

# Thermal Stability and Photocatalysis of a Novel Two-Dimensional MXene

Xiaohui Ding, Chunhu Li\*, Yingchun Li

Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong  
Email: [lichunhu@ouc.edu.cn](mailto:lichunhu@ouc.edu.cn)

Received: Sep. 5<sup>th</sup>, 2018; accepted: Sep. 19<sup>th</sup>, 2018; published: Sep. 26<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

Two-dimensional  $Ti_3C_2T_x$  nanosheet was obtained by exfoliation of raw  $Ti_3AlC_2$  powders. The accordion-like structure of as-prepared  $Ti_3C_2T_x$  nanosheet was confirmed by SEM, TEM and XRD. Thermal stability analysis suggested that the OH and F groups attached on the surface of  $Ti_3C_2T_x$  nanosheets could be eliminated by heat treatment. It is noteworthy that  $Ti_3C_2T_x$  nanosheet could react with  $O_2$  to produce a small quantity of  $TiO_2$  when heating up to  $200^\circ C$ . Furthermore,  $TiO_2/Ti_3C_2T_x$  heterojunction photocatalyst was built up by a Schottky barrier between the interfaces of  $TiO_2$  and  $Ti_3C_2T_x$ , and the photodegradation rate of Methyl orange could reach to 58.65%, which was effective to improve the photocatalytic ability than pristine  $Ti_3C_2T_x$ .

## Keywords

$Ti_3C_2T_x$ , Thermal Stability,  $TiO_2$ , Photocatalytic Ability

# 新型二维材料MXene热力学稳定性及光催化性能探究

丁小惠, 李春虎\*, 李迎春

中国海洋大学化学工程与技术教育部重点实验室, 山东 青岛  
Email: [lichunhu@ouc.edu.cn](mailto:lichunhu@ouc.edu.cn)

收稿日期: 2018年9月5日; 录用日期: 2018年9月19日; 发布日期: 2018年9月26日

## 摘要

本文采用HF刻蚀 $Ti_3AlC_2$ 材料制备新型二维 $Ti_3C_2T_x$ 材料, 并通过SEM、TEM和XRD对其微观结构进行探究。  
\*通讯作者。

究, 结果表明 $Ti_3C_2T_x$ 材料具有类手风琴的二维层状结构。另外, 本文采用热重分析对其热力学稳定性进行探究, 结果表明 $Ti_3C_2T_x$ 二维材料表面负载的-F和-OH官能团可通过煅烧处理去除。结合SEM和XRD结果可知, 在空气氛围下, 当温度高于 $200^{\circ}C$ 时,  $Ti_3C_2T_x$ 二维材料与 $O_2$ 反应生成 $TiO_2$ 光催化剂,  $TiO_2/Ti_3C_2T_x$ 复合光催化剂通过肖特基势垒形成异质结, 能够有效提高光生电子和空穴的复合率,  $TiO_2/Ti_3C_2T_x-200$ 复合光催化剂对甲基橙的降解率可达到58.65%, 拓宽了MXene材料在光催化领域的应用。

## 关键词

$Ti_3C_2T_x$ , 热力学稳定,  $TiO_2$ , 光催化活性

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前, 二维晶体材料如石墨烯、石墨相氮化碳、二硫化钼等由于具有较大的比表面积和优异的电子传导能力, 而被广泛应用于光催化降解有机物、光催化制氢和电化学领域[1]。石墨烯材料是目前研究最为广泛的一种二维材料, 它是一种由碳原子以 $sp^2$ 杂化轨道组成的二维蜂窝状结构的单原子层晶体, 其理论比表面积高达 $2630\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ , 电子迁移率高达 $200,000\text{ cm}^2\text{ v}^{-1}\text{ s}^{-1}$ 。但由于石墨烯层与层间的范德华力相对较弱, 且制备过程复杂等特点限制了其广泛应用[2]。

MXene 是一种新型二维过渡金属碳化物或碳氮化物, 2011 年 Naguib 等[3]利用 HF 选择性刻蚀掉三元层状金属间化合物  $Ti_3AlC_2$  中的金属 Al 层, 首次成功制备二维  $Ti_3C_2MXene$  材料。这类新型二维材料由  $M_{n+1}AX_n$  制备而来, 其中 M 代表早期过渡金属元素, A 主要为 III 或 IV 族元素, X 表示 C、N 元素, n 通常指 1、2、3 [4]。由于 MXene 材料具有类石墨烯结构, 具备良好的电子传导和储备能力, 因此目前已广泛应用于离子电池、超级电容器和生物探头等方面[5] [6] [7]。MXene 的化学通式为  $M_{n+1}X_nT_z$ , T 一般指 HF 刻蚀过程中其表面覆盖的 O、OH、F 基团, 这些官能团的存在可改变 MXene 材料的化学性质[4]。理论计算表明带有 F 和 OH 官能团的  $Ti_3C_2T_xMXene$  表现出明显的半导体特征, 可用作新型光催化剂材料 [6]。Feng 等[8]采用 HF 和  $NH_4HF_2$  刻蚀的方法制备  $Ti_3C_2$  二维材料, 探究在不同温度下  $Ti_3C_2$  的热力学稳定情况, 结果表明温度能够改变  $Ti_3C_2MXene$  材料的微观结构和化学性质。Peng 等[9]通过水热法制备 (111) $TiO_{2-x}/Ti_3C_2$  复合光催化剂, 在紫外光的照射下, 光催化降解亚甲基蓝的效果明显优于纯  $TiO_2$  材料。

本文采用经典 HF 蚀刻  $Ti_3AlC_2$  的方法成功制备  $Ti_3C_2T_x$  二维层状材料, 并通过热重分析研究不同温度下  $Ti_3C_2T_x$  材料微观结构的变化, 采用一步煅烧法制备  $TiO_2/Ti_3C_2T_x$  复合材料, 并通过降解染料甲基橙研究其光催化性能的变化。

## 2. 实验部分

### 2.1. $TiO_2/Ti_3C_2T_x$ 制备方法

本文选用  $Ti_3AlC_2$ (200 目, 北京福斯曼有限公司)作为反应原料, 采用 HF 选择性刻蚀方法制备  $Ti_3C_2T_x$ , 实验流程图如图 1 所示。首先, 取 5 g  $Ti_3AlC_2$  粉末浸入 100 mL 49%的 HF 溶液中, 充分搅拌后将温度升至  $60^{\circ}C$ 。反应 24 h 后, 将所得粉末用去离子水清洗至 pH 约为 7, 并用乙醇离心清洗三次, 最后将粉末在  $60^{\circ}C$  真空烘箱中干燥过夜, 最终得到  $Ti_3C_2T_x$  粉末。

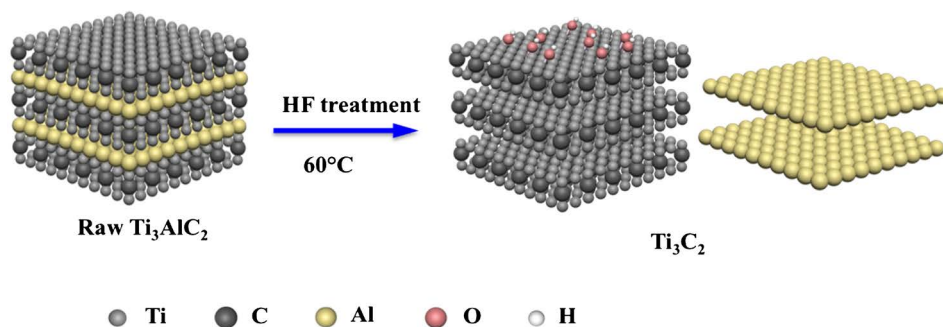
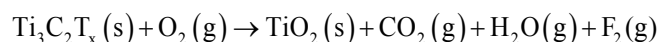


Figure 1. Schematic illustration of the synthesis process of  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$

图 1.  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  合成流程图

取 500 mg  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  粉末置于石英舟中, 以  $10^\circ\text{C min}^{-1}$  的升温速率由室温分别加热至  $200^\circ\text{C}$  和  $1000^\circ\text{C}$ , 并在以上温度下加热 1 min, 待样品自然冷却至室温, 制得  $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x-200$  和  $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x-1000$  样品, 其合成过程遵循以下化学反应方程式:



## 2.2. 光催化性能测试

光催化实验选用 300 W 氙灯作为光源, 光源位置在距离反应器上方 10 cm 处。在实验过程中, 取 50 mg 催化剂加入含有 100 mL 浓度为 10 mg/L 的甲基橙溶液中, 并使反应溶液的温度始终保持一致。实验首先进行 30 min 暗吸附过程, 使得光催化剂达到吸附平衡, 之后每隔 15 min 取 3 mL 溶液经离心分离提取上层清液, 利用紫外可见分光光度计在波长为 554 nm 处检测溶液吸光度的变化。最终根据 RhB 溶液的浓度变化来计算光催化活性。

## 2.3. 分析方法

样品的表明形貌通过扫描电子显微镜(SEM, 日本日立公司, TM-1000)进行分析; 采用 X 射线衍射仪(XRD, 德国 Bruker 公司, D8-Advance)对样品的晶格结构进行表征, 阳极靶 Cu 靶, 衍射波长  $1.5406 \text{ \AA}$ 。采用 Netzsch 热力分析系统(STA 449C)对样品热重(TG)和差热分析法(DTA)进行分析, 实验气氛为空气和氮气, 升温速率为  $10^\circ\text{C min}^{-1}$ 。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 结构与形貌表征

样品的表面形态及内部结构可通过 SEM 和 XRD 进行表征。图 2(a)和图 2(b)表示样品的 SEM 形貌图, 通过对比发现, 经 HF 刻蚀后的样品呈现明显的片层结构, 片层厚度约为 20~60 nm, 说明类手风琴结构的片层  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$  成功制备[10]。图 3 表示样品  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  和  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的 XRD 谱图, 由图可知,  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  经 HF 刻蚀后, 特征峰明显减弱, 某些晶面的特征峰消失。同时,  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  的衍射峰整体向小角度偏移, 其中 (002)晶面衍射峰由  $9.75^\circ$  降至  $8.91^\circ$ , (004)晶面衍射峰由  $19.17^\circ$  降至  $18.08^\circ$ , 并且出现在  $28.3^\circ$  出现(006)晶面衍射峰。以上结果表明  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  中键能较弱的 Ti-Al 金属键断裂, 新型二维  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$  结构形成[11]。另外,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的 XRD 谱图中观察到 TiC 的特征衍射峰, 这是由于  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  的原料中含有杂质 TiC 造成的。

### 3.2. 热重分析

图 4 表示在  $25^\circ\text{C}$  至  $1000^\circ\text{C}$  下  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  进行 TG 分析的结果, 对图中的  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$  气氛下的热重线和 DTA

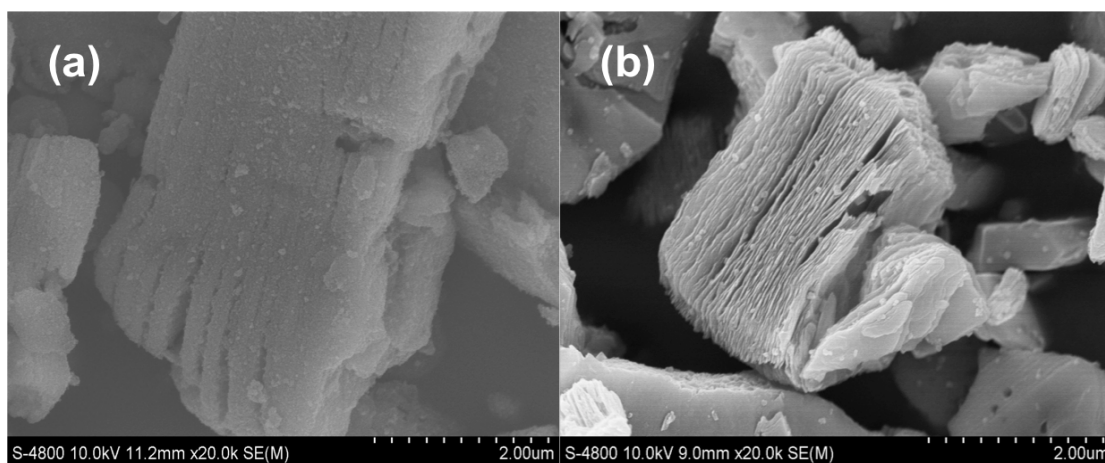


Figure 2. SEM images of (a)  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  and (b)  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$

图 2. (a)  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$  和 (b)  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  SEM 电镜图

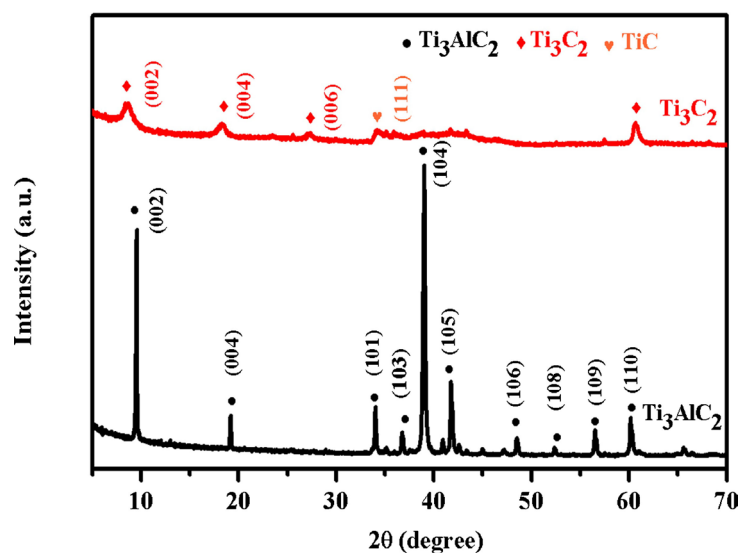


Figure 3. XRD patterns of as-prepared samples

图 3. 样品的 XRD 谱图

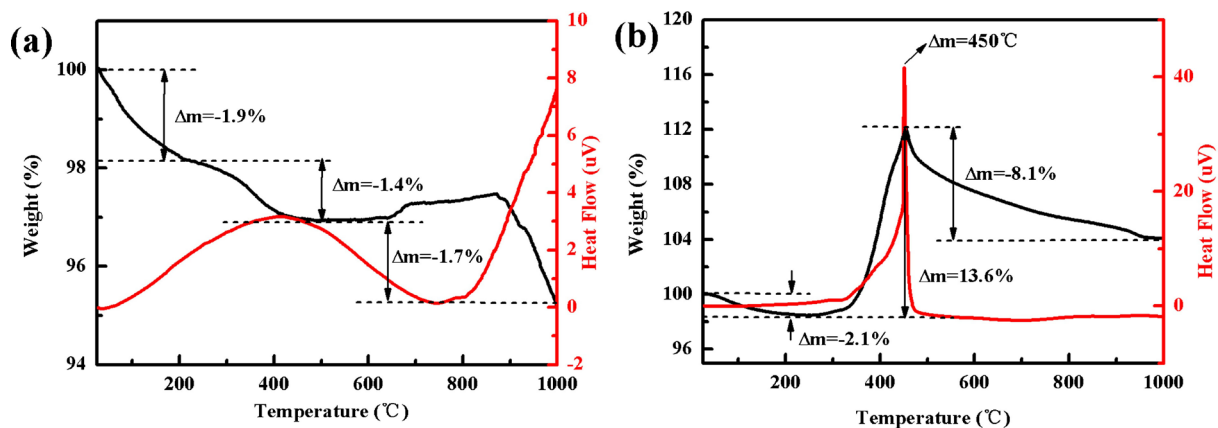


Figure 4. TG-DTA curves of  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  under  $\text{N}_2$  (a) and  $\text{O}_2$  (b) atmosphere

图 4.  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  在  $\text{N}_2$  (a) 和  $\text{O}_2$  (b) 氛围下的 TG-DTA 曲线

曲线分析可知,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的重量变化分为三个阶段。由图 4(a)可知, 在  $\text{N}_2$  气氛下,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  热解过程中共出现 3 个明显的失重阶段, 并未发生氧化反应。第一阶段从室温至  $200^\circ\text{C}$ , 失重质量分数为 1.9%; 第二阶段为  $200^\circ\text{C}$  至  $800^\circ\text{C}$ , 失重质量分数为 1.4%; 第三阶段为  $800^\circ\text{C}$  至  $1000^\circ\text{C}$ , 失重质量分数为 1.4%, 这一阶段 TG 曲线下落幅度较大, 对应 DTA 曲线中在  $800^\circ\text{C}$  附近的放热峰。在  $\text{O}_2$  气氛下, TG 曲线仍分为三个阶段。如图 4(b)所示, 第一阶段从室温至  $200^\circ\text{C}$  时质量损失 2.1%; 第二阶段在  $200^\circ\text{C}$  至  $450^\circ\text{C}$  时质量增加 13.6%, 其对应的 DTA 曲线中在  $450^\circ\text{C}$  附近存在一个非常强的放热峰; 第三阶段在  $450^\circ\text{C}$  至  $1000^\circ\text{C}$  时质量损失 8.1%。

图 5 表示在热分析仪高温工艺后  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  样品的 SEM 和 XRD 结果。图 5(a)是在  $\text{O}_2$  气氛下在  $200^\circ\text{C}$  热处理的  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  样品的 SEM 显微图, 图中仍然保留了  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  的二维片层结构, 对比图 2(b)可以明显观察到  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  二维片层结构的表面和边缘生成一些等轴的纳米颗粒, 其晶粒大小为  $100\text{ nm}^{-1}\ \mu\text{m}$ 。图 5(b)表示这些样品的 XRD 谱图。在  $\text{N}_2$  气氛下,  $200^\circ\text{C}$  热处理的样品与原样品具有相同的衍射峰, 仍保持  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  的二维结构。而经  $1000^\circ\text{C}$  热处理后, 在  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  被部分氧化形成少量的  $\text{TiO}_2$ , 因此可以明显检测到金红石相  $\text{TiO}_2$  的衍射峰。在  $\text{O}_2$  气氛中,  $200^\circ\text{C}$  时部分  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  被氧化生成大量的锐钛矿相和少量的金红石相  $\text{TiO}_2$ ;  $1000^\circ\text{C}$  时只能观察到金红石相的衍射峰。

本文中  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$  材料的 TG 检测结果与文献中表述的情况相符, 在  $\text{N}_2$  气氛下, 在非密闭反应器中进行的  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  热解反应可以分为三个反应阶段[12]:

第一反应阶段( $25^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$ ): 这一阶段的重量损失是由于  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  表面上物理吸附的  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{HF}$  热解而引起的; 第二反应阶段( $200^\circ\text{C}\sim 800^\circ\text{C}$ ): 随着反应温度升至  $800^\circ\text{C}$ ,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  表面吸附的  $-\text{OH}$  基团被氧化, 导致  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  质量损失; 第三反应阶段( $800^\circ\text{C}\sim 1000^\circ\text{C}$ ): 当温度高于  $800^\circ\text{C}$  时,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  开始失去 F 或 O 原子, 由于  $-\text{O}$  键能小于  $-\text{F}$  键能, 因此  $-\text{O}$  更易失去。

在  $\text{O}_2$  气氛下, 热处理的第一阶段是由于  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  表面物理吸附的  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{HF}$  损失而造成的重量损失。根据图 5(b)中 XRD 的结果可知, 与  $\text{O}_2$  反应生成锐钛矿或金红石相的  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  表层氧化形成锐钛矿相  $\text{TiO}_2$ , 该反应对应于 DTA 曲线中放热峰和 TG 曲线中剧烈的增重阶段。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  片层中新形成的  $\text{TiO}_2$  将  $\text{O}_2$  与未反应的  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  相间隔, 从而阻止了  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的进一步氧化, 同时抑制了氧化过程中  $\text{CO}_2$  的生成。因此产生了图 5(a)中锐钛矿相  $\text{TiO}_2$  晶体分布于具有导电性质的  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  二维片层结构中。由于  $\text{TiO}_2$  的光催化性质, 该结构可在光催化领域具有重要的研究意义和应用价值。

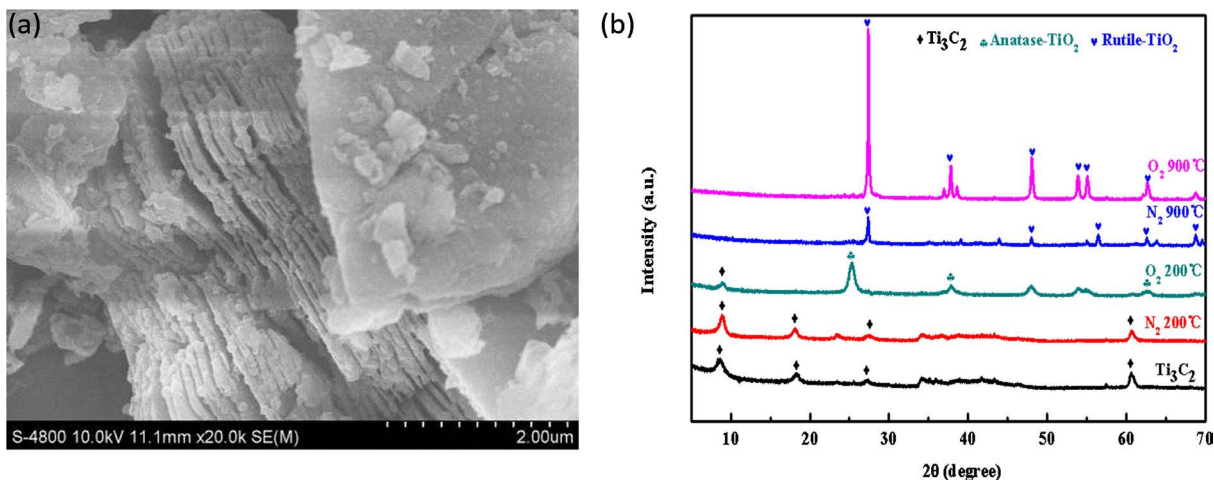


Figure 5. (a) SEM image of  $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x-200$ ; (b) XRD patterns of  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  heated at different temperature  
图 5. (a)  $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x-200$  的 SEM 电镜图; (b)  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  在不同温度煅烧下的 XRD 谱图

### 3.3. 光催化性能测试

$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  光催化性能可通过对有机染料甲基橙的降解效果来评估。如图 6 所示, 在紫外光照射下, 在反应体系中加入  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  情况下, 甲基橙降解率较低, 这主要因为表面负载 -O、-OH 或 -F 的  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene 材料带隙极低, 光生载流子的复合率高, 因此  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  光催化活性较弱[9]。在相同条件下,  $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -200 和  $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -1000 的降解效率分别为 58.65% 和 38.34%, 结果表明煅烧温度为 200℃ 时,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  自热解产物光催化活性最佳, 分析其原因可能是: 在空气氛围下, 当煅烧温度为 200℃ 时,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  氧化反应产生的  $\text{TiO}_2$  可与  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  形成肖特基势垒, 这一天然异质结有利于  $\text{TiO}_2$  光生电子与空穴的有效分离; 另一方面而言, 锐钛矿相与金红石相共存的  $\text{TiO}_2$  光催化效率较高, 这是因为不同晶面产生的异质结结构进一步抑制了光生载流子的复合效率, 这些原因都有利于  $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -200 复合光催化剂光催化效率的增大。

根据以上实验结果, 图 7 对  $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的催化机理进行推测: 在紫外光的照射下,  $\text{TiO}_2$  被激发产生光生电子和空穴, 由于  $\text{TiO}_2$  导带的电负性比  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的费米能级更低, 且表面负载 -OH、-O、-F 的  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  材料为电子吸附提供了活性位点, 因此,  $\text{TiO}_2$  导带上的电子能够迁移至  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  表面, 直至它们的费米能

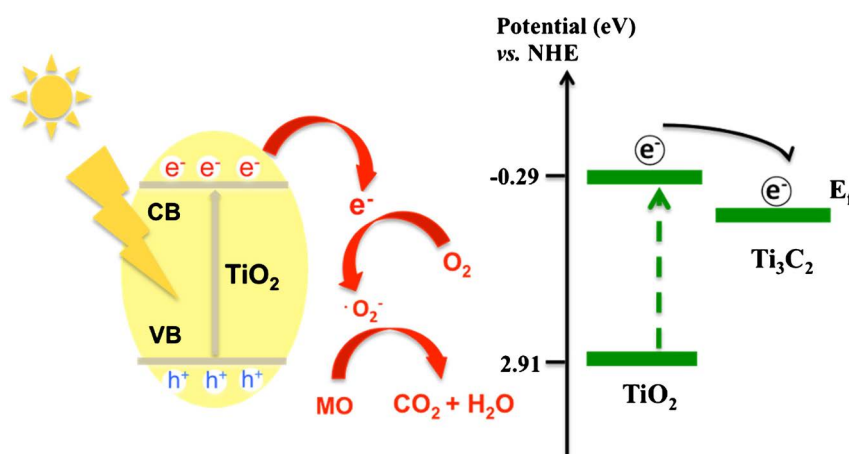


Figure 6. Schematic illustration of the charge transfer and separation in  $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$

图 6.  $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  光催化过程示意图

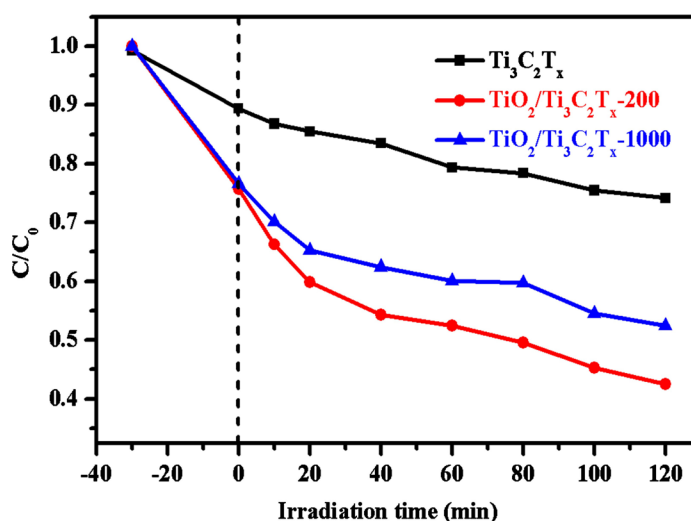


Figure 7. Degradation efficiency graph of samples

图 7. 样品的光催化效果图

级相同；另外， $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 具有类金属性质，功函数为1.8 eV，因此 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 可与n型半导体 $\text{TiO}_2$ 之间形成肖特基势垒，促进电子由 $\text{TiO}_2$ 向 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 的单向流动，有效促进光生电子与空穴的分离率。分离后的光生电子能够与 $\text{O}_2$ 反应生成 $\text{HO}_2\cdot$ 和 $\text{O}_2\cdot$ 等活性自由基，光生空穴能够与催化剂表面吸附的-OH和 $\text{H}_2\text{O}$ 反应生成 $\cdot\text{OH}$ ，这些活性自由基能够直接与罗丹明B发生反应，使其最终降解为 $\text{CO}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O}$ 。

#### 4. 结论

本文通过TG和DTA对具有二维层状结构的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 材料进行热稳定性进行分析，结果表明 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 表面物理吸附和化学吸附的-F和-OH等官能团可通过煅烧方法去除，当温度达到 $200^\circ\text{C}$ 时， $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 可与 $\text{O}_2$ 发生氧化反应生成锐钛矿相和金红石相 $\text{TiO}_2$ 。 $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合光催化剂可通过一步煅烧的方法获得，其光催化降解甲基橙的效果可达到58.65%，这是因为 $\text{TiO}_2$ 与 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 表面形成肖特基势垒，这种异质结结构能够有效促进光生电子和空穴的分离，从而有效提高光催化效率。

#### 基金项目

本论文得到了国家自然科学基金(51602297)、山东省重点研究项目(2016ZDJS11A04)、燃煤锅炉烟气光催化与 $\text{H}_2\text{O}_2$ 氧化脱硫脱硝中试技术与开发(17-3-3-71-nsh、20173702021476)以及高浓度有机废水吸附剂(活性焦)生产工艺开发(20170093)项目的资助与支持。

#### 参考文献

- [1] Li, X., Shen, R., Ma, S., *et al.* (2018) Graphene-Based Heterojunction Photocatalysts. *Applied Surface Science*, **430**, 53-107. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.08.194>
- [2] Cano, M., Khan, U., Sainsbury, T., *et al.* (2013) Improving the Mechanical Properties of Graphene Oxide Based Materials by Covalent Attachment of Polymer Chains. *Carbon*, **52**, 363-371. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.09.046>
- [3] Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., *et al.* (2011) Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ . *Advanced Materials*, **23**, 4248-4253. <https://doi.org/10.1002/adma.201102306>
- [4] Lukatskaya, M.R., Mashtalir, O., Ren, C.E., *et al.* (2013) Cation Intercalation and High Volumetric Capacitance of Two-Dimensional Titanium Carbide. *Science*, **341**, 1502-1505. <https://doi.org/10.1126/science.1241488>
- [5] Xue, Q., Zhang, H., Zhu, M., *et al.* (2017) Photoluminescent  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  Mxene Quantum Dots for Multicolor Cellular Imaging. *Advanced Materials*, **29**, 1604847. <https://doi.org/10.1002/adma.201604847>
- [6] Naguib, M., Mochalin, V.N., Barsoum, M.W., *et al.* (2014) 25th Anniversary Article: Mxenes: A New Family of Two-Dimensional Materials. *Advanced Materials*, **26**, 992-1005. <https://doi.org/10.1002/adma.201304138>
- [7] 王冰心, 周爱国, 刘凡凡, 等. 二维晶体Mxene在气体吸附/转化领域的应用[J]. 人工晶体学报, 2018(2): 374-381.
- [8] Feng, A., Yu, Y., Jiang, F., *et al.* (2017) Fabrication and Thermal Stability of  $\text{NH}_4\text{HF}_2$ -Etched  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  Mxene. *Ceramics International*, **43**, 6322-6328. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.02.039>
- [9] Peng, C., Yang, X., Li, Y., *et al.* (2016) Hybrids of Two-Dimensional  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  and  $\text{TiO}_2$  Exposing {001} Facets toward Enhanced Photocatalytic Activity. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 6051. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b11973>
- [10] Yang, C., Liu, Y., Sun, X., *et al.* (2018) In-Situ Construction of Hierarchical Accordion-Like  $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2$  Nanohybrid as Anode Material for Lithium and Sodium Ion Batteries. *Electrochimica Acta*, **271**, 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.03.118>
- [11] Cao, S., Shen, B., Tong, T., *et al.* (2018) 2D/2D Heterojunction of Ultrathin Mxene/ $\text{Bi}_2\text{WO}_6$  Nanosheets for Improved Photocatalytic  $\text{CO}_2$  Reduction. *Advanced Functional Materials*, **28**, 1800136. <https://doi.org/10.1002/adfm.201800136>
- [12] Wang, K., Zhou, Y., Xu, W., *et al.* (2016) Fabrication and Thermal Stability of Two-Dimensional Carbide  $\text{Ti}_3\text{C}_2$  Nanosheets. *Ceramics International*, **42**, 8419-8424. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.02.059>

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8844，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjcet@hanspub.org](mailto:hjcet@hanspub.org)