

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.01.003

酚醛树脂 / $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 导电复合材料制备与性能

洪雨宁¹, 张翼², 吴波¹

(1. 中电科芜湖钻石飞机制造有限公司, 安徽芜湖 241000; 2. 南京工业大学, 南京 210009)

摘要: 通过氢氟酸溶液刻蚀 Ti_3AlC_2 MAX 粉末制得 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 纳米片。然后, 采用溶液共混的方法制备了酚醛树脂 / $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 导电复合材料。通过 X 射线衍射、扫描电子显微镜等手段对其结构、微观形貌及性能进行表征。结果表明: $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 纳米片均匀分散在酚醛树脂里面, 形成良好的导电通路。探讨 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 纳米片的用量对复合材料的导电性能和力学性能的影响。结果表明: 酚醛树脂 / $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 导电复合材料的电导率, 冲击强度和拉伸强度随 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 纳米片含量的增加而逐渐增加; 当 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 纳米片的含量为 1.2% 时, 酚醛树脂 / $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 导电复合材料的综合性能最优, 此时酚醛树脂 / $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 导电复合材料的电导率为 $4.36 \times 10^{-4} \text{ S/m}$, 冲击强度和弯曲强度分别为 23.9 kJ/m^2 和 65.9 MPa 。

关键词: $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$; 酚醛树脂; 电导率; 复合材料

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)01-0013-05

Preparation and Properties of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ / Phenolic Resin Electrically Conductive Composites

Hong Yuning¹, Zhang Yi², Wu Bo¹

(1. CETC Wuhu Diamond Aircraft Manufacture Co., Ltd, Wuhu 241000, China;

2. Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract : HF was used to etch Ti_3AlC_2 MAX to synthesize $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ nanosheets and a novel electrically conductive composite based on phenolic resin filled with $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ nanosheets were prepared by solution blending. The structure, morphology and performance of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ nanosheets and epoxy / $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ nanosheets composite were investigated by X-ray diffraction, scanning electron microscope. The results show that $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ possesses nanosheet structure. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ nanosheets are homogeneously dispersed in phenolic resin. The effect of the amount of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ nanosheet on the conductivity and mechanical properties of the composite was discussed. Electrical conductivity and mechanical properties measurements reveal that phenolic resin / $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ nanosheets composite exhibited both good electrical conductivity ($4.36 \times 10^{-4} \text{ S/m}$) and favorable mechanical properties (tensile strength of 65.9 MPa and impact strength of 23.9 kJ/m^2) when the content of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ nanosheets is 1.2%.

Keywords : $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$; phenolic resin; electrical conductivity; composite

随着经济的快速发展, 现代工业对石油等能源的需求也越来越多。炼油罐是石油工业中很重要的一种设备。在石油产品储存过程中, 酸性的石油产品会腐蚀炼油罐, 造成石油泄漏。另外, 在石油产品运输过程中, 石油产品与炼油罐摩擦产生静电, 静电积累到一定程度易使石油产品起火燃烧, 危及安全。因此, 为了避免炼油罐的腐蚀和静电引起的事故, 我们需要使用防腐导电涂料^[1-5]。

目前, 市面上的防腐导电材料主要以环氧树脂为基体材料, 金属或者碳材料为导电填料^[6-9]。环

氧树脂在 100°C 以上时容易发生化学键断裂, 所以环氧树脂基防腐导电材料的使用温度有限, 不能满足较高温度场所的需求。相比环氧树脂, 酚醛树脂具有耐高温、力学性能优异的特点, 可以满足大多数油品炼制的温度要求^[10-12]。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 是一种新型二维材料, 具有优异的导电性能, 以 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 为导电填料可以有效地提高复合材料的导电性能。因此, 笔者以 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 纳米片为填料, 采用搅拌混合的方法制备酚醛树脂 / $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ 导电复合材料。采用 X 射线衍射

通讯作者: 吴波, 高级工程师, 主要从事通用飞机复合材料研究 E-mail: wub@cetcd.com

收稿日期: 2019-11-05

引用格式: 洪雨宁, 张翼, 吴波. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ / 酚醛树脂导电复合材料制备与性能 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(1):13-17.

Hong Yuning, Zhang Yi, Wu Bo. Preparation and properties of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ / phenolic resin electrically conductive composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):13-17.

(XRD) 仪和扫描电子显微镜 (SEM) 研究复合材料的组成与复合材料电导率和力学性能随 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 用量的变化规律。

1 实验部分

1.1 主要原材料

苯酚、甲醛: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司;

$\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{MAX}$ 粉末: 粒径 $5 \sim 10 \mu\text{m}$, 吉林一一科技有限公司;

氢氟酸 (HF): 质量分数 40%, 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要设备及仪器

XRD 仪: X' PertMPD PRO 型, 荷兰 PANalytical 公司;

SEM: JEOL JSM-4320LV 型, 荷兰 FEI 公司;

冲击试验机: BC-100 型, 深圳新三思材料检测有限公司;

电子万能拉伸试验机: CMT4104 型, 深圳新三思材料检测有限公司;

四探针电导率分析仪: TS-11 型, 上海晨华公司;

真空干燥箱, DZF-5040 型, 上海市恒科学仪器有限公司。

1.3 试样制备

(1) 酚醛树脂的合成。

将物质的量比为 1 : 12 的苯酚、甲醛混合溶液倒入三口烧瓶中混合均匀, 加入混合溶液总质量 5% 的氢氧化钠, 在 85°C 下反应 5 h, 减压蒸馏去除水分, 冷却至室温得到酚醛树脂。

(2) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 的制备。

将 2 g $\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{MAX}$ 粉末加入 25 mL 40% HF 溶液中, 在 45°C 下磁力搅拌 24 h。多次离心处理 (6000 r/min , 10 min), 将洗涤的粉末在 60°C 条件下真空干燥 12 h, 即得 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 多层结构粉体, 然后所得粉体超声处理 8.0 h, 多次离心处理 (6000 r/min , 10 min)。将洗涤的粉末在 60°C 条件下真空干燥 12 h, 即得 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片。

(3) 酚醛树脂 / $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 导电复合材料的制备。

将 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片分散在乙醇中, 然后加入酚醛树脂用均质搅拌机进行搅拌, 将 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片分散到酚醛树脂中, 再放入真空干燥箱中连续抽真空除去溶剂, 接着倒入模具中 200°C

下固化 2.0 h, 制得固态酚醛树脂 / $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 酚醛树脂复合材料。

1.4 性能测试

XRD 测试: 测试条件为 K_α 射线、Cu 靶、扫描速度 $5^\circ/\text{min}$ 、管电压为 20 kV、管电流为 20 mA, 测试范围 $5^\circ \sim 90^\circ$ 。

SEM 分析: 对试样断面形貌进行分析, 加速电压 20 kV。

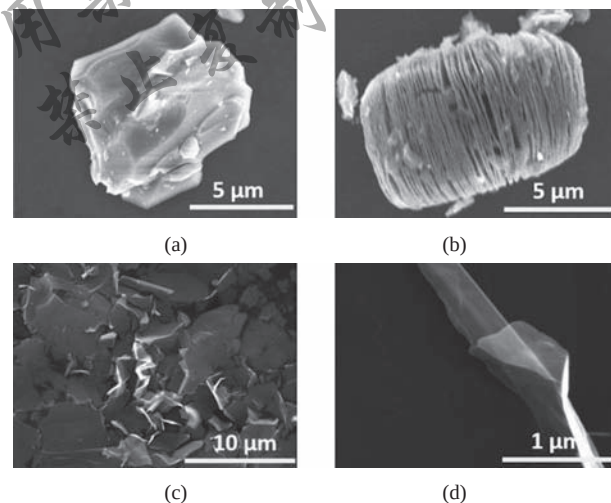
电导热率测试: 用四探针电导率分析仪进行测试, 试样规格为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。

冲击性能测试: 按照 GB/T1043-1993 标准进行测定。

弯曲性能测试: 按照 GB/T9341-2000 标准进行测定。

2 结果与讨论

图 1 为 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{MAX}$, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 粉体、 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片的微观形貌图。



a— $\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{MAX}$; b— $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 粉体;

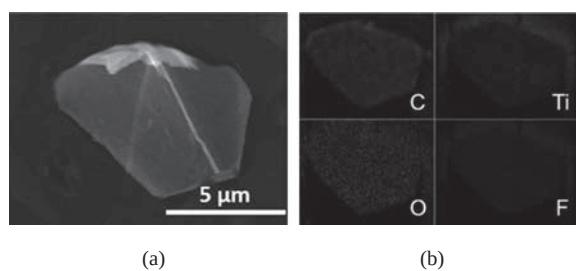
c, d— $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片 ($\times 5000$, $\times 35000$)

图 1 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{MAX}$, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 的 SEM 分析

图 1a 为 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{MAX}$ 的 SEM 图, 从图 1a 可以看到, $\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{MAX}$ 的粒径为 $5 \mu\text{m}$, 整体为密实形态的粒子。图 1b 为 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 粉体的 SEM 图, 而从图 1b 中可看到, 被刻蚀后形成的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 粒径大小没有发生改变, 为多层结构的“手风琴”形貌, 证明铝层从 $\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{MAX}$ 中被成功地除去。其层与层之间的距离为 200 nm, 层间距较大, 有利于超声剥离形成纳米片。图 1c、图 1d 为 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片的 SEM 图, 电镜图片显示超声处理成功地制备了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片, 其厚度大约为 10 nm, 径厚比 500, 如此大的径厚比有利

于形成良好的导电通路。

为分析 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片的元素含量,对 Ti₃C₂T_x MXene 进行能谱分析。图 2 为单片 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片的扫描电镜图和元素分布图。从图 2 中可以看出, Ti₃C₂T_x MXene 纳米片主要是由 Ti, C, F, O 元素组成。C 和 Ti 来源于 Ti₃AlC₂, 存在 F 元素是因为 Al 原子被 F 原子所取代, O 元素证明存在丰富的一OH 基团。表 1 为 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片的 EDS 元素含量分析。从表 1 可知, Ti₃C₂T_x MXene 纳米片含 11.0% C, 69.0% Ti, 11.1% O, 7.8% F 和 1.1% Al, 成功地制备了 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片。



a—SEM 图; b—元素分析

图 2 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片的 SEM 图及元素分析

表 1 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片的元素含量

元素	原子含量 %	质量百分比 %
C	27.4	11.0
Ti	40.8	69.0
O	19.0	11.1
F	11.6	7.8
Al	1.2	1.1

图 3 为 Ti₃AlC₂ MAX 和 Ti₃C₂T_x MXene 的 XRD 谱图。Ti₃AlC₂ MAX 的 XRD 曲线在 9.5°, 19.0°, 34.0°, 36.8°, 38.8°, 41.9°, 45.1°, 48.5°, 52.7°, 56.6° 和 60.2° 处的峰对应 Ti₃AlC₂ MAX 的 (002), (004), (101), (103), (104), (105), (106), (107), (108), (109) 和 (110) 晶面^[13]。氢氟酸刻蚀后, 36.9°, 38.9°, 42.0° 处的峰消失, 因为铝被刻蚀了。位于 9.5° 处的特征峰向低角度变化, 说明 Ti₃C₂T_x MXene 晶面间距增大, 片层厚度变薄。

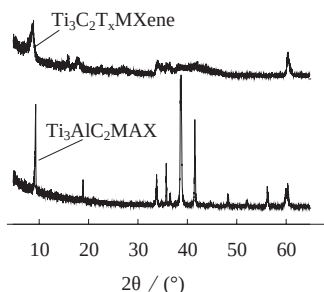
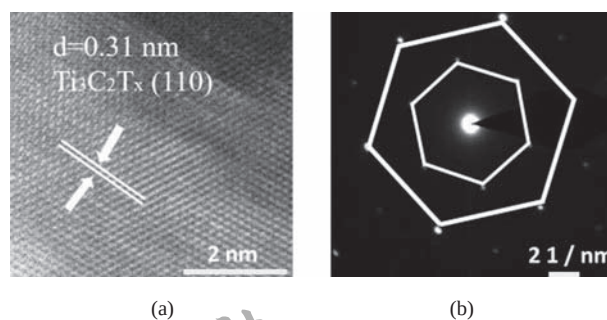


图 3 Ti₃AlC₂ MAX (a) 和 Ti₃C₂T_x MXene (b) 的 XRD 分析

为进一步确认 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片的结构, 对 Ti₃C₂T_x MXene 进行高分辨率的透射电镜测试, 图 4a 是 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片的高分辨率的透射电镜图像, 从中可以清晰地看到晶格间距为 0.31 nm, 与 Ti₃C₂T_x MXene(110) 晶面间距一致^[14]。图 4b 是选区电子衍射图案 (SAED), 两个清晰的正六边形衍射图案说明 Ti₃C₂T_x MXene 是一种结晶性很好的晶体。



(a) (b)

a—透射电镜分析; b—电子衍射图案

图 4 Ti₃C₂T_x MXene 的透射电镜分析和电子衍射图案

为了分析 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片含量对酚醛树脂/Ti₃C₂T_x MXene 导电复合材料电导率的影响, 制备了填充量为 0% 到 1.6% 的一系列酚醛树脂/Ti₃C₂T_x MXene 导电复合材料, 并测量其电导率如图 5 所示。

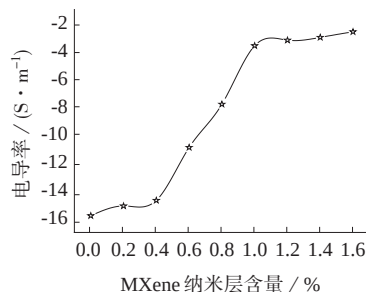


图 5 不同 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片填充量时材料电导率

从图 5 可以看出, 纯酚醛树脂的电导率仅为 $1.03 \times 10^{-16} \text{ S/m}$, 说明酚醛树脂是绝缘体。随着 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片含量的增加, 酚醛树脂/Ti₃C₂T_x MXene 导电复合材料的电导率逐渐增大。开始时酚醛树脂/Ti₃C₂T_x MXene 导电复合材料的电导率增大的幅度较小, Ti₃C₂T_x MXene 纳米片的含量由 0% 增加到 0.4%, 酚醛树脂/Ti₃C₂T_x MXene 导电复合材料的电导率由 $1.03 \times 10^{-16} \text{ S/m}$ 增加到 $1.12 \times 10^{-15} \text{ S/m}$, 电导率只增大了约 1 个数量级。随着 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片含量的进一步增加, 酚醛树脂/Ti₃C₂T_x MXene 导电复合材料的电导率就迅速增大。Ti₃C₂T_x MXene 纳米片的含量为 1.0%

时,酚醛树脂/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 导电复合材料的电导率达到 $1.81 \times 10^{-6} \text{ S/m}$, 比 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片含量为 0.4% 时的酚醛树脂/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 导电复合材料的电导率增大了将近 9 个数量级。填料的含量接着增加,酚醛树脂/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 导电复合材料的电导率进一步增大,但是增大的幅度不大。当 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片的含量为 1.2% 时,酚醛树脂/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 导电复合材料的电导率达 $4.36 \times 10^{-4} \text{ S/m}$ 。当 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片的含量小于 0.4% 时, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片含量少,酚醛树脂/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 导电复合材料的电导率主要是由纯酚醛树脂的导电性能决定,因此酚醛树脂/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 导电复合材料的电导率随填料含量增加而增大的幅度较小。随着 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片含量的进一步增加, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片在酚醛树脂中逐渐形成相互连通的导电网络,酚醛树脂/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 导电复合材料的电导率就由 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片的导电性能决定,因此酚醛树脂/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 导电复合材料的电导率显著增大。随后酚醛树脂/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 导电复合材料的电导率进一步增大,但增幅不大的原因是酚醛树脂/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 导电复合材料中已经形成了较完善的导电通路。

$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片作为导电填料,不仅可以提高复合材料的电导率,同时可以提高复合材料的力学性能,如图 6 所示。

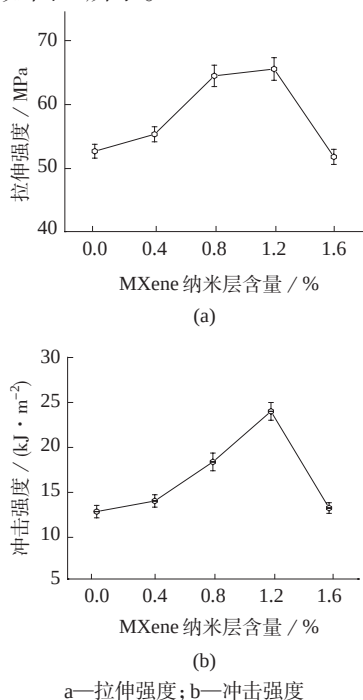


图 6 不同 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片填充量时材料力学性能

由图 6 可知,随着 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片含量的增加,复合材料的拉伸强度和冲击强度先增加后下降,纯酚醛树脂的拉伸强度为 52.8 MPa,冲击强度为 12.6 kJ/m^2 ,而当 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片含量为 1.2% 时,冲击强度和弯曲强度分别提升至 65.9 MPa 和 23.9 kJ/m^2 。复合材料的拉伸强度和冲击强度主要由内聚力决定,酚醛树脂的内聚力越大,其拉伸强度和冲击强度就越大。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片的加入可以与酚醛树脂形成氢键,增大基体分子的刚性,提高内聚力,所以随着 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片含量的增加,复合材料的拉伸强度和冲击强度增加。但是,当 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片含量大于 1.2% 后, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片容易团聚,从而导致强度下降。图 7a~图 7d 分别为 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片含量为 0.4%, 0.8%, 1.2%, 1.6% 的酚醛树脂/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 导电复合材料冲击断面的 SEM 图。

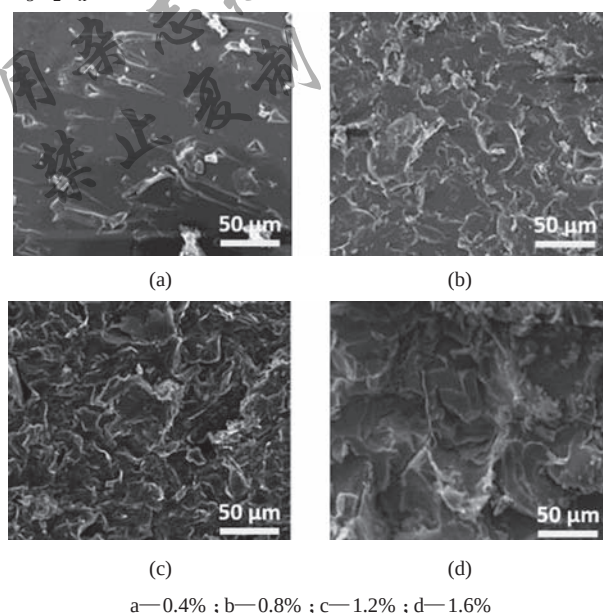


图 7 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片不同含量时复合材料冲击断面 SEM 图

从图 7a 可以看到,酚醛复合材料其断面都有类似河流状的条纹,这是典型热固性树脂的特征。添加 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片后,复合材料断面变粗糙,且随着 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片含量增加,复合材料断面粗糙程度增加。从图 7a~图 7c 可以看出,当 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片含量为 0.4%, 0.8%, 1.2% 时, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片均匀分散在酚醛树脂中,且与酚醛树脂形成氢键,从而增大界面作用,在载荷作用下通过界面破坏达到消耗缓冲部分能量,进而提高复合材料的力学性能。图 7d 显示当含量增加至 1.6% 时, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 纳米片出现了团聚现象,因此造成复合材料强度下降。

3 结论

(1) 以 Ti₃AlC₂ MAX 为原材料,采用氢氟酸溶液刻蚀制得 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片,SEM, XRD 测试结果表明:Ti₃C₂T_x MXene 纳米片高度结晶,径厚比为 500。

(2) 采用物理共混的方法制备了酚醛树脂/Ti₃C₂T_x MXene 导电复合材料,SEM 测试结果表明:Ti₃C₂T_x MXene 纳米片均匀分散在酚醛树脂里面,形成良好的导电通路。

(3) 酚醛树脂/Ti₃C₂T_x MXene 导电复合材料的电导率,拉伸强度和冲击强度随 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片含量的增加而逐渐增大。当 Ti₃C₂T_x MXene 纳米片含量为 1.6% 时,酚醛树脂/Ti₃C₂T_x MXene 导电复合材料的综合性能最优,此时电导率为 4.36×10^{-4} S/m,弯曲强度和冲击强度分别为 65.9 MPa 和 23.9 kJ/m²。

参考文献

- [1] 程红红,张仁坤,赵晓栋,等.大型原油储罐静电涂料的研究进展[J].电镀与涂饰,2017,36(10):514-519.
Cheng Honghong, Zhang Renkun, Zhao Xiaodong, et al. Research progress of electrostatic conductive coatings for large crude oil tank[J]. Electropating and Finishing, 2017, 36(10):514-519.
- [2] Zhou Peng, Liang Jinming, Zhang Fei, et al. Influence of chromium on corrosion behavior of low-alloy steel in cargo oil tank O₂-CO₂-SO₂-H₂S wet gas environment[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2015, 22(7): 630-637.
- [3] El-Ghaffar M A A, Abdel-Wahab N A, Sanad M A, et al. High performance anti-corrosive powder coatings based on phosphate pigments containing poly(o-aminophenol)[J]. Progress in Organic Coatings, 2015, 78:42-48.
- [4] Liu Weiming, Zhou Qingjun, Li Liaoshao, et al. Effect of alloy element on corrosion behavior of the huge crude oil storage tank steel in seawater[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 598:198-204.
- [5] 米伟娟,李志广,贾金娜.黑色耐磨防腐导电涂料的研制[J].电镀与涂饰,2012,31(6):56-58.
Mi Weijuan, Li Zhiguang, Jia Jinna. Preparation of black wear-resistant and corrosion protective conductive coating[J]. Electropating and Finishing, 2012, 31(6):56-58.
- [6] Yang Zhengqing, Wang Lida, Sun Wen, et al. Superhydrophobic epoxy coating modified by fluorographene used for anti-corrosion and self-cleaning[J]. Applied Surface Science, 2017, 401:146-155.
- [7] Qiu Shihui, Chen Cheng, Zheng Wenru, et al. Long-term corrosion protection of mild steel by epoxy coating containing self-doped polyaniline nanofiber[J]. Synthetic Metals, 2017, 229: 39-46.
- [8] Zhang Fan, Qian Hongchang, Wang Luntao, et al. Superhydrophobic carbon nanotubes/epoxy nanocomposite coating by facile one-step spraying[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 341: 15-23.
- [9] Shen Wenning, Feng Lajun, Liu Xiao, et al. Multiwall carbon nanotubes-reinforced epoxy hybrid coatings with high electrical conductivity and corrosion resistance prepared via electrostatic spraying[J]. Progress in Organic Coatings, 2016, 90:139-146.
- [10] Li Zhongping. Major advancement and development trends of TPS composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2011, 28(2):1-9.
- [11] Li Shan, Chen Fenghua, Zhong Boxing, et al. Structure and improved thermal stability of phenolic resin containing silicon and boron elements[J]. Polymer Degradation and Stability, 2016, 133(11):321-329.
- [12] Hirano K, Asami M. Phenolic resins-100 years of progress and their future[J]. Reactive & Functional Polymers, 2013, 73(2):256-269.
- [13] Ahmed B, Anjum D H, Gogotsi Y, et al. Atomic layer deposition of SnO₂ on MXene for Li-ion battery anodes[J]. Nano Energy, 2017, 34:249-256.
- [14] Zhang Youquan, Guo Bingshu, Hu Linyu, et al. Synthesis of SnS nanoparticle-modified MXene (Ti₃C₂T_x) composites for enhanced sodium storage[J]. J Alloy Compd, 2018, 732:448-453.

欢迎订阅 2020 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

欢迎广大读者到当地邮政局(所)订阅 2020 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志,订阅杂志及合订本光盘及过期刊物的读者可直接向杂志社办理订阅。《工程塑料应用》为月刊,大 16 开本,每月 10 日出版,2020 年定价 20 元/期,全年 240 元。《化学分析计量》为双月刊,大 16 开本,单月 20 日出版,2020 年定价 20 元/期,全年 120 元。

电话:(0531)85878223 85878057 传真:(0531)85947355