MXene/ 聚苯胺 / 活性炭复合电极材料的制备及其电化学性能

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.2010

张哲睿　刘思敏
陈　一　刘嘉婷

湖南工业大学
包装与材料工程学院
湖南　株洲　412007

摘　要：为了制备高性能的柔性混合超级电容器，通过化学蚀刻法合成二维过渡金属碳化物 / 氮化物（MXene）纳米片，并与聚苯胺（PANI）和活性炭（AC）结合，采用均匀混合后物理辊压的方法制备出柔性 AC/Mxene/PANI（CMP）复合电极。AC 作为高比表面积的框架材料，有效提供负载和活性位点；MXene 则构建离子传输通道；PANI 作为导电物质，加速 MXene 层间电荷转移；同时，MXene 与 PANI 的引入因其优异的赝电容行为和增大的活性表面积，显著提升了复合电极的电化学性能。研究表明，厚度为 75 μm 的 CMP-50% 电极（AC、MXene、PANI 质量比为 2∶1∶1）在硫酸电解质中展现出 313 F/g 的高比电容（1 mV/s 扫描速率下），且在 5 A/g 电流密度下电容保持率高达 80.9%，库伦效率为 98.4%。MXene 与 PANI 的引入显著提升了复合电极的电容性能和导电性，为高性能柔性混合超级电容器的研发开辟了新路径。

关键词：MXene；活性炭；聚苯胺；电化学；超级电容器
中图分类号：TM53　　**文献标志码**：A
文章编号：1674-7100(2025)02-0096-08
引文格式：张哲睿，刘思敏，陈　一，等 . MXene/ 聚苯胺 / 活性炭复合电极材料的制备及其电化学性能 [J]. 包装学报，2025，17(2)：96-103.

1　研究背景

随着全球能源需求的不断攀升与环保意识的日益增强，研发高效且可持续的能源存储技术已成为应对能源危机和环境污染的核心策略 [1]。超级电容器是一种集高功率密度、长循环寿命以及快速充放电特性于一身的储能设备，在电动汽车、智能电网和便携式电子设备等多个领域均展现出了广阔的应用前景 [2]。然而，传统电极材料受限于比电容低、成本高等因素，难以满足日益增长的能量密度需求 [3]。因此，探索新型电极材料，特别是那些能够结合双电层电容与赝电容机制、同时具备良好柔韧性和导电性的复合材料，成为当前研究的热点。

活性炭（activated carbon，AC）因其丰富的孔隙结构和高的比表面积，在双电层电容方面展现出优异性能，但单独使用时能量密度有限 [4]。二维过渡金属碳化物 / 氮化物（MXene），作为一类新兴的二维材料，凭借其独特的物理化学性质和出色的导电性，

收稿日期：2024-11-22
基金项目：湖南省科技计划资助项目（2022JJ50058，2023JJ50167）
作者简介：张哲睿，男，硕士生，主要研究方向为二维金属材料和超级电容器，E-mail：zherui@foxmail.com
通信作者：刘嘉婷，女，博士生，主要研究方向为电化学传感器，E-mail：444306337@qq.com

在赝电容应用中表现突出，但其加工性和稳定性仍需改善[5, 6]。聚苯胺（polyaniline，PANI），作为一种导电聚合物，具有良好的电化学活性和环境稳定性，与碳材料或 MXene 复合可显著提升电极的综合性能。尽管这些材料各自的优势明显，但如何有效结合，实现性能的最大化，仍是当前研究面临的挑战[7, 8]。

现有研究大多聚焦于 MXene/PANI 与另一种材料组合，探究三者协同作用机制及最优配比。如 Wang X. W. 等[9]研究了 PANI 和碳化钒（V_2C）复合材料的原位聚合及其在超级电容器和氨传感器中的应用，该超级电容器使用 PANI/MXene 作为阳极，活性炭作为阴极，在 1 A/g 的电流密度下显示出 337.5 F/g 的电容，具有相当可观的能量密度（11.25 Wh/kg）和功率密度（415.38 W/kg）。Wang Q. Q. 等[10]在 MXene、PANI、多壁碳纳米管（multi-walled carbon nanotube，MWCNTs）三元复合材料中构建了异质结，得益于 MXene、PANI 和多壁碳纳米管之间的协同增强效应，实现了 414 F/g 的卓越比电容。Yu L. Y. 等[11]通过一步法制备 MXene 黏结的活性炭，并用作有机电解质中超级电容器的柔性电极。这种柔性 MXene 黏结的活性炭电极在有机电解质中表现出高达 126 F/g（在 0.1 A/g 电流密度下）的电容，并在 100 A/g 下保持了 57.9% 的电容保持率。由此可见，MXene 与 PANI 的协同引入，因其本身所具备优异的伪电容行为[12]和显著增大的活性表面积，使得复合电极的电化学性能得到了显著提升。

现有研究虽然提升了复合电极性能，但依然存在界面电荷传输效率较低和机械稳定性较差等问题。本研究深入探析 AC、MXene 与 PANI 的协同增效机理，以 AC 双电层电容为基础，通过调控 AC、MXene 与 PANI 的比例与结构，设计并制备出一种新型的三元复合柔性电极材料（CMP），并系统研究了其电化学性能。MXene 与 PANI 的引入不仅显著提升了碳材料电极的电容性能和导电性，还为高性能柔性混合超级电容器的研发开辟了一条全新的路径，具有重要的科学意义和应用价值。

2 实验部分

2.1 主要原料

盐酸（HCl）、硫酸（H_2SO_4）购自湖南汇虹试剂有限公司；氟化锂（LiF）、苯胺（C_6H_7N）、聚偏二氟乙烯（poly(vinylidene fluoride)，PVDF）、过硫酸铵（ammonium persulfate，APS）以及去离子水均购自上海麦克林生化科技股份有限公司。以上试剂均为分析纯，且未经过进一步纯化直接使用。AC，XFP01 型，先锋纳米材料科技有限公司。Ti_3AlC_2 粉末，新烯科技有限公司。

2.2 实验仪器与设备

电化学工作站，CHI 660E，上海辰华仪器有限公司；X 射线衍射仪（XRD），D/Max 2550V，日本理学公司； 扫描电子显微镜（SEM），Nova Nanosem 230，美国 FEI 公司；电子天平，AY220，上海舜宇恒平科学仪器有限公司；电热鼓风干燥箱，DHG-9625A，上海一恒科学仪器有限公司。透射电子显微镜（TEM），Jem-2100F，日本电子公司。

2.3 MXene 纳米片的合成

在 20 mL 浓度为 9 mol/L 的盐酸中，慢慢加入 1.6 g 氟化锂，随后缓缓掺入 1 g Ti_3AlC_2 粉末。在恒温 40 ℃的条件下，进行长达 36 h 的蚀刻处理。之后，采用去离子水对所得产物 $Ti_3C_2T_x$（MXene）纳米片进行反复洗涤，直至溶液 pH 值稳定于 6 左右。接着，对其进行 1 h 的超声处理，以进一步分散纳米片。最后，通过 3500 r/min 的转速离心 1 h，有效分离出沉积物，从而获取到含有 $Ti_3C_2T_x$（MXene）纳米片的水溶液分散体。

2.4 聚苯胺粉末的合成

将 2 mL（0.022 mol）苯胺缓慢溶解于 120 mL 1 mol/L 的盐酸溶液中。随后，将此混合液置于冰水浴中，预冷至 5 ℃以备后续反应。接着，在剧烈搅拌的条件下，逐滴加入 40 mL 含有 0.025 mol 过硫酸铵的 1 mol/L 盐酸溶液，其间，严格控制反应温度保持在 0 ℃。历经 8 h 的持续反应后，反应终止。随后，收集生成的沉淀，并经过干燥处理，最终得到盐酸掺杂的导电 PANI 粉末。

2.5 CMP 电极材料的制备

首先，制备 AC、MXene、PANI 的水分散液，标记为 MXene/H_2O、PANI/H_2O、AC/H_2O。将 PANI/H_2O 与 AC/H_2O 缓缓加入 MXene/H_2O，利用超声波振荡混合均匀。然后，真空抽滤确保分散均匀，避免堆积。接着，添加 PVDF 增强结合力，并对 CMP 材料进行多次辊压（15 min）。干燥 12 h 后，用 1 mol/L 盐酸酸化处理，优化表面性质，提升柔性和电化学性能。最后，去离子水冲洗去除残留酸液，得到 CMP 电极材料。

通过改变 AC 与 MXene、PANI 的质量比，探究添加赝电容材料对双电层电容器电化学性能的影响。设置 AC 与 MXene、PANI 的质量比分别为 1∶1∶1、2∶1∶1和 4∶1∶1，分别标记为 CMP-33%、CMP-50%、CMP-66%。所有材料的质量为 5 mg，所得复合电极厚度为 75 μm。

2.6 结构表征

采用扫描电子显微镜（SEM）和透射电子显微镜（TEM）对 MXene 复合材料的形貌进行了表征。X 射线衍射（XRD）测试是利用 X 射线衍射仪在 Cu 靶 Kα 辐射（l¼1.54 A）下进行的。所有样品均经过了充分的研磨和干燥处理。

2.7 电容性能测试

1）电化学测试

在 3 mol/L 硫酸电解液中，以 Ag/AgCl 电极作为参比电极、以铂网（Pt）作为辅助电极、CMP 电极作为工作电极构建了标准三电极体系，在电化学工作站上，利用循环伏安图（CV）、电流静电放电（GCD）曲线和电化学阻抗谱（EIS）研究了 CMP 复合电极的电化学性能。

2）比电容计算

由 CV 曲线结合式（1）计算电极的比电容 C_g。

$$C_g = \frac{1}{\Delta U m v}\int i\mathrm{d}U, \qquad (1)$$

式中：ΔU 为电压窗口，V；m 为工作电极的质量，g；v 为电压扫描速率，V/s；i 为 CV 曲线中的电流，A。

3）赝电容计算

电极的赝电容占比可根据式（2）进行计算，得出电极的电容控制和扩散控制对能量存储的贡献。

$$\frac{i(v)}{v^{1/2}} = k_1 v^{1/2} + k_2, \qquad (2)$$

式中，k_1 和 k_2 为可以调整的参数，每个特定的电压下都对应一个拟合的 k_1 值。在每一个特定电压下，$k_1 v$ 即为赝电容对电流的贡献。

3 结果与讨论

3.1 MXene 结构表征

为了明确样品的物相成分并解析其晶体结构，对制备的 MXene 进行了 XRD 测试。图 1 为化学刻蚀的 MXene 与前驱体 MAX 相的 XRD 图谱。

对于二维片层材料而言，层间距是一项至关重要的结构参数。依据布拉格方程，通过分析 XRD 谱图中的（002）峰位置，可精确测定层间距的大小[13]。由图 1 可知，与 MAX 相比，MXene 的（002）晶面峰显著地定位于 6.9°，并且刻蚀后的峰位呈现出向低角度移动的趋势。这一变化深刻地揭示了从 MAX 相向 MXene 转变的物理机制：在 A 层原子被刻蚀去除的过程中，层与层之间的间距随之增大。此外，MAX 相在 40° 处原本标志性的、代表中间 Al 层存在的峰，在刻蚀处理后完全消失于 XRD 谱图中。这些结果有力地证明了已成功制备单片层或少片层的 MXene 材料。

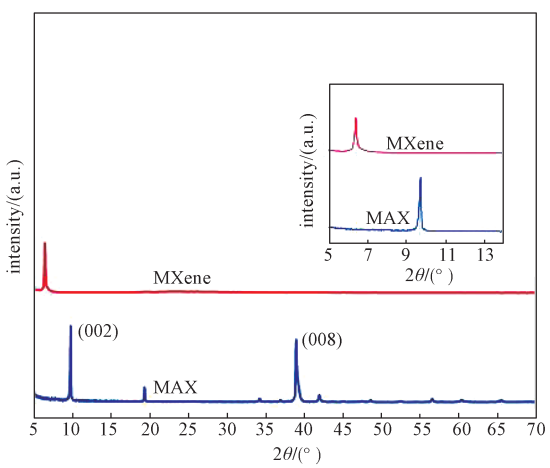


图 1 MXene 材料的 X 射线衍射表征

Fig. 1 X-ray diffraction characterization of MXene materials

进一步地，采用 TEM 观察 MXene 材料的内部结构，结果如图 2 所示。由图可知，成功制备单片层或少片层的 MXene 材料，这为 MXene 的成功制备提供了直接的视觉证据。

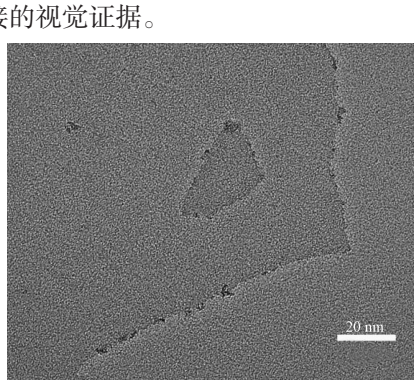


图 2 MXene 材料的 TEM 表征

Fig. 2 TEM diffraction characterization of MXene materials

3.2 CMP 材料的形貌表征

本研究将 AC、MXene、PANI 有效结合，并添加 PVDF 作为黏合剂，以增强材料内部的结合力，

再经反复辊压制得 CMP 电极，如图 3 所示。由图可知，CMP 电极具有良好的柔性，并可通过简单工艺进行大量制备。CMP 电极充分融合了 AC、MXene 和 PANI 各自独特的优势，使混合电容器兼具活性炭双电层电容器的循环稳定性和赝电容电容器的高电容性。

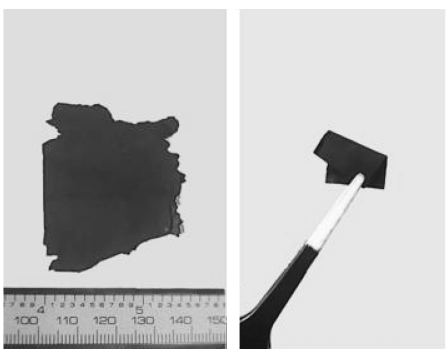
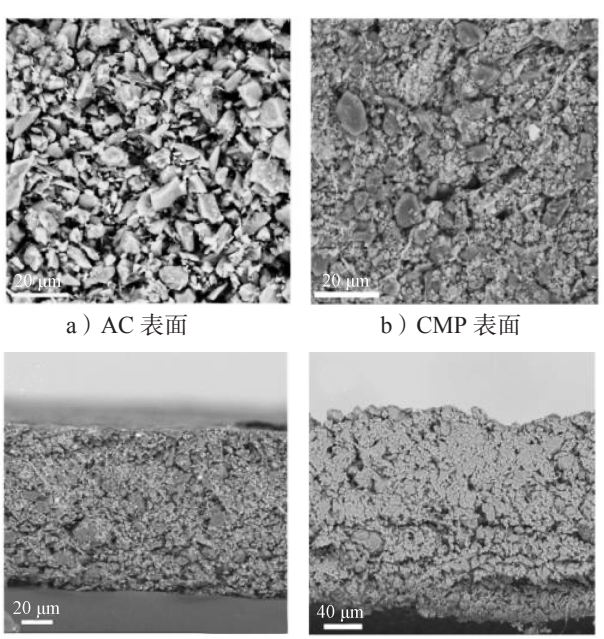


图 3　辊压成型的柔性 CMP 电极

Fig. 3　Flexible CMP electrode formed by roller pressing

在 AC 电极超级电容器的工作机制中，关键在于利用电极与电解液界面形成的双电层来储存能量，这一机理决定了其效能主要依赖于表面作用，而内部空间则未能充分施展其潜力 [14, 15]。这一特性恰到好处地为 MXene 与 PANI 提供了理想的负载平台。本研究通过 SEM 对 AC、CMP 材料的形貌进行观察，结果如图 4 所示。



a）AC 表面　b）CMP 表面

c）75 μm 厚 CMP 截面　d）135 μm 厚 CMP 截面

图 4　AC 及 CMP 材料的形貌表征

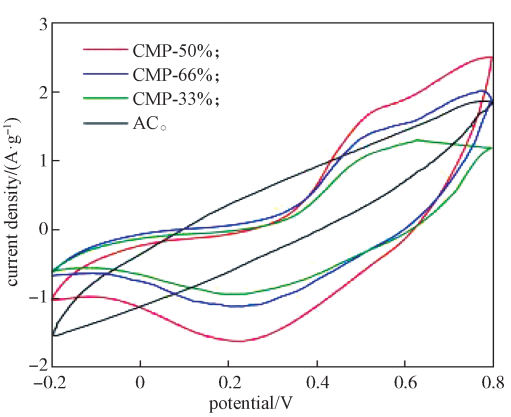
Fig. 4　Morphological characterization of AC and CMP materials

由图 4a 中 AC 的表面形貌可知，AC 拥有极高的比表面积与复杂的孔隙结构。由图 4b 中 CMP 的表面形貌可知，MXene 与 PANI 可以填入 AC 之间的缝隙中，它们能够紧密地堆叠形成层状薄膜 [16]。图 4c 和 4d 分别为厚度 75 μm 和 135 μm 的 CMP-50% 复合电极的截面图，可以看到复合电极内部的材料均匀分散。MXene 与 PANI 的储能机制属于赝电容储能，其表面官能团与边缘缺陷能够参与可逆的氧化还原反应，从而贡献出额外的赝电容效应。这种独特的赝电容行为，使 AC 电极超级电容器的能量密度显著提升。

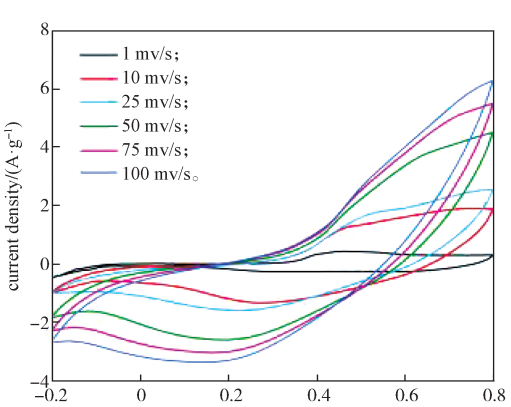
3.3　电化学性能分析

3.3.1　CMP 电极电化学分析

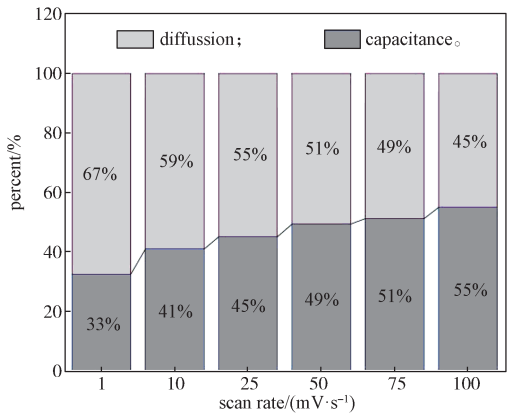
本研究固定 MXene 和 PANI 的质量比，通过改变 AC 与 MXene、PANI 的质量比，制备了一系列 CMP 复合电极薄膜，探究添加赝电容材料对双电层电容器电化学性能的影响。采用三电极体系，电解液为 3 mol/L 硫酸，电压窗口设置为 −0.2~+0.8 V，对电极样品进行循环伏安法测试，结果如图 5 所示。



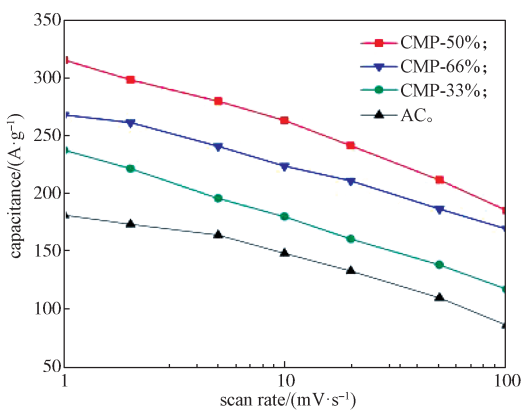
a）不同质量比 CMP 电极 CV 曲线



b）不同扫描速率下 CMP-50% 的 CV 曲线



c）不同扫描速率下 CMP-50% 的赝电容占比



d）不同质量比 CMP 电极的比电容

图 5　循环伏安法电化学分析

Fig. 5　The electrochemical analysis using cyclic voltammetry

由图 5a 可知，在固定扫描速率 25 mV/s 的循环伏安测试中，AC 电极的 CV 曲线表现出近似对称的图形，没有明显的氧化还原峰；但随着 MXene 和 PANI 的引入，在循环伏安曲线中，电极都表现出明显的氧化还原峰，这表明部分电容来自法拉第赝电容，其中 CMP-50% 电极表现出最大的电容性能，所以选用 CMP-50% 电极进行进一步测试分析。此外，MXene 和 PANI 的氧化还原峰集中在 0.4 V 左右，表明 PANI 成功地锚定在 MXene 层上。

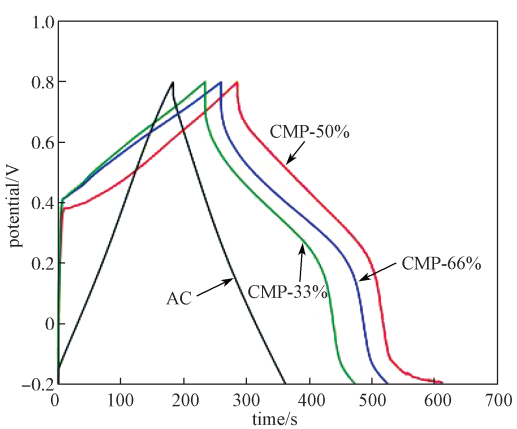
由图 5b 可知，CMP-50% 在不同扫描速率下的 CV 曲线形状没有明显变化，表明 CMP-50% 电极具有良好的电容行为和高分辨率能力。通过式（1）计算，在 1 mV/s 扫描速率下，CMP-50% 电极具有 313 F/g 的比电容。此外，随着扫描速率的增加，CV 曲线的面积逐渐增大，表明其具有理想的电容性能。

由图 5c 可知，随着扫描速率的增加，赝电容贡献占比逐渐升高，这符合赝电容的电容储能机理，也证明了 MXene 与 PANI 在充放电中的赝电行为。

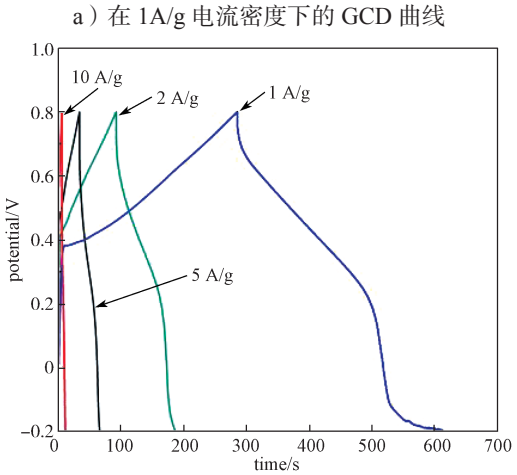
由图 5d 可知，4 个样品中 CPM-50% 具有最高的比电容，计算可得 AC、CMP-33%、CMP-50%、CMP-66% 比电容分别为 132.9 F/g、160.7 F/g、241.5 F/g、211.7 F/g。CMP-50% 表现出最大比电容的原因在于其达到电容协同效应的最优化，即 AC 的双电层电容与 PANI 的赝电容达到平衡。若 AC 比例过低则赝电容贡献不足，过高则导电性下降。而 CMP-33% 和 CMP-66% 因组分失衡导致导电网络断裂或孔隙堵塞。分级孔隙的协同效应也可能是一个原因，CMP-50% 的孔径分布最均衡，AC 的微孔与 MXene 介孔形成分级孔隙更有利于离子的传输。

3.3.2　CMP 电极电容性能分析

为进一步探究 CMP 电极的电容性能，在 3 mol/L 硫酸电解液中，对 CMP 电极进行了恒流充放电，电化学阻抗谱（electrochemical impedance spectroscopy，EIS）和循环稳定性测试，结果如图 6 和图 7 所示。



a）在 1A/g 电流密度下的 GCD 曲线



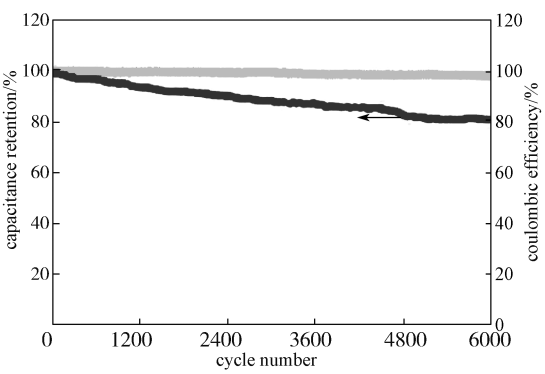
b）在不同电流密度下 CMP-50% 电极的 GCD 曲线

图 6　恒流充放电曲线分析

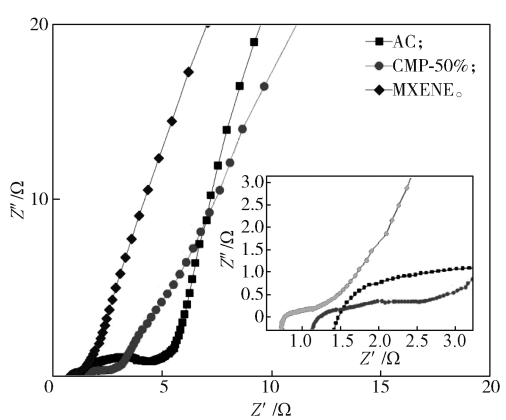
Fig. 6　Analysis of GCD curves

图 6a 为 AC 及不同质量比 CMP 电极在 1 A/g 电流密度下的 GCD 曲线，其中 AC 的 GCD 曲线近似为等腰三角形，为理想的双电层电容器，体现了其双电层电容电压降较小的特性 [17]。添加 MXene 和 PANI 的 CMP 复合电极则呈现平台和轻微扭曲的曲线，表现为电池型 GCD 曲线。这是由于在 −0.2~0.4 V 时 CMP 电极材料的电容很小，基本没有储能，随着电压继续升高，电极材料中的 MXene 与 PANI 发生了可逆的氧化还原反应，电量在界面处发生累积，导致平台的变化 [18]。

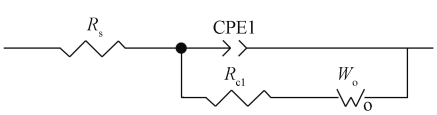
图 6b 为 CMP-50% 电极在不同电流密度下的 GCD 曲线。由于电池型电容器不能用 GCD 曲线计算比电容，但结合图 6a 可以大致观察到，CMP-50% 电极的充放电时间最长，这一结果也进一步印证 CV 曲线所得的结论。



a）CMP-50% 电极的循环稳定性曲线



b）不同电极的 EIS 曲线



c）CMP 电极等效电路图

图 7　循环伏安法电化学分析

Fig. 7　Electrochemical analysis using cyclic voltammetry

由图 7a 可知，CMP-50% 电极在 5 A/g 的电流密度下循环 6000 次后，表现出良好的长期循环稳定性，电容保持率为 80.9%，库伦效率保持率为 98.4%。这可能是因为在 CMP-50% 薄膜中，MXene 和 AC 复合电极能够结合两者的优点，形成协同效应。AC 的高比表面积和孔隙结构为电解质离子提供了更多的吸附位点，而 MXene 的良好导电性和赝电容行为则提高了电极材料的电子传导性能和能量密度 [19]。此外，MXene 的二维片层结构能够与 AC 颗粒形成良好的界面接触，有助于电荷在电极材料中的快速传输和分布。这种结构优势使得复合电极在超级电容器中表现出更加优异的电化学性能。

图 7b 和 7c 为 EIS 曲线及其对应的等效电路模型，其中模型包括内电阻（R_s）、电荷转移电阻（R_{ct}）、恒相元件（CPE_1）和扩散元件（W_0）的等效电路元件。由图 7b 可知，在低频区，阻抗谱显示一条垂直线，由此表明材料的电容行为。在高频区，AC 电极表现出最高的内电阻，而 MXene 表现出最低的内电阻，由此证明了 MXene 优异的导电性。使用 MXene 和 PANI 作为导电添加剂，MXene 与 PANI 之间的强氢键相互作用，可以促进法拉第反应中的电荷转移，使 CMP-50% 电极的电导率得到改善，内电阻降低，而且代表电荷转移电阻的半圆半径也变小。然而，在中高频范围内，加长且更平缓的倾斜线意味着重新堆叠的 MXene 层具有更大的扩散电阻 [20]。因此，CMP-50% 电极显示出相对较低的电阻和快速的离子扩散，可实现高电容和良好的倍率性能。

4　结论

本研究利用简单的物理方法成功合成了 CMP（AC/MXene/PANI）复合柔性电极材料，并系统研究了其电化学性能，所得如下结论。

1）通过优化 AC、MXene 和 PANI 的质量比，得到厚度为 75 μm，AC、MXene 与 PANI 质量比为 2∶1∶1 的 CMP 电极，在硫酸电解质中展现出 313 F/g 的高比电容（1 mV/s 扫描速率下）。

2）CMP-50% 电极表现了良好的循环稳定性。在 5 A/g 的电流密度下循环 6000 次后表现出良好的长周期循环稳定性，电容保持率为 80.9%，库伦效率保持率为 98.4%。在阻抗测试中，CMP-50% 电极显示出相对较低的电阻和快速的离子扩散，可实现高电容和良好的倍率性能。

3）MXene 与 PANI 的赝电容效应与 AC 的双电层电容特性形成协同效应，显著提升了电极材料的整体性能。AC 为 MXene 和 PANI 提供了大量活性和负载位点，MXene 的二维结构促进了电荷的快速传输，进一步增强了 CMP 电极的电化学表现。

参考文献：

[1] BOOTA M，GOGOTSI Y. MXene: Conducting Polymer Asymmetric Pseudocapacitors[J]. Advanced Energy Materials，2019，9(7)：1802917.

[2] FARD A K，MCKAY G，CHAMOUN R，et al. Barium Removal from Synthetic Natural and Produced Water Using MXene as Two Dimensional (2-D) Nanosheet Adsorbent[J]. Chemical Engineering Journal，2017，317：331−342.

[3] ZENG J，CAO Q，JING B，et al. Hierarchical Porous Nitrogen Doping Activated Carbon with High Performance for Supercapacitor Electrodes[J]. RSC Advances，2016，6(19)：15320−15326.

[4] ZHANG L L，ZHAO X S. Carbon-Based Materials as Supercapacitor Electrodes[J]. Chemical Society Reviews，2009，38(9)：2520−2531.

[5] ZHAO M Q，REN C E，LING Z，et al. Flexible MXene/Carbon Nanotube Composite Paper with High Volumetric Capacitance[J]. Advanced Materials，2015，27(2)：339−345.

[6] ZHAO M Q，TRAINOR N，REN C E，et al. Scalable Manufacturing of Large and Flexible Sheets of MXene/Graphene Heterostructures[J]. Advanced Materials Technologies，2019，4(5)：1800639.

[7] LI K，WANG X H，LI S，et al. An Ultrafast Conducting Polymer@MXene Positive Electrode with High Volumetric Capacitance for Advanced Asymmetric Supercapacitors[J]. Small，2020，16(4)：1906851.

[8] XU H Z，ZHENG D H，LIU F Q，et al. Synthesis of an MXene/Polyaniline Composite with Excellent Electrochemical Properties[J]. Journal of Materials Chemistry A，2020，8(12)：5853−5858.

[9] WANG X W，ZHANG D Z，ZHANG H B，et al. In Situ Polymerized Polyaniline/MXene (V_2C) as Building Blocks of Supercapacitor and Ammonia Sensor Self-Powered by Electromagnetic-Triboelectric Hybrid Generator[J]. Nano Energy，2021，88：106242.

[10] WANG Q Q，FANG Y S，CAO M S. Constructing MXene-PANI@MWCNTs Heterojunction with High Specific Capacitance Towards Flexible Micro-Supercapacitor[J]. Nanotechnology，2022，33(29). DOI：10.1088/1361−6528/ac6432.

[11] YU L Y，HU L F，ANASORI B，et al. MXene-Bonded Activated Carbon as a Flexible Electrode for High-Performance Supercapacitors[J]. ACS Energy Letters，2018，3(7)：1597−1603.

[12] YANG C Q，WANG W W，ZHANG D Z，et al. High-Sensitivity Wearable Flexible Pressure Sensor Based on MXene and Polyaniline for Human Motion Detection[J]. ACS Applied Polymer Materials，2023，5(12)：10386−10394.

[13] 徐 斌 . MXene 材料：制备、性质与储能应用 [M]. 北京：科学出版社，2022：26.

[14] 罗 雨，王耀玲，李丽华，等 . 锂电池制片工艺对电池一致性的影响 [J]. 电源技术，2013，37(10)：1757−1759.

[15] 杨 坤，刘 洋，杨 静 . 制备及改性活性炭对 VOCs 吸附的研究进展 [J]. 广东化工，2018，45(1)：87−89.

[16] YIN Q，JIA H B，MOHAMED A，et al. Highly Flexible and Mechanically Strong Polyaniline Nanostructure @ Aramid Nanofiber Films for Free-Standing Supercapacitor Electrodes[J]. Nanoscale，2020，12(9)：5507−5520.

[17] ZHANG J Z，KONG N，UZUN S，et al. Scalable Manufacturing of Free-Standing, Strong $Ti_3C_2T_x$ MXene Films with Outstanding Conductivity[J]. Advanced Materials，2020，32(23)：2001093.

[18] LI J M，LEVITT A，KURRAN，et al. MXene-Conducting Polymer Electrochromic Microsupercapacitors[J]. Energy Storage Materials，2019，20：455−461.

[19] LONG X，LI J K，XIAO S，et al. A Strongly Coupled Graphene and FeNi Double Hydroxide Hybrid as an Excellent Electrocatalyst for the Oxygen Evolution Reaction[J]. Angewandte Chemie International Edition，2014，53(29)：7584−7588.

[20] MA R，ZHANG X J，ZHUO J T，et al. Self-Supporting, Binder-Free, and Flexible $Ti_3C_2T_x$ MXene-Based Supercapacitor Electrode with Improved Electrochemical Performance[J]. ACS Nano，2022，16(6)：9713−9727.

（责任编辑：李玉华）

Preparation and Electrochemical Performance of MXene/Polyaniline/Activated Carbon Composite Electrode Materials

ZHANG Zherui，LIU Simin，CHEN Yi，LIU Jiating

（College of Packaging and Materials Engineering，Hunan University of Technology，Zhuzhou Hunan 412007， China）

Abstract：To prepare a high-performance flexible hybrid supercapacitor, MXene nanosheets were synthesized via chemical etching. Combined with polyaniline (PANI) and activated carbon (AC), the flexible AC/Mxene/PANI (CMP) composite electrode was fabricated through a physical rolling process after the uniform mixing. As a framework material with a high specific surface area, AC effectively provided loading and active sites, while MXene established ion transport channels. PANI, as a conductive material, accelerated charge transfer between MXene layers. Additionally, the introduction of MXene and PANI significantly enhanced the electrochemical performance of composite electrode due to their excellent pseudocapacitive behavior and increased active surface area. It demonstrated that the CMP-50% (with a mass ratio of AC, MXene and PANI is 2∶1∶1) electrode, having a thickness of 75 μm, exhibited a high capacitance of 313 F/g in sulfuric acid electrolyte at a scan rate of 1 mV/s. Furthermore, it maintained a high capacitance retention rate of 80.9% and a Coulombic efficiency of 98.4% at 5 A/g current density. The introduction of MXene and PANI significantly enhanced the electrode's capacitive performance and conductivity, opening up a new path for the development of high-performance flexible hybrid supercapacitors.

Keywords：MXene；activated carbon；polyaniline；electrochemistry；supercapacitor