文章编号:1673-9981(2022)02-0269-06

# 二维碳化钛/多孔碳纤维的制备及性能研究

## 段维振,张海燕,张尚尚

(广东工业大学材料与能源学院,广东广州 510006)

摘 要:以聚丙烯腈(PAN)为碳源,聚苯乙烯微球为造孔剂,采用静电纺丝法合成二维碳化钛/PAN复合
纤维(MXene/PAN Fibers),通过焙烧处理后得到二维碳化钛/多孔碳纤维(Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/PCNF)复合材料。利用扫描电子显微镜、X射线衍射仪、透射电子显微镜、比表面分析仪及电化学工作站等对其进行微观结构表
征和电化学性能测试。结果表明:Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/PCNF复合材料的比表面积为294 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>,孔径分布集中在50~
100 nm之间,少层 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>纳米薄片锚定在碳纤维中;Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/PCNF作为电极材料具有优异的电化学性
能,在1A·g<sup>-1</sup>的电流密度下比容量为292 F·g<sup>-1</sup>,当电流密度升至10 A·g<sup>-1</sup>时其比容量仍高达169 F·g<sup>-1</sup>,
这主要得益于复合多孔碳纤维具有优良的电化学阻抗特性。因此,二维碳化钛/多孔碳纤维(Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/PCNF)复合材料在过滤、吸波以及催化等方面具有极大的发展潜力。
关键词:二维碳化钛/多孔碳纤维;静电纺丝;电极材料;电化学性能
中图分类号:TM53

**引文格式:**段维振,张海燕,张尚尚. 二维碳化钛/多孔碳纤维的制备及性能研究[J]. 材料研究与应用,2022,16(2):269-274. DUAN Weizhen, ZHANG Haiyan, ZHANG Shangshang. Preparation and Properties of Two Dimensional Titanium Carbide/ Porous Carbon Fibers[J]. Materials Research and Application,2022,16(2):269-274.

MXenes 是一类过渡金属碳化物/氮化物的总称<sup>[1]</sup>。MXenes 材料是由 MAX 相刻蚀而成,其中 M 为过渡金属元素,A为金属元素,X为碳,氮或碳氮 元素<sup>[2]</sup>。MXenes 材料一般用通式 M<sub>n+1</sub>X<sub>n</sub>T<sub>x</sub>,其中 n=1、2或3。式中 M 代表过渡金属,如 Ti、V、Mo 等;X则表示为碳,氮或碳氮元素;而 T<sub>x</sub>是指材料表 面的各种官能基团,如一OH、一F、一O等<sup>[34]</sup>。 MXenes 因具有优异的物理与化学性能被广泛应用 于各领域<sup>[5-6]</sup>,在超级电容器电极材料方面其也有着 独特的优势,如超高的电导率(15000 S·cm<sup>-1</sup>)、较高 的比表面积及优异的电化学活性等<sup>[7]</sup>。

最近已经有了一些将 MXenes负载在纤维上并应用于储能方面的相关工作,主要分为两类:一类为将 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>MXene 涂覆在碳纤维上运用于柔性储能器件<sup>[8-9]</sup>,所制备的电极材料经多次弯折、扭曲后,纤维表面 MXenes 不可避免产生脱落,严重影响其电化学性能;另一类为利用静电纺丝方法将 MXenes 嵌入碳纤维内部<sup>[10-14]</sup>,以此解决纯 MXenes 材料因循

环过程中发生堆叠,以及团聚影响其循环性能与比容量等问题,然而外层碳纤维的存在而影响电解液中离子与 MXenes 相互作用,从而影响其电化学性能。

利用静电纺丝法将 MXenes 嵌入多孔纳米碳纤 维中,一方面解决了纯 MXenes 材料因循环过程中 发生堆叠、团聚问题,另一方面可以增加材料比表面 积及 MXene 与电解液的接触几率,利于 MXene 对 电解液中离子的吸附。而将 MXenes 嵌入多孔碳纤 维运用于储能领域中,目前尚未见文献报道。基于 此,利用静电纺丝法简单的将 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>纳米薄片嵌入 多孔纳米碳纤维中,制备了 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/多孔纳米碳纤 维(PCNF)复合电极材料,并研究了其电化学性能。

## 1 实验部分

## 1.1 实验原料

原料包括有聚丙烯腈(分析纯,麦克林)、氢氟酸

收稿日期:2021-04-06

作者简介:段维振(1994-),男,江西省景德镇人,硕士,主要研究方向为材料工程,E-mail:1390493741@qq.com。

(分析纯,国药集团)、钛碳化铝(含量98%,北京伊 诺凯)、过硫酸钾(分析纯,国药集团)和聚苯乙烯(粒 径大约80 nm)。

## 1.2 MXene纳米薄片的制备

首先将5g粒径小于75µm的钛碳化铝 (Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>)MAX相陶瓷粉体研磨,然后加入到120 mL的质量分数为40%的氢氟酸溶液中,刻蚀12h 后进行离心、清洗,直至上层清液pH值接近中性 (6~7)。将去离子水转成N,N-二甲基甲酰胺 (DMF),使用超声波细胞粉碎仪冰水超声4h,使用 去离子水离心、清洗3~5次,并在3500 r·min<sup>-1</sup>的转 速下离心5min,收集上层溶液后冷冻干燥,获得尺 寸小于500 nm的少层Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>纳米薄片。

## 1.3 MXene/多孔碳纤维的制备

将1g的聚丙烯腈(PAN)加入到9g的N,N-二 甲基甲酰胺(DMF)溶液中,80℃恒温磁力搅拌2h, 然后称取0.5g的碳化钛粉末和一定量的PS微球加 人上述PAN溶液中,磁力搅拌4h后采用静电纺丝 技术制备出碳化钛/聚合物纤维。将收集到的碳化 钛/聚合物纤维置于烘箱中干燥过夜,然后在惰性气 体(如氩气、氮气等)气氛中加热至200℃,保温2h 后进行预氧化,再以3℃·min<sup>-1</sup>的升温速率升温至 600 ℃并保温2h,最后得到碳化钛/多孔碳纤维 (Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/PCNF)复合材料。当PS:PAN质量比为 1:2时,样品命名为Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>r</sub>/50%PCNF(质量分 数);当PS与PAN质量比为1:1时,样品命名为  $Ti_{3}C_{2}T_{r}/100\%$  PCNF(质量分数);当 PS 与 PAN 质 量比为3:2时,样品命名为Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>4</sub>/150%PCNF(质 量分数);当PS与PAN质量比为2:1时,样品记作 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200%PCNF(质量分数)。

## 1.4 表征

使用X射线衍射仪(XRD,D/Max-IV,Rigaku, Japan),表征Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/PCNF材料物相结构。使用扫 描电子显微镜(SEM, S-3400N II, Hitachi, Japan), 表征 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/PCNF 材料的形貌特征。使用拉曼光 谱 仪 (Raman, JobinYvon HR 800, Horiba JobinYvon, France),并以 633 nm 激发激光,对样品 物质成分进行进一步检测表征。使用比表面积分析 仪(BET, ASAP2460, micromeritics, America),测试 样品的比表面积。

## 1.5 电化学

通过使用瑞士万通公司(Metrohm)的电化学工 作站(Autolab)对样品电极材料进行循环伏安测试 (CV)、恒流充放电测试(GCD)和交流阻抗测试 (EIS),用于判断电极或器件的相关性能。在三电 极测试中,电极材料组成为活性物质、导电炭黑及聚 四氟乙烯,它们的质量比为7:2:1,工作电极上负载 电极样品的面积为1 cm<sup>2</sup>,所选用对电极为铂片电 极,选用参比电极为汞/氧化汞电极,电解液为3 mol·L<sup>-1</sup>的氢氧化钾溶液,其中工作电极活性物质 被涂覆冲压在泡沫镍载体上。根据以下公式,通过 GCD图的放电电流密度与放电时间的关系来计算 电极材料的比容量。

$$C_{\mathrm{k}\bar{\alpha}\bar{\alpha}\bar{\alpha}} = \frac{C}{m} = \frac{I}{m} \cdot \frac{\triangle t}{\triangle U} = A \cdot \frac{\triangle t}{\triangle U} \tag{1}$$

式(1)中 $C_{tradel}$ 表示材料电容量,C表示材料电容量, m表示活性物质质量, $\Delta t$ 为放电时间,A表示放电电流密度, $\Delta U$ 则表示电压的变化值。

## 2 结果与讨论

#### 2.1 二维碳化钛的制备与表征

图 1 为 MAX 相 Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> 和刻蚀后手风琴状 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>及少片层 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>的 SEM 图片。从图 1 可以 看出,原材料本身为片层状生长的块状材料,经HF 刻蚀后原材料中 Al溶解脱出,Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>展现出典型



(a)MAX相Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>;(b)刻蚀后手风琴状Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>;(c)少片层Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>。 (a)Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>ofMAX;(b)Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> of accordion;(c)Less layers of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>.

图 1 不同材料的 SEM 图片 Fig. 1 SEM images of different materials 手风琴结构,经高能超声剥离筛选后的Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>呈纳 米片状结构。

典型手风琴层状结构有利于材料与表面吸附电 解液中较多的离子,从而使材料具备可观的双电层 电容,然而经初步刻蚀后的Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>片径尺寸为微米 级,无法通过静电纺丝技术与多孔碳纤维结合。而 经高能超声剥离、筛选后的Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>呈纳米片状,小 尺寸少片层Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>结构可以为离子的吸附提供更 多的活性位点,利于发挥其优异的电容容量,然而对 于厚薄程度仅有几十纳米的Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>更容易发生团 聚堆叠现象而影响其导电性和电容等性能,利用电 纺技术形成Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>聚合物复合纤维以保持Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 相对分散的结构是一种良好的选择。

图 2 为原材料和少层 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>的 XRD 谱图及 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>的拉曼光谱。从图 2(a)可见,所制备的少层 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>的所有衍射峰均与文献[15]中使用氢氟酸 刻蚀后 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>的 XRD 图谱相对应,其中(002)、 (004)及(006)衍射峰分别出现在 8.01、18.38 和 27.31°处,而(002)和(004)衍射峰角度与原材料相 比发生明显的左移,表示其片层间距增加。从图 2 (b)可见,Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>拉曼光谱于 208、257 和 380 cm<sup>-1</sup> 处出现散射峰,这与文献[16]的报道一致。



**图 2** (a)不同材料 XRD 图和(b)Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>的 Raman 光谱图 **Fig. 2** (a)XRD patterns of different materials and(b)Raman spectra of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>

#### 2.2 二维碳化钛/多孔碳纤维的结构与形貌

图 3 为 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/多孔碳纤维的 SEM 电镜图片。 从图 3 可以观察到:电纺出 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/50%PCNF、 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/100%PCNF 和 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/150%PCNF 材料 纤维连续性良好,并且明显观察到 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>片嵌入纤 维中;纤维中孔径普遍为 50~100 nm,且纤维表面上 大孔呈聚集状分布;Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200%PCNF纤维连续 性良好,纤维直径明显增大,纤维表面大孔分布不均 匀,然而聚集分布现象不明显。因此,只有 PS 纳米 球的添加量达到一定程度时,PS 纳米球对静电纺丝 制备出的碳纤维复合材料的直径才会产生较为明显 的影响,且纤维直径大于 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>片尺寸;静电纺丝 制备的碳纤维复合材料纤维形貌保持良好,且纤维 表面的大孔分布相对较为分散,这样有利于电解液 中的钾离子进入碳纤维与 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>表面活性位点相 互作用,从而体现出高的比电容以及优异的电化学 阻抗特性。



(a)Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/50%PCNF;(b)Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/100%PCNF;(c)Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/150%PCNF;(d)Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200%PCNF.
图 3 SEM 图片
Fig. 3 The SEM images

为将材料用作超级电容器电极,因此对静电纺 丝纤维进行进一步碳化,图4为50%Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/ 200%PCNF的Raman光谱图。从图4可见,在257 和428 cm<sup>-1</sup>处显示了Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>典型的散射峰,在 1337和1574 cm<sup>-1</sup>处则显示出了碳纤维典型的散射 峰,说明Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>与多孔碳纤维进行了较好的复合, 并且D峰与G峰积分面积之比为2.67,证明多孔碳 纤维中的缺陷较多。纤维中缺陷的存在,一方面提 供了更短的离子传输距离,一方面提供了吸附电解 液中离子所需的大量活性位点,十分利于电极材料 容量的提高。

图 5 为 50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200% PCNF 的氮气吸脱附 曲线及孔径分布图。从图 5(a)可见, Langmuir 比表 积可达 294 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>。从图 5(b)可见: 50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/ 200% PCNF 中孔隙普遍以大孔(大于 50 nm)形式 存在,其孔径分布与所采用的模板剂的粒径相符;而 相对于小孔(小于 2 nm), 大孔的存在不仅利于碳纤



图 4 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200%PCNF的Raman光谱图 Fig. 4 Raman spectra of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200%PCNF

维内电解液离子的进入、传送,由于MXene片层更 多的暴露在电解液中,使MXene的表面大量存在的 活性位点得到充分发挥,从而电极材料比容量获得 显著的提升。



(a)氮气吸脱附曲线;(b)孔径分布图。

(a)nitrogen adsorption and desorption curves; (b)pore size distribution diagram.

**图5** 50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200% PCNF 的氮气吸脱附曲线及孔径分布图

Fig. 5  $\,$  Nitrogen adsorption and desorption curves of 50%  $Ti_3C_2T_{\it x}/200\% PCNF$  , and pore

size distribution diagram of 50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200% PCNF

#### 2.3 多孔碳纤维的电化学性能表征

在三电极中,使用3 mol·L<sup>-1</sup>氢氧化钾(KOH) 溶液作为电解液,对电极材料进行电化学性能表征。 图 6 为不同电流密度下 50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200% PCNF 材 料的恒流充放电曲线及不同材料在不同电流密度下 的比容量图。

从图 6(a)可见,50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200% PCNF 材料 在不同电流密度下充放电曲线均显示出了较为对称 的三角形分布,且充放电电压随时间呈现出较为明 显的线性变化。这一方面表示了电极材料双电层形 式的储能工作机理,另一方面展现了 50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/ 200% PCNF 材料良好的充放电效率和优异的功率 特性。 通过公式,计算出 50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200% PCNF 电 极材料在1A·g<sup>-1</sup>电流密度下最高比容量为 292.74 F·g<sup>-1</sup>,即使在 10 A·g<sup>-1</sup>电流密度下其比容量仍为 169.17 F·g<sup>-1</sup>。从图 6(b)可见,在同等电流密度下 不同空隙率的 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/PCNF 材料同样展现出了最 高的比容量,且在相对较低电流密度下随孔隙率的 增加材料的比容量呈现上升趋势。这一方面得益于 高孔隙增加了材料的比表面积,另一方面孔洞的增 加有利于电解液中离子进入碳纤维与 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>相互 作用。

材料电阻图均可分为高频区(半圆)及低频区 (斜线)两部分,曲线与X轴线交点(半圆的起点)为 初始电阻 R<sub>i</sub>,用于评价电极材料电阻。从图 6(c)可 见:将Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>材料加入多孔碳纤维中显示出了更小 的初始电阻 0.46 Ω,这验证了Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>优异的电导 率;中高频区半圆直径大小表示了电极固态界面层 的电荷转移电阻 R<sub>et</sub>,即表示了电解液中离子在电极 材料表面吸脱附电阻,Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>的加入使得电荷转移 电阻减少至1Ω以下,这远低于纯多孔碳的R<sub>et</sub>值;低 频区中斜率反映了瓦尔堡阻抗 Z<sub>w</sub>,用于评价电解液 中离子在电极材料中的扩散电阻,Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>的加入后 低频区近乎垂直的直线,体现出了更低的扩散电阻。 表明,Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>嵌入多孔碳纤维中明显的减小了材料 总体的阻抗,从而使材料获得优异的电化学性能。 从图 6(d)材料 CV 曲线可见,当电压扫描范围 为 0~0.6 V 时,50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200% PCNF 材料在不 同电压扫速下均表现出类矩形的曲线,且无氧化还 原峰的出现,说明了该材料以双电层形式储能的工 作机理,与恒流充放电分析一致,在不同电压扫描速 度下均显示出了较好的对称性,这表明了电极材料 优异的充放电稳定性。而随着电压扫速的增大材料 循环伏安曲线形状变化不明显(即使在 50 mV·s<sup>-1</sup> 的扫描速度下均能保持较好的类矩形形状),反应材 料良好的倍率性能,这得益于多孔碳纤维的存在避 免了 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>材料发生大量堆叠以及团聚现象。



- **图6** (a)为不同电流密度下 50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200% PCNF 材料的恒流充放电曲线,(b)不同材料在不同电流 密度下的比容量图,(c)为 50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200% PCNF 与 PCNF 的交流阻抗图,(d)为 50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200% PCNF 的循环伏安曲线图
- Fig. 6 (a) The constant current charge-discharge curves of 50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200% PCNF materials at different current densities, and (b) the specific capacity graphs of different materials at different current densities, (c) AC impedance diagram of 50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200% PCNF and PCNF, and (d) Cyclic voltammetry curve diagram of 50% Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200% PCNF

## 3 结论

利用静电纺丝技术将 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>嵌入多孔碳纤维 中,弥补了 MXenes嵌入多孔碳纤维运用于储能领域 的研究空缺。经过一系列电化学测试表明,由于 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>引入多孔碳纤维中,电极材料的质量比容量、 倍率性能及电化学阻抗特性获得了显著的提高,其中 50%Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>/200%PCNF材料在1A·g<sup>-1</sup>的电流密 度下显示了最高的比容量292.74F·g<sup>-1</sup>,即使在10 A·g<sup>-1</sup>的电流密度下仍有169.17F·g<sup>-1</sup>的比容量,因 此该材料在超级电容器的应用中具有较大的潜力。

#### 参考文献:

- [1] NAGUIB M, KURTOGLU D M, PRESSER D V. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>[J]. 2011, 23(37):4248-4253.
- [2] MICHAEL NAGUIBYURY G. Synthesis of twodimensional materials by selective extraction [J]. AccChem Res, 2015, 48(1):128-135.
- [3] GAO Lingfeng, LI Chao, HUANG Weichun. MXene/ polymer membranes: Synthesis, properties, and emerging applications[J].Chemistry of Materials, 2020, 32(5):1703-1747.
- [4] ZHAN Xiaoxue, CHEN Si. MXene and MXene-based composites: Synthesis, properties and environmentrelated applications [J]. Nanoscale Horiz, 2020 (5): 235-258.
- [5] KUANG P, LOW J, CHENG B, et al. MXene-based photocatalysts [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2020, 56:18-44.
- [6] LI Renyuan, ZHANG Lianbin. MXene Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>: An Effective 2D light-to-heat conversion material [J]. ACS Nano, 2017, 11(4): 3752-3759.
- [7] JIANG Q, Yongjiu L, Hanfeng L. Review of MXene electrochemical microsupercapacitors [J]. Energy Storage Materials, 2020, 27:78-95.
- [8] ZHOU Zehang, WEERAPHA P. Layer-by-layer assembly of MXene and carbon nanotubes on electrospun polymer films for flexible energy storage[J]. Nanoscale, 2018(10):6005-6013.
- [9] ZHANG J, SEYEDIN S, GU Z, et al. MXene: A

potential candidate for yarn supercapacitors [J]. Nanoscale, 2017(9):18604-18608.

- [10] SEYEDIN S, ROSWELL E, YANZA S. Knittable energy storing fiber with high volumetric performance made from predominantly MXenenanosheets [J]. J Mater Chem A, 2017(5):24076-24082.
- [11] ARIANALEVITTS, MOHAMED A. ElectrospunMXene/carbon nanofibers as supercapacitor electrodes [J]. J Mater Chem A, 2019 (7):269-277.
- [12] URBANEK O. Preparation and characterization of polymer-Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> (MXene) composite nanofibers produced via electrospinning [J]. J ApplPolym SCI, 2017,134(37):45295.
- [13] SOBOLČIAK P, ALI A, HASSAN M K, et al. 2D Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> (MXene) -reinforcedpolyvinylalcohol (PVA) nanofibers with enhanced mechanical andelectrical properties[J]. PLoS ONE, 2017, 12(8):e0183705.
- [14] ZONG X, KIM K, FANG D. Structure and process relationship of electrospun bioabsorbable nanofiber membranes[J].Polymer, 2002,43: 4403-4412.
- [15] ALHABEB M, MALESKI K, ANASORI B, et al. Guidelines for synthesis and processing of twodimensional titanium carbide (Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>MXene) [J]. Chem Mater, 2017, 29:7633-7644.
- [16] SARYCHEVA A , GOGOTSI Y. Raman spectroscopy analysis of the structure and surface chemistry of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub>MXene [J]. Chem Mater, 2020, 32:3480-3488.

## Preparation and Properties of Two Dimensional Titanium Carbide/Porous Carbon Fibers

DUAN Weizhen, ZHANG Haiyan, ZHANG Shangshang

(School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Two-dimensional titanium carbide/PAN composite fibers (MXene/PAN Fibers) were synthesized by electrospinning using polyacrylonitrile (PAN) as carbon source and polystyrene microspheres as poreforming agent. Titanium carbide/PAN composite fibers ( $Ti_3C_2T_x/PCNF$ ) were characterized by SEM, XRD, TEM, BET and their electrochemical properties were tested. The results show that the specific surface area of  $Ti_3C_2T_x/PCNF$  composite reaches 294 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>, and the pore size distribution is concentrated between 50 and 100 nm. The few-layer of  $Ti_3C_2T_x$  nanosheets are anchored in carbon fibers. As an electrode material,  $Ti_3C_2T_x/PCNF$  has excellent electrochemical properties, up to 292 F·g<sup>-1</sup> at a current density of 1 A·g<sup>-1</sup> and maintaining 169 F·g<sup>-1</sup> even at a current density of 10 A·g<sup>-1</sup>. Moreover, thanks to the excellent electrical conductivity of  $Ti_3C_2T_x$ , the composite porous carbon fiber has very good electrochemical impedance characteristics. This porous carbon-based composite material has good development potential in filtration, wave absorption and catalysis.

Key words:  $Ti_3C_2T_x$ /porous carbon fibers; electrospinning; electrode materials; electrochemical performance