聚乳酸微球对$Ti_3C_2T_x$多孔结构湿度传感薄膜性能的影响

谷军闪，赵玉红

（河南科技职业大学，河南 周口 466000）

摘　要：研究采用聚乳酸（PLA）微球作为牺牲模板，通过高剪切乳液法制备粒径均一（约200 nm）的PLA微球，将$Ti_3C_2T_x$与PLA以体积比分别为3∶2和2∶1进行复合。经滴涂成膜及400 ℃氩气气氛下煅烧去除模板，成功构筑具有可调孔隙结构的$Ti_3C_2T_x$多孔薄膜湿度传感器。表征结果显示，$3Ti_3C_2T_x$/2PLA样品比表面积达15.42 m^2/g，孔体积为0.093 4 cm^3/g，平均孔径为17.40 nm，较$Ti_3C_2T_x$薄膜显著提升。XRD谱图和拉曼光谱分析证实，$Ti_3C_2T_x$结构得以保留且$3Ti_3C_2T_x$/2PLA的D带与G带强度比（I_D/I_G）最低，石墨化程度更高。湿度传感性能测试表明，在11%~97%相对湿度（RH）范围内，$3Ti_3C_2T_x$/2PLA传感器灵敏度达7.31 mV/%RH，输出电压为0.94 V（RH 97%），均优于$2Ti_3C_2T_x$/1PLA和$Ti_3C_2T_x$传感器，具有良好的线性度和重复性。研究证实，PLA模板法引入的多孔结构能够有效增加比表面积和气体扩散通道，促进水分子吸附与离子传输，显著提升二维过渡金属碳/氮化物（MXene）基湿度传感器的灵敏度和响应性能。研究为高性能自供电湿度传感器的设计提供新思路。

关键词：聚乳酸微球；$Ti_3C_2T_x$；湿度；薄膜；传感器

中图分类号：TB33；TP212　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-3360（2026）08-0061-05

DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.011

Effect of Polylactic Acid Microspheres on Properties of $Ti_3C_2T_x$ Porous Structure Moisture Humidity Sensing Films

GU Junshan, ZHAO Yuhong

(Henan Vocational University of Science and Technology, Zhoukou 466000, China)

Abstract: Polylactic acid (PLA) microspheres were employed as sacrificial templates, and PLA microspheres with uniform particle size (approximately 200 nm) were prepared via a high-shear emulsion method. $Ti_3C_2T_x$ was then composited with PLA at volume ratios of 3∶2 and 2∶1, respectively. Through drop-coating to form films followed by calcination at 400 ℃ under an argon atmosphere to remove the templates, $Ti_3C_2T_x$ porous thin-film humidity sensors with tunable pore structures were successfully constructed. Characterization results revealed that the $3Ti_3C_2T_x$/2PLA sample exhibited a specific surface area of 15.42 m^2/g, a pore volume of 0.093 4 cm^3/g, and an average pore diameter of 17.40 nm, all of which were significantly improved compared to those of the pristine $Ti_3C_2T_x$ film. XRD patterns and Raman spectroscopy analysis confirmed that the $Ti_3C_2T_x$ structure was preserved, and the $3Ti_3C_2T_x$/2PLA sample showed the lowest intensity ratio of the D-band to the G-band (I_D/I_G), indicating a higher degree of graphitization. Humidity sensing performance tests demonstrated that, within the relative humidity (RH) range of 11%~97%, the $3Ti_3C_2T_x$/2PLA sensor achieved a sensitivity of 7.31 mV/%RH and an output voltage of 0.94 V (RH 97%), both outperforming the $Ti_3C_2T_x$/1PLA and pristine $Ti_3C_2T_x$ sensors, with good linearity and repeatability. The study confirmed that the porous structure introduced by the PLA template method effectively increased the specific surface area and gas diffusion channels, thereby facilitating water molecule adsorption and ion transport, and significantly enhancing the sensitivity and response performance of two-dimensional transition metal carbides/nitrides (MXene)-based humidity sensors. The study provides a new strategy for the design of high-performance self-powered humidity sensors.

Keywords: PLA microspheres; $Ti_3C_2T_x$; Humidity; Film; Sensor

收稿日期 Submitted date 2026-02-17；修回日期 Revised date 2026-03-15；录用日期 Accepted date 2026-04-19

基金项目：周口市哲学社会科学调研课题（ZKSKDY-2024-382）

联系人，gujuns666@163.com

引用本文：谷军闪，赵玉红. 聚乳酸微球对$Ti_3C_2T_x$多孔结构湿度传感薄膜性能的影响[J]. 塑料科技，2026，54(8)：61−65.

Citation：GU J S, ZHAO Y H. Effect of polylactic acid microspheres on properties of $Ti_3C_2T_x$ porous structure moisture humidity sensing films [J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 61-65.

近年来，基于原电池原理的自供电湿度传感器因无须外接电源、结构简单以及可持续运行等优势受到广泛关注。此类传感器通常由两种不同金属电极与吸湿性电解质构成原电池，通过湿度变化调控电解质离子传导和电极反应，直接输出电信号。其中，二维过渡金属碳/氮化物(MXene)材料中的$Ti_3C_2T_x$因其优异的导电性、丰富的表面官能团(—OH、—O、—F)及可调的层间结构，被认为是极具潜力的湿度敏感材料[1-3]。自GOGOTSI团队首次通过选择性刻蚀Ti_3AlC_2制备$Ti_3C_2T_x$以来，MXene材料在储能、电磁屏蔽及传感领域取得了突破性进展[4-5]。LI等[6]研究表明，$Ti_3C_2T_x$表面丰富的亲水基团可与水分子形成氢键，显著调控其电导率变化，实现对环境湿度的快速响应。已有研究指出，致密堆叠的$Ti_3C_2T_x$薄膜虽具有较高导电性，但层间通道有限，不利于水分子的快速扩散与吸附，从而限制传感灵敏度与响应速率[7-8]。因此，构建多孔结构以增加比表面积和气体扩散通道，成为提升MXene湿度传感性能的重要策略。例如，通过冷冻干燥、模板刻蚀或引入聚合物牺牲模板等方法，可有效构筑三维多孔网络，提高水分子在材料中的传输效率[9-11]。同时，多孔结构还可缓解层间堆叠问题，增强结构稳定性[12]。然而，如何在保证机械稳定性的前提下实现$Ti_3C_2T_x$薄膜孔结构尺寸可控且分布均匀，仍是当前研究面临的关键挑战。聚乳酸(PLA)作为一种生物可降解高分子材料，具有良好的成球性和热分解特性，被广泛用作模板材料构筑多孔结构[13]。WANG等[14]和HUANG等[15]利用聚合物微球作为牺牲模板，经高温煅烧去除后可获得均匀多孔网络结构，显著提升电化学与传感性能。然而，PLA微球能否通过调控$Ti_3C_2T_x$孔结构来优化其湿度传感性能、循环稳定性及长期可靠性，这一关键问题尚未得到系统解答。

因此，本研究采用高剪切乳液法制备粒径均一的PLA微球，并按不同体积比将其与$Ti_3C_2T_x$油墨复合。经滴涂成膜及氩气气氛下高温煅烧去除PLA模板，构筑具有可调孔隙结构的$Ti_3C_2T_x$多孔薄膜。系统对比不同$Ti_3C_2T_x$/PLA比例样品与纯$Ti_3C_2T_x$薄膜在不同相对湿度(RH)条件下的电学响应特性，分析多孔结构对灵敏度、响应/恢复时间及循环稳定性的影响机制。研究结果不仅可为优化MXene基湿度传感器的结构设计提供参考，也为利用可降解聚合物模板构筑高性能二维材料多孔结构提供新思路，对推动高性能自供电湿度传感器的发展具有重要意义。

1 实验部分

1.1 主要原料

Ti_3AlC_2粉末，质量分数≥99%，粒径<40 μm，北京北科新材料科技有限公司；氟化氢(HF，质量分数48%)、四甲基氢氧化铵(TMAH，分析纯，25%水溶液)，阿拉丁试剂(上海)有限公司；聚乙烯醇(PVA，质量分数99%)、PLA聚合物(质量分数99%)，上海麦克林生化科技有限公司；二氯甲烷(DCM)，分析纯，国药集团化学试剂有限公司；去离子水，实验室自制。

1.2 仪器与设备

X射线衍射(XRD)，ARL EQUINOX 5000，美国赛默飞世尔科技公司；拉曼光谱仪，LabRAM HR Evolution，日本HORIBA公司；全自动比表面积及孔径分析仪，JW-BK132F，北京精微高博仪器有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 $Ti_3C_2T_x$粉末的制备

取15 g的Ti_3AlC_2粉末，浸入200 mL的24% HF溶液中，于40 ℃下连续搅拌24 h，以去除铝元素。将所得悬浮液用去离子水以10 000 r/min的转速离心6次，每次离心10 min，直至悬浮液的pH值达到6.0，得到$Ti_3C_2T_x$粉末。将$Ti_3C_2T_x$粉末分散于100 mL的TMAH溶液中，在室温下搅拌24 h。将去离子水加入悬浮液中，将其在离心管中剧烈振荡，以3 500 r/min离心5 min，弃去上层清液。向离心管中加入去离子水，充分摇匀，放入超声波清洗机中清洗30 min。超声处理后，将溶液以5 000 r/min离心15 min。将黑色悬浮液倒入烧杯中备用。重复上述步骤直至上清液变得透明，得到$Ti_3C_2T_x$悬浮液，悬浮液使用抽吸泵过滤，然后在真空干燥箱中于60 ℃干燥9 h，得到$Ti_3C_2T_x$粉末。

1.3.2 多孔$Ti_3C_2T_x$的制备

首先，制备PLA微球。在环境温度下将PLA聚合物溶解在DCM溶剂中(PLA质量分数为5%)，利用密封容器来减轻DCM的挥发，制备油相。选用PVA作为水相稳定剂，由1% PVA的去离子水溶液组成，在60 ℃条件下搅拌30 min，以确保PLA完全溶解。在11 000 r/min的高剪切均化下，将PLA和PVA体积比为1∶3的油相引入水相中15 min，产生水包油乳液。在室温下过夜蒸发，除去剩余DCM溶剂。PLA微球经历多次离心循环(每次45 min，6 000 r/min)，以消除任何残留的PVA表面活性剂。收集所得PLA微球，在45 ℃下干燥48 h，用于进一步的实验。

将$Ti_3C_2T_x$颗粒以10 g/L的质量浓度分散于去离子水中，同时在去离子水中以10 g/L的质量浓度另外制备单独的PLA微球溶液。将$Ti_3C_2T_x$油墨和PLA微球溶液分别以$Ti_3C_2T_x$和PLA体积比为3∶2和2∶1进行混合，得到$Ti_3C_2T_x$/PLA混合物，分别命名为$3Ti_3C_2T_x$/2PLA与$2Ti_3C_2T_x$/1PLA。随后，将2 mL $Ti_3C_2T_x$/PLA混合物分别滴涂在陶瓷基底(孔径0.1~0.2 μm)上，将其置于60 ℃的加热板上，得到$Ti_3C_2T_x$/PLA复合膜。在氩气流下，于400 ℃煅烧涂覆的基底1 h，以除去PLA模板，得到多孔$Ti_3C_2T_x$膜涂覆的基底。将1.2 mL的$Ti_3C_2T_x$油墨(10 mg/mL)滴涂在陶瓷基材上，在60 ℃的加热板上干燥，得到纯$Ti_3C_2T_x$薄膜。

1.3.3 湿度传感器电极制造

将$3Ti_3C_2T_x$/2PLA与$2Ti_3C_2T_x$/1PLA在300 W条件下进

行氧等离子体处理15 s，以增强$Ti_3C_2T_x$/PLA薄膜表面的亲水性。将3$Ti_3C_2T_x$/2PLA、2$Ti_3C_2T_x$/1PLA和$Ti_3C_2T_x$涂覆的基底用10 μL的1 mol/L $MgCl_2$作为电解质溶液滴涂并在基底中央干燥。将Cu和Al金属带附着在这些基板上作为原电池型自供电湿度传感装置的电极，电极之间有1 mm的间隙。该装置基于Cu-Al原电池原理工作。Cu和Al具有显著的标准电极电势差，$MgCl_2$电解质在吸湿后解离出Mg^{2+}和Cl^-，在$Ti_3C_2T_x$/PLA多孔薄膜中形成离子传输通道。当环境湿度变化时，电解质浓度改变，导致离子迁移速率和界面氧化还原反应动力学发生变化，从而在Cu-Al电极回路中自发产生开路电压信号，不需要外部电源供电即可实现湿度检测。

1.4 性能测试与表征

XRD测试：采用X射线衍射仪进行测试，Cu Kα辐射（λ=0.154 06 nm），扫描范围5°~90°，速率5 (°)/min。

拉曼光谱表征：激发波长532 nm，扫描范围2 000~800 cm^{-1}，通过D带与G带强度比（I_D/I_G）分析石墨化程度与碳层有序性。

比表面积和孔径测试：采用N_2吸附-脱附法，使用全自动比表面积及孔径分析仪测定样品比表面积、孔体积及孔径分布。测试前样品在120 ℃下真空干燥12 h，去除表面吸附水分，通过BET方程计算比表面积，通过Barrett-Joyner-Halenda (BJH)模型分析孔径分布，可评估材料的多孔结构优势。

湿度传感性测试条件：在湿度传感测试前，将传感器置于恒定环境中平衡24 h。湿敏性能测试采用自制湿度测试系统完成，该系统由密闭测试腔、湿度控制模块和电学信号采集模块组成。通过干湿气流混合法调节环境相对湿度，相对湿度范围为33%~97%，测试温度保持在25 ℃。在不同湿度条件下记录传感器电阻变化，动态响应曲线及湿度响应特性。循环稳定性测试则通过多次湿度切换循环记录其响应信号变化，以评价传感器的长期可靠性和重复性。

2 结果与讨论

2.1 XRD分析

图1为$Ti_3C_2T_x$和$Ti_3C_2T_x$/PLA复合薄膜的XRD谱图。

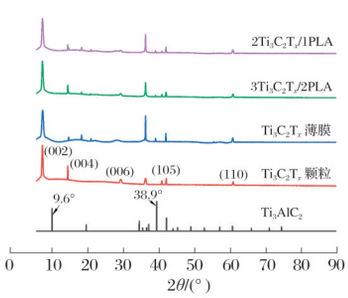


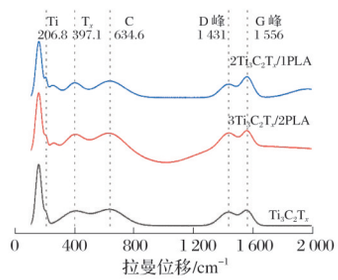
图1 $Ti_3C_2T_x$和$Ti_3C_2T_x$/PLA复合薄膜的XRD谱图

Fig.1 XRD patterns of $Ti_3C_2T_x$ and $Ti_3C_2T_x$/PLA composite films

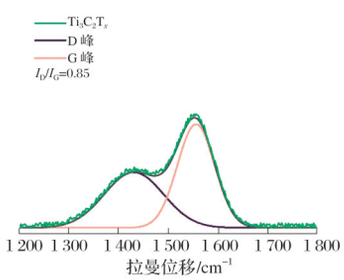
从图1可以看出，Ti_3AlC_2在9.6°和38.9°处的特征峰消失[16]；$Ti_3C_2T_x$的特征峰对应于(002)、(004)、(006)、(105)和(110)晶面[17-18]。$Ti_3C_2T_x$的特征峰在$Ti_3C_2T_x$、3$Ti_3C_2T_x$/2PLA和2$Ti_3C_2T_x$/1PLA薄膜中均存在，证实了$Ti_3C_2T_x$结构在所有样品中均得到保留。

2.2 拉曼分析

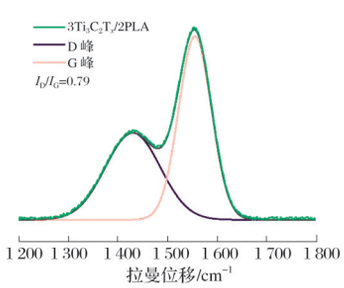
图2为$Ti_3C_2T_x$和$Ti_3C_2T_x$/PLA复合薄膜的拉曼光谱。



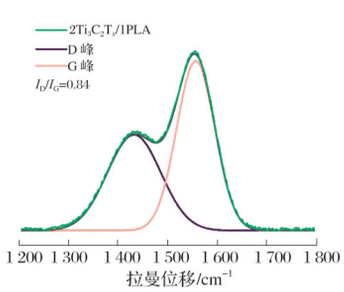
(a) D带与G带对比



(b) $Ti_3C_2T_x$薄膜



(c) 3$Ti_3C_2T_x$/2PLA薄膜



(d) 2$Ti_3C_2T_x$/1PLA薄膜

图2 $Ti_3C_2T_x$和$Ti_3C_2T_x$/PLA复合薄膜的拉曼光谱

Fig.2 Raman spectra of $Ti_3C_2T_x$ and $Ti_3C_2T_x$/PLA composite films

从图2可以看出，$Ti_3C_2T_x$在206.8、397.1、634.6 cm^{-1}处的拉曼位移分别归属于$Ti_3C_2T_x$中不同的钛(Ti)、端基官能团(T_x)和碳(C)区域[19-21]，这些特征峰在3$Ti_3C_2T_x$/2PLA和

$2Ti_3C_2T_x$/1PLA 样品中均得以保留。位于 1 431 cm^{-1} 和 1 556 cm^{-1} 处的峰被确认为 D 带和 G 带，分别源于 sp^3 杂化碳原子(D 峰)和 sp^2 杂化碳原子(G 峰)的振动[22-23]。与 $Ti_3C_2T_x$ 和 $2Ti_3C_2T_x$/1PLA 相比，$3Ti_3C_2T_x$/2PLA 的 I_D/I_G 最低，表明经煅烧后 PLA 残留的碳质组分缺陷密度较低，其石墨化程度更高。

2.3 比表面积和孔径分析

表 1 为 $Ti_3C_2T_x$ 和 $Ti_3C_2T_x$/PLA 复合薄膜的孔结构参数与 N_2 吸附-脱附特性。从表 1 可以看出，$Ti_3C_2T_x$、$2Ti_3C_2T_x$/1PLA 和 $3Ti_3C_2T_x$/2PLA 的比表面积分别为 3.80、14.64、15.42 m^2/g。多孔 $Ti_3C_2T_x$ 薄膜样品的比表面积随 PLA 含量的增加而增大。$Ti_3C_2T_x$ 薄膜的孔体积为 0.042 7 cm^3/g，平均孔径为 14.06 nm，说明其孔隙数量较少且孔径较小。$2Ti_3C_2T_x$/1PLA 的孔体积增至 0.083 1 cm^3/g，平均孔径扩大至 15.31 nm，呈更为开放的多孔结构。$3Ti_3C_2T_x$/2PLA 薄膜则表现出最优的孔结构参数，其孔体积为 0.093 4 cm^3/g，平均孔径达 17.40 nm，比表面积和孔体积均为三者中最高，证实其具有最佳的孔隙结构。以上结果表明，$3Ti_3C_2T_x$/2PLA 薄膜具有更高的孔隙密度和更优的孔结构特性。

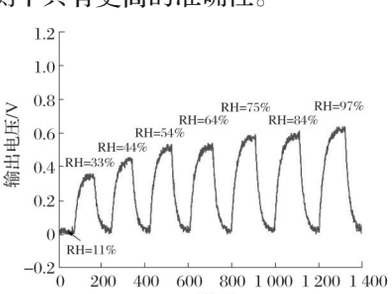
表 1 $Ti_3C_2T_x$ 和 $Ti_3C_2T_x$/PLA 复合薄膜的孔结构参数与 N_2 吸附-脱附特性

Tab.1 Pore structure parameters and N_2 adsorption-desorption characteristics of $Ti_3C_2T_x$ and $Ti_3C_2T_x$/PLA composite films

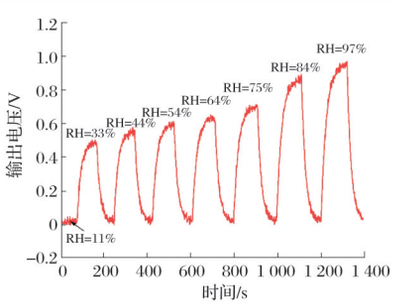
样品	平均孔径/nm	孔径总体积/($cm^3 \cdot g^{-1}$)	最大吸附量/($cm^3 \cdot g^{-1}$)	单分子层吸附量/($cm^3 \cdot g^{-1}$)	比表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)
$Ti_3C_2T_x$	14.06	0.042 7	41.50	2.44	3.80
$2Ti_3C_2T_x$/1PLA	15.31	0.083 1	63.54	9.46	14.64
$3Ti_3C_2T_x$/2PLA	17.40	0.093 4	82.59	9.91	15.42

2.4 $Ti_3C_2T_x$基传感器的湿度传感性能分析

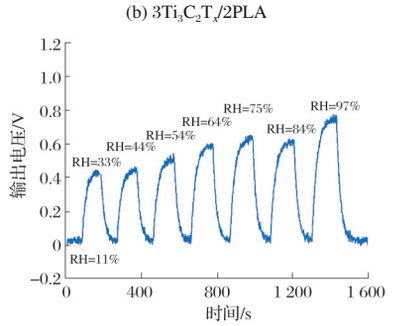
图 3 为 $Ti_3C_2T_x$ 和 $Ti_3C_2T_x$/PLA 复合薄膜基传感器的湿度传感性能及线性关系。从图 3a~图 3c 可以看出，$3Ti_3C_2T_x$/2PLA 传感器的输出电压随着 RH 的增加而逐渐增大。当 RH 从 11% 依次升高至 33%、44%、54%、64%、75%、84% 和 97% 时，$3Ti_3C_2T_x$/2PLA 传感器的输出电压分别约为 0.47、0.54、0.58、0.62、0.69、0.85、0.94 V。$3Ti_3C_2T_x$/2PLA 传感器在 11%~97% RH 范围内的灵敏度为 7.31 mV/%RH，灵敏度定义为输出电压变化量与 RH 单位变化量的比值。从图 3d 可以看出，$2Ti_3C_2T_x$/1PLA 和 $Ti_3C_2T_x$ 传感器的灵敏度分别为 4.91 mV/% RH 和 4.10 mV/%RH。当 RH 为 97% 时，$3Ti_3C_2T_x$/2PLA 传感器的输出电压(0.94 V)高于 $2Ti_3C_2T_x$/1PLA 传感器(0.73 V)和 $Ti_3C_2T_x$ 传感器(0.61 V)。$3Ti_3C_2T_x$/2PLA 传感器表现出的较高输出电压和良好灵敏度，表明多孔 $Ti_3C_2T_x$ 薄膜中孔隙密度的增加有助于增强水分吸附，促进电极之间的离子传输，并影响电化学性能[24]。更大的比表面积(15.42 m^2/g)和孔径(17.40 nm)证实孔隙密度的增加为 $3Ti_3C_2T_x$/2PLA 薄膜提供比其他薄膜更多的水分吸附空间[25]。与其他传感器相比，$3Ti_3C_2T_x$/2PLA 传感器表现出更好的线性度，表明其在 RH 检测中具有更高的准确性。



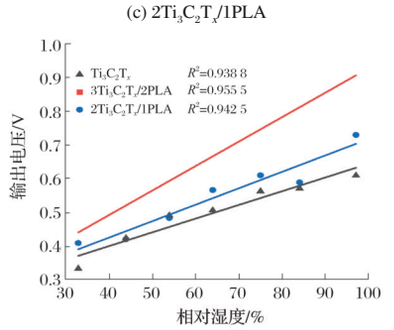
(a) $Ti_3C_2T_x$



(b) $3Ti_3C_2T_x$/2PLA



(c) $2Ti_3C_2T_x$/1PLA



(d) 11%~97% RH 下的线性曲线

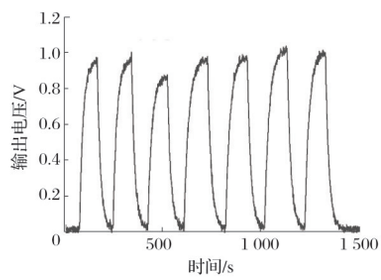
图 3 $Ti_3C_2T_x$ 和 $Ti_3C_2T_x$/PLA 复合薄膜基传感器的湿度传感性能及线性关系

Fig.3 Humidity sensing performance and linear relationship of $Ti_3C_2T_x$ and $Ti_3C_2T_x$/PLA composite films based sensors

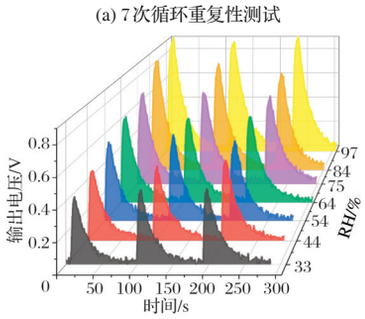
2.5 $3Ti_3C_2T_x$/2PLA 传感器的重复性与稳定性测试

图 4 为 $3Ti_3C_2T_x$/2PLA 传感器的重复性与稳定性。

$3Ti_3C_2T_x$/2PLA传感器在97% RH下经过7次循环的重复性测试结果如图4a所示。从图4a可以看出，平均输出电压约为0.946 8 V，相对标准偏差(RSD)为4.72%。当RH恢复至11%时，电压急剧下降。这表明$3Ti_3C_2T_x$/2PLA传感器在循环测试中具有良好的重复性和一致性。从图4b可以看出，$3Ti_3C_2T_x$/2PLA传感器对RH变化表现出快速响应，在不同湿度水平的3个循环中展现出良好的循环性能。



(a) 7次循环重复性测试



(b) 多湿度水平循环测试

图4 $3Ti_3C_2T_x$/2PLA传感器的重复性与稳定性

Fig.4 Repeatability and stability of $3Ti_3C_2T_x$/2PLA sensor

3 结论

本研究通过PLA微球模板法成功构筑具有可控孔隙的$Ti_3C_2T_x$多孔薄膜。结果表明，引入多孔结构能够显著增加材料的比表面积和孔体积，为水分子提供更多的吸附位点和更快的扩散通道。优化后的$3Ti_3C_2T_x$/2PLA传感器在灵敏度、输出电压及线性度方面均优于$Ti_3C_2T_x$薄膜，证实多孔结构设计是提升MXene基湿度传感性能的关键策略。$Ti_3C_2T_x$与PLA的比例不仅影响孔隙结构的形成，还对材料的石墨化程度产生调控作用。$3Ti_3C_2T_x$/2PLA样品在煅烧后表现出最低的I_D/I_G以及更高的结构有序性和石墨化程度。这表明适当的模板比例有助于在去除PLA的同时保留$Ti_3C_2T_x$的本征结构，可能优化其导电性，从而协同提升传感性能。本研究展示的PLA牺牲模板法不仅实现了孔隙结构的可控制备，还赋予传感器优异的重复性和稳定性。结合MXene材料本身的亲水性和导电性，该多孔薄膜在高湿度环境下表现出优异的电学响应能力。

参考文献

[1] 王海瑞, 郭靖, 侯恩慧, 等. 二维过渡金属碳化物(MXenes)在电化学传感器中的应用进展[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2025, 46(4): 7-15.

[2] 王云帆, 孙蕾, 王春静, 等. 基于电射流打印的Ti_3C_2 MXene基柔性气体传感器的制备及其性能研究[J]. 化工新型材料, 2026, 54(1): 151-155.

[3] 苏丹, 王建省, 吴家伟, 等. 二维$Ti_3C_2T_x$ MXene基复合材料在柔性传感器领域的研究进展[J]. 陶瓷学报, 2023, 44(3): 408-416.

[4] 刁延芳, 邵会菊, 张芳芳, 等. MXene/ZnO导电分离膜的制备及性能[J]. 塑料科技, 2024, 52(3): 8-12.

[5] 张智超, 祝萌. 改性棉织物/MXene电磁屏蔽复合材料的制备及性能[J/OL]. 精细化工, 1-12[2026-02-06]. https://doi.org/10.13550/j.jxhg.20250731.

[6] LI P, WANG X J, YU S G. Preparation and humidity sensitivity performance study of $Ti_3C_2T_x/SnO_2$ nanocomposites[J]. Surfaces and Interfaces, 2025, 72: 107161.

[7] 任书芳, 全雪冰, 陈雨, 等. MWCNTs/$Ti_3C_2T_x$修饰玻碳电极无酶电流型传感器用于汗液中吗啡的检测[J]. 分析测试学报, 2026, 45(4): 878-885.

[8] WU J L, LU P, DAI J X, et al. High performance humidity sensing property of $Ti_3C_2T_x$ MXene-derived $Ti_3C_2T_x/K_2Ti_4O_9$ composites[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2021, 326: 128969.

[9] YAO C X, XUE Z Y, CHEN Q Q, et al. A review of 3D porous MXene architectures: Design strategies and diverse electrochemical applications [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 990: 174434.

[10] YAN Q Y, CHENG Y, WANG R R, et al. Recent advances in 3D porous MXenes: Structures, properties and applications[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(9): 093001.

[11] 杜倩, 侯明, 高冀芸, 等. f-$Ti_3C_2T_x$/ZIF-8异质结构增强NO_2气体传感器的敏感性能[J]. 化工进展, 2024, 43(7): 3946-3954.

[12] SU Y F, ZHANG Q Y, CHEN L, et al. Improved stability of layered and porous nickel-rich cathode materials by relieving the accumulation of inner stress[J]. ChemSusChem, 2020, 13(2): 426-433.

[13] 张俊伟. 熔体微分电纺PLA纤维膜的制备及油吸附性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2025.

[14] WANG Z Y, LI C, YANG S X, et al. Template synthesis of $MgMn_2O_4$ graded porous microspheres and electrochemical properties[J]. Ceramics International, 2024, 50(23): 50222-50229.

[15] HUANG J, LIU C, JIN Y Z, et al. Hierarchical porous carbon synthesis by carbonized polymer dots-based sacrificial template for high-performance supercapacitors[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 461: 141930.

[16] GUPTA A, RHO Y J, LIN W C, et al. Graphene-templated hybrid prussian blue-MXene nanocomposites for broadband photodetection with ultra-high carrier generation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2025, 13(34): 28483-28495.

[17] 张馨月. $Ti_3C_2T_x$ MXene材料的制备及其储能性质研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.

[18] KUMAR S, REHMAN M A, LEE S, et al. Supercapacitors based on $Ti_3C_2T_x$ MXene extracted from supernatant and current collectors passivated by CVD-graphene[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 649.

[19] LI Y X, HUANG S H, WEI C J, et al. Adhesion of two-dimensional titanium carbides (MXenes) and graphene to silicon[J]. Nature Communications, 2019, 10: 3014.

[20] 牟奔. $Ti_3C_2T_x$ MXene/Ag/ZnO表面增强拉曼散射衬底材料的制备及性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2025.

[21] 李熙. 无氟制备二维$Ti_3C_2T_x$ MXene和二维材料基Co_3O_4复合材料的制备及析氧催化性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.

[22] 陈科帆. 二维$Ti_3C_2T_x$ MXene合成、形貌调控及其电化学性能研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.

[23] TANG B, HU G X, GAO H Y. Raman spectroscopic characterization of graphene[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2010, 45(5): 369-407.

[24] YAO Y, LI X N, SISICAN K M, et al. Progress towards efficient MXene sensors[J]. Communications Materials, 2025, 6: 210.

[25] 景欣瑞, 史翔, 杜慧玲, 等. 电化学法合成氧化锌/聚苯胺复合多孔薄膜的湿敏传感特性[J]. 传感技术学报, 2020, 33(3): 335-339.