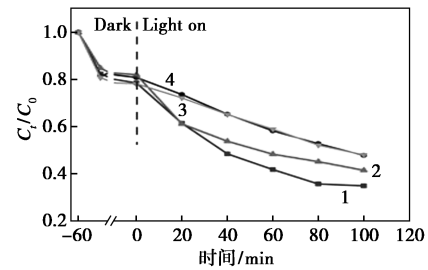
利用自由基捕获实验,分析了声-光协同作用下 7.5%—SiC/TT 催化降解四环素过程中的主要活性物种。如图 4(d) 所示,BQ、TBA 或 AO 的引入,都能抑制催化剂对四环素的声-光催化降解性能,表明 $\cdot\text{O}_2^-$ 、 $\cdot\text{OH}$ 和 h^+ 均对四环素的声-光催化降解发挥着作用。其中,TBA 对声-光催化降解四环素的抑制作用最明显,其次是 BQ,而 AO 对声-光催化降解四环素的抑制作用最小,说明该催化反应体系中主要活性物种的活性贡献排序为 $\cdot\text{OH} > \cdot\text{O}_2^- > \text{h}^+$ 。

图 4(e) 为样品 7.5%—SiC/TT 声-光催化降解

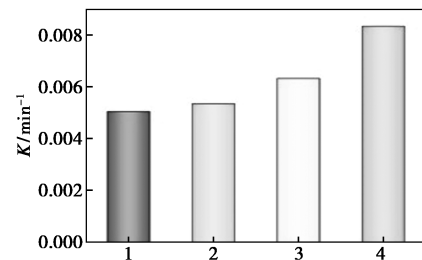


1—0 min; 2—20 min; 3—40 min; 4—60 min;
5—80 min; 6—100 min

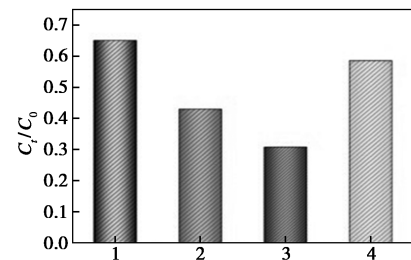
(a) 7.5%—SiC/TT 复合材料声-光催化降解四环素过程的紫外-可见吸收光谱



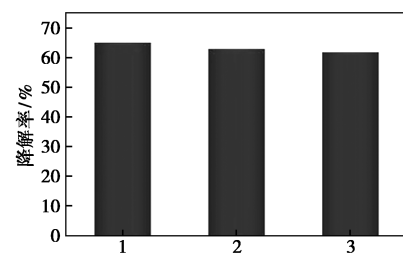
1—7.5%—SiC/TT; 2—10%—SiC/TT; 3—5%—SiC/TT; 4—TT
(b) 样品在声-光辐照下对四环素的降解率



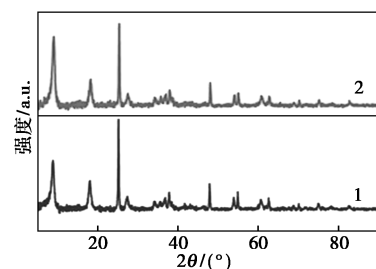
1—TT; 2—5%—SiC/TT; 3—10%—SiC/TT; 4—7.5%—SiC/TT
(c) 样品在声-光辐照下降解四环素的一级动力学模型



1—7.5%—SiC/TT; 2—BQ; 3—TBA; 4—AO
(d) 7.5%—SiC/TT 复合材料声-光催化降解四环素的活性物种捕获



1—第1次; 2—第2次; 3—第3次
(e) 7.5%—SiC/TT 声-光催化降解循环实验



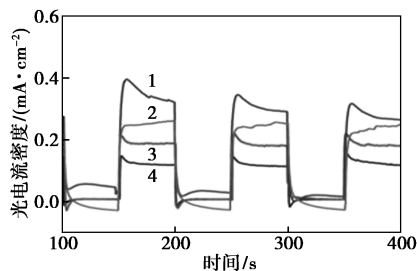
1—循环前; 2—循环后
(f) 7.5%—SiC/TT 复合材料 3 次循环前后的 XRD 谱图

图 4 样品的光催化性能测试结果

四环素的循环实验结果。如图所示,3 次循环实验中,样品对四环素的降解率依次为 65.1%、63.0% 和 61.8%。由此可见,降解效率未出现显著下降。此外,对比 7.5% -SiC/TT 在 3 次声-光催化循环实验前后的 XRD 图谱[图 4(f)],也没有发现明显的衍射峰强度和位置的变化。由此可见, $x\%$ -SiC/TT 复合材料在声-光催化降解污染物过程中具有较好的稳定性。

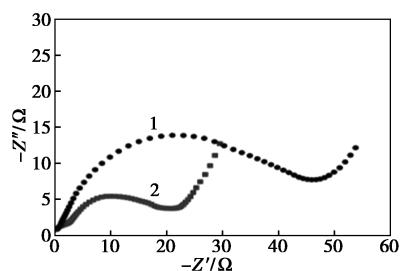
2.3 (光)电化学测试分析

图 5(a)为样品 TT 和 $x\%$ -SiC/TT 在紫外-可见光照射下的瞬态光电流。与 $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ 相比, $x\%$ -SiC/TT 复合材料的光电流值升高,意味着流向外电路的光生载流子数量增多,表明 SiC 的引入提高了 $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ 对太阳光的利用率。采用图 5(b)的 EIS 阻抗谱研究了光催化剂/溶液界面的电荷转移电阻。如图所示,7.5% -SiC/TT 的圆弧半径小于 $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$,表明 SiC 的引入降低了复合材料的界面电荷转移电阻。如图 5(c)所示,7.5% -SiC/TT 复合材料的 Tafel 斜率降至 400 mV/dec,显著低于 $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ (774 mV/dec),表明 SiC 的引入可提升 $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ 的本征动力学与反应活性。转换频率 (TOF) 也是表征本征活性的有效手段。如图 5(d)所示,在 1.23 V vs RHE 电势下,7.5% -SiC/TT 的 TOF 值为 0.853 ms^{-1} ,是 $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ (0.437 ms^{-1}) 的 1.95 倍,进一步证实 7.5% -SiC/TT 复合材料具有优异的本征活性。因此, SiC 的引入提高了 $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ 对太阳光的利用率和本征活性,进而 SiC- $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ 复合材料表现出优异的声-光催化性能。



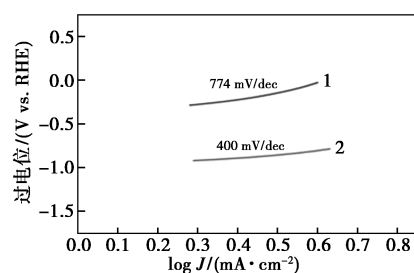
1—7.5% -SiC/TT; 2—10% -SiC/TT; 3—5% -SiC/TT; 4—TT

(a) 光电流图



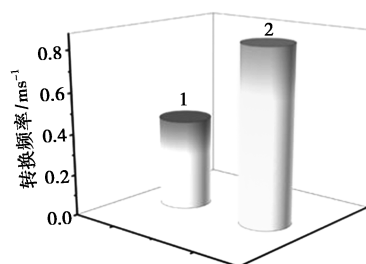
1—TT; 2—7.5% -SiC/TT

(b) EIS 阻抗谱



1—TT; 2—7.5% -SiC/TT

(c) Tafel 曲线



1—TT; 2—7.5% -SiC/TT

(d) TOF 图

图 5 样品的(光)电化学性能测试结果

3 结论

本文利用一步水热法,在层状 Ti_3C_2 上原位生长了暴露高活性(001)晶面的 TiO_2 纳米片,并引入了 SiC 纳米颗粒,构建了 SiC- $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ 三元复合催化剂。通过 XRD、SEM 和 XPS 表征分析,证实了三元复合材料的成功制备。在声-光协同作用下,样品 7.5% -SiC/TT 催化降解四环素的效率是 $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ 的 1.65 倍。 $\cdot\text{O}_2^-$ 、 $\cdot\text{OH}$ 和 h^+ 这 3 种活性物种在四环素的声-光催化降解中均发挥着作用,其中 $\cdot\text{OH}$ 是最主要的活性物种。另外,3 次声-光催化循环实验前后样品对四环素的降解效率及其晶相组成没有发生明显的变化,表明复合材料具有高的声-光催化稳定性。与 $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ 相比,7.5% -SiC/TT 具有更大的光电流、较小的界面电荷转移电阻和更优异的本征活性。本研究首次构建了 SiC/ $\text{Ti}_3\text{C}_2/\text{TiO}_2$ 复合材料,为声-光催化材料的构筑提供了新的思路。

参考文献

- [1] 田卓妍,吴明伟,魏文嘉,等. TiO_2 -x/RGO 的制备及光热催化降解四环素的性能研究[J].化学研究,2025,36(1):17-24.
- [2] Gholami P, Khataee A, Soltani R D C, et al. A review on carbon-based materials for heterogeneous photocatalysis: Fundamentals, properties and applications [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 58:104681.

(下转第 184 页)

- 27(13):7637-7648.
- [3] Jeddi M K, Mahkam M. Magnetic nano carboxymethyl cellulose-alginate/chitosan hydrogel beads as biodegradable devices for controlled drug delivery[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 135:829-838.
- [4] An F, Fang K, Liu X, *et al.* Rheological properties of carboxymethyl hydroxypropyl cellulose and its application in high quality reactive dye inkjet printing on wool fabrics[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164:4173-4182.
- [5] Gencoglu E N, Ozden O, Simsek O. Effects of carboxymethyl cellulose as a surface sizing agent on the printable properties of newspaper[J]. Asian Journal of Chemistry, 2010, 22(7):5561-5566.
- [6] Zhang S, Lyu H, Tang J, *et al.* A novel biochar supported CMC stabilized nano zero-valent iron composite for hexavalent chromium removal from water[J]. Chemosphere, 2019, 217:686-694.
- [7] Ure D, Awada A, Frowley N, *et al.* Greenhouse tomato plant roots/carboxymethyl cellulose method for the efficient removal and recovery of inorganic phosphate from agricultural wastewater[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 233:258-263.
- [8] 关炳月, 刘涛, 丁新波, 等. 羧化纤维素气凝胶的制备及其对亚甲基蓝染料的吸附性能[J]. 浙江理工大学学报, 2022, 47(2):166-172.
- [9] Xu L, Meng T T, Zheng X Y, *et al.* Nanocellulose-carboxymethylcellulose electrolyte for stable, high-rate zinc-ion batteries [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(27):2302098.
- [10] 唐敏, 单玉华, 武志林, 等. 交联羧甲基化水葫芦纤维研制及其吸水与保水性能考察[J]. 高校化学工程学报, 2012, 26(3):517-523.
- [11] Hirota M, Furihata K, Saito T, *et al.* Glucose/glucuronic acid alternating Co-polysaccharides prepared from TEMPO-oxidized native celluloses by surface peeling[J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2010, 49(42):7670-7672.
- [12] 孙宾, 武利顺, 梁伯润. 医用可吸收氧化纤维素及其氧化体系研究进展[J]. 中国纺织大学学报, 2000, 26(4):110-114.
- [13] Coseri S, Biliuta G, Zemljic L F, *et al.* One-shot carboxylation of microcrystalline cellulose in the presence of nitroxyl radicals and sodium periodate[J]. RSC Advances, 2015, 5(104):85889-85897.
- [14] Kumar V, Yang T R. HNO₃/H₃PO₄-NaNO₂ mediated oxidation of cellulose; Preparation and characterization of bioabsorbable oxidized celluloses in high yields[J]. Carbohydrate polymers, 2002, 48(4):403-412.
- [15] 王丽, 相秉仁, 邹巧根. 氧化纤维素的制备及结构和性能的研究[J]. 药学进展, 2009, 33(8):365-369.
- [16] Fan X M, Yu H Y, Wang D C, *et al.* Facile and green synthesis of carboxylated cellulose nanocrystals as efficient adsorbents in wastewater treatments[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(21):18067-18075.
- [17] Dong K, Sang R, Liu J, *et al.* Palladium-catalyzed carbonylation of sec- and tert-alcohols [J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2017, 56(22):6203-6207.
- [18] Zoeller J R, Cloyd J D, Lafferty N L, *et al.* Rhodium-catalyzed carbonylation of methyl acetate [J]. Advances in Chemistry Series, 1992, 230:377-394.
- [19] Garland C S, Giles M F, Sunley J G. Process and catalyst for the production of acetic acid; EP 0643034B1 [P]. 1995-08-09.
- [20] Ubale R S, Kelkar A A, Chaudhari R V. Carbonylation of ethanol using Ni-isoquinoline complex catalyst; Activity and selectivity studies [J]. J Mol Catal A: Chem, 1997, 118(1):9-19.
- [21] Sabater S, Menche M, Ghosh T, *et al.* Mechanistic investigation of the nickel-catalyzed carbonylation of alcohols [J]. Organometallics, 2020, 39(6):870-880. ■

(上接第 178 页)

- [3] Gao Y, Wang L, Zhou A, *et al.* Hydrothermal synthesis of TiO₂/Ti₃C₂ nanocomposites with enhanced photocatalytic activity [J]. Materials Letters, 2015, 150:62-64.
- [4] Yan D Y, Jin C Z, Yang X A, *et al.* Bi-element gradient doped B/N-TiO_{2-x} synthesized by one-step solvothermal method enhances the photocatalysis of Cr(VI) [J]. Applied Surface Science, 2024, 657:159817.
- [5] Song H, Wang Y, Ling Z, *et al.* Enhanced photocatalytic degradation of perfluorooctanoic acid by Ti₃C₂ MXene-derived heterojunction photocatalyst; Application of intercalation strategy in DESs [J]. The Science of the Total Environment, 2020, 746:141009.
- [6] Zhang X, Tang Q, Zhang H, *et al.* Bi₂WO₆/SiC composite photocatalysts with enhanced photocatalytic performance for dyes degradation [J]. Inorganic Chemistry Communications, 2022, 140:109434.
- [7] Gribov E, Koshevoy E, Fazliev T, *et al.* Effect of surface Fe- and Cu-species on the flat-band potential and photoelectrocatalytic properties of N-doped TiO₂ [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2025, 464:116342.
- [8] 程余磊, 周沁锋, 张子璇, 等. Ti₃C₂/N-TiO₂ 复合材料的制备及吸附/光催化去除污染物性能 [J]. 微纳电子技术, 2023, 60:361-367.
- [9] Li Y, Deng X Q, Tian J, *et al.* Ti₃C₂ MXene-derived Ti₃C₂/TiO₂ nanoflowers for noble-metal-free photocatalytic overall water splitting [J]. Applied Materials Today, 2018, 13:217-227.
- [10] Li Y, Yin Z H, Ji G, *et al.* 2D/2D/2D heterojunction of Ti₃C₂ MXene/MoS₂ nanosheets/TiO₂ nanosheets with exposed (001) facets toward enhanced photocatalytic hydrogen production activity [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2019, 246:12-20.
- [11] Peng C, Wei P, Li X, *et al.* High efficiency photocatalytic hydrogen production over ternary Cu/TiO₂@Ti₃C₂T_x enabled by low-work-function 2D titanium carbide [J]. Nano Energy, 2018, 53:97-107.
- [12] Zhou W, Yin Z, Du Y, *et al.* Synthesis of few-layer MoS₂ nanosheet-coated TiO₂ nanobelt heterostructures for enhanced photocatalytic activities [J]. Small, 2013, 9(1):140-147.
- [13] Dong Y, Wu Z S, Zheng S, *et al.* Ti₃C₂ MXene-derived sodium/potassium titanate nanoribbons for high-performance sodium/potassium ion batteries with enhanced capacities [J]. ACS Nano, 2017, 11(5):4792-4800.
- [14] Liu C, Wang L, Tang Y, *et al.* Vertical single or few-layer MoS₂ nanosheets rooting into TiO₂ nanofibers for highly efficient photocatalytic hydrogen evolution [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2015, 164:1-9. ■