文章编号:1674-2869(2025)03-0298-07

碳化硅纳米颗粒/聚吡咯复合气凝胶的制备与性能研究

孙春英,黄勉如,李 亮,季家友*
武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:为了推进新能源的开发利用和实现能源的可持续发展,可利用电化学和光热转换技术对能源进行存储和转化。本文采用原位氧化聚合法,在低温条件下以九水硝酸铁为氧化剂将吡咯单体在碳化硅纳米颗粒表面进行聚合,通过控制反应时间和搅拌速度实现聚吡咯有效包覆,最后通过冷冻干燥得到碳化硅纳米颗粒/聚吡咯复合气凝胶。通过扫描电子显微镜、X射线衍射、傅里叶变换红外光谱、电化学测试和水蒸发实验等探究了复合气凝胶与聚吡咯气凝胶之间的性能差异,以及吡咯与碳化硅纳米颗粒的质量比对复合气凝胶的形貌、电化学性能和光热蒸发性能的影响规律。结果表明:碳化硅纳米颗粒与吡咯质量比为12.0∶193.8的复合气凝胶的电化学与光热性能最佳。该复合气凝胶在1 $A\cdot g^{-1}$的电流密度下的比电容为216.9 $F\cdot g^{-1}$,在200 $mV\cdot s^{-1}$的扫描速率下进行1 000次循环伏安测试后的比电容保持率为95.0%,其电化学性能与聚吡咯气凝胶相比有明显提升;1 $kW\cdot m^{-2}$光照强度下,复合气凝胶在模拟海水中的蒸发速率可达1.98 $kg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$,而且在相同条件下进行12次光热循环后,其蒸发速率保持在1.98~2.03 $kg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$范围内。

关键词:聚吡咯;碳化硅纳米颗粒;气凝胶;电化学;光热蒸发
中图分类号:TP212;TQ427.26 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202404021

Preparation and properties of silicon carbide nanoparticles/polypyrrole composite aerogels

SUN Chunying, *HUANG Mianru*, *LI Liang*, *JI Jiayou**
School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: Electrochemical and photothermal conversion technologies are used for energy storage and conversion to promote the development and utilization of new energy and achieve sustainable energy development. In this study, an in situ oxidative polymerization method was used to polymerize pyrrole monomer on the surface of silicon carbide nanoparticles at low temperature using ferric nitrate hydrate as oxidant. And homogeneous encapsulation of polypyrrole was achieved by controlling the reaction time and stirring speed. The composite aerogels of silicon carbide nanoparticles/polypyrrole were obtained by freeze-drying. The performance differences between the composite aerogels and polypyrrole aerogels, as well as the effects of the mass ratio of pyrrole to silicon carbide nanoparticles on the morphology, electrochemical properties, and photothermal evaporation properties of the composite aerogels, were explored with scanning electron microscopy, X-ray diffraction, Fourier transform infrared spectroscopy, electrochemical tests, and water evaporation experiments. The results showed that the composite aerogel with a mass ratio of silicon

收稿日期:2024-04-15
基金项目:国家自然科学基金(U24A20554);湖北省重点研发专项(2023BAB100);贵州省重大专项(黔科合重大专项字[2024]012)
作者简介:孙春英,硕士研究生。Email:2445617296@qq.com
***通信作者**:季家友,博士,教授。Email:Jijy@wit.edu.cn
引文格式:孙春英,黄勉如,李亮,等. 碳化硅纳米颗粒/聚吡咯复合气凝胶的制备与性能研究[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(3):298-304.

carbide nanoparticles to pyrrole of 12.0∶193.8 has the best electrochemical and photothermal properties. The specific capacitance of the composite aerogel was 216.9 $F \cdot g^{-1}$ at a current density of 1 $A \cdot g^{-1}$, and the retention rate of the specific capacitance was 95.0% after 1 000 cyclic voltammetry tests at a scan rate of 200 $mV \cdot s^{-1}$. Its electrochemical performance was significantly improved compared with that of the polypyrrole aerogel. Under a light intensity of 1 $kW \cdot m^{-2}$, the evaporation rate of the composite aerogel in simulated seawater could reach 1.98 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$. And after 12 photothermal cycles under the same conditions, its evaporation rate remained in the range of 1.98 − 2.03 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$.

Keywords: polypyrrole; silicon carbide nanoparticles; aerogel; electrochemistry; photothermal evaporation

随着全球经济的快速发展，人类对能源的需求量持续增长，特别是煤、石油等化石能源的大量消耗不仅加剧了能源危机，还造成了严重的环境污染。开发和利用清洁、可再生的新能源成为解决能源和环境问题的一个重要途径[1]。为了推进新能源的开发利用和实现能源的可持续发展，迫切需要发展相应的能源储存和转化技术。

电化学储能是一种通过化学反应将电能转化为化学能，并在需要时将化学能转化为电能的一种技术。超级电容器和可充电电池是目前最常见的两种电化学储能系统[2]。超级电容器相较于传统的储能器件，具有超高功能密度、长循环寿命、快速充放电等特性，在智能家居、混合动力汽车、便携式电子设备等领域得到了广泛应用[3]。电极作为超级电容器的核心组件，其材料的选择与制备直接影响器件的整体性能[4-5]。光热转换是将光能转化为热能的一种直接利用太阳能的技术，已应用于海水淡化、蒸汽产生、能源生产等领域[6]。海水淡化作为一种极具前景的淡水获取方式，因其储量丰富、环境友好而备受关注[7-8]。如何开发低成本、高效率的先进光热材料是当前研究的热点。

聚吡咯（polypyrrole，PPy）作为一种综合性能良好的导电聚合物，具有成本低、合成工艺简单、导电性和热稳定性良好等优点[9]，已经广泛应用于人工肌肉、电化学传感器[10]、超级电容器[11]等方面。此外，PPy还具有聚合物、无机半导体和金属导体的特性，在微波吸收[12]、电磁屏蔽[13]及水蒸发[14]等领域具有巨大的潜在应用价值。Zheng等[15]采用简单环保的水热法，以PPy纳米管为骨架，制备了一种独特的PPy/$NiCo_2S_4$复合电极材料。以PPy纳米管为核心，以缠绕的片状$NiCo_2S_4$为外壳的PPy/$NiCo_2S_4$复合电极材料具有较大的比表面积（217 $m^2 \cdot g^{-1}$）、快速的电荷传输通道、高比电容（908.1 $F \cdot g^{-1}$，1 $A \cdot g^{-1}$）和优异的循环性能。刘斐等[16]利用二氧化碳可逆体系溶解纤维素制成水凝胶，并采用原位聚合法实现吡咯（pyrrole，Py）与水凝胶的复合，冷冻干燥后得到聚吡咯复合纤维素气凝胶材料。所得光热气凝胶具有亲水多孔结构，有利于水分的吸收与运输。在1 $kW \cdot m^{-2}$强度的光照下，该气凝胶的蒸发速率为1.71 $kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$。

PPy用作电极材料在电化学循环伏安和充放电过程中会发生体积膨胀与收缩，导致循环稳定性降低[17-18]。PPy用作光热材料在光热蒸发过程中的亲水性弱、蒸发效率低[19]。碳化硅（silicon carbide，SiC）纳米颗粒由于具有高电子迁移率、高的热传导性能以及良好的热稳定性和化学稳定性[20-24]，可应用于超级电容器、光催化、传感器、太阳能蒸发器等领域[25-26]。SiC纳米颗粒与PPy复合有助于提高复合材料的整体导电能力，促进电子传输，降低内阻，从而提升电化学性能。并且SiC纳米颗粒的引入增加了活性位点，提升了复合材料的电化学活性，能有效抑制PPy在充放电过程中的体积膨胀，保持电极结构完整，减少容量衰减，进而改善材料的循环稳定性。

本文采用原位氧化聚合法，在低温条件下以九水硝酸铁为氧化剂于SiC纳米颗粒上原位聚合PPy，再通过冷冻干燥处理得到碳化硅/聚吡咯（silicon carbide/polypyrrole，SiC/PPy）复合气凝胶。探究了SiC纳米颗粒和Py的投料质量比对复合气凝胶的形貌、电化学性能和光热蒸发性能的影响。

1　实验部分

1.1　原　料

SiC纳米颗粒（上海阿拉丁生化科技股份有限公司，分析纯），Py、甲基橙、九水硝酸铁（国药集团化学试剂有限公司，分析纯），去离子水（实验室自制）。

1.2　复合气凝胶的制备

将不同质量（0、3、12、15 mg）的SiC纳米颗粒加入5 mL无水乙醇中，超声30 min，再加入0.01 g甲基橙搅拌（400 $r \cdot min^{-1}$）4.5 h，最后加入193.8 mg

Py搅拌18 h,得到溶液A。将2 mL去离子水与0.75 g九水硝酸铁混合,得到溶液B。将溶液A和溶液B冰浴,待体系温度降至0~4 ℃,将溶液B缓慢滴入溶液A中,静置24 h后得到黑色固态水凝胶。先用去离子水洗涤固态水凝胶,再通过冷冻干燥处理获得PPy/SiC复合气凝胶。制备过程如图1所示。含有0、3、12、15 mg SiC纳米颗粒的复合气凝胶分别记作PPy、SP-1、SP-2、SP-3。

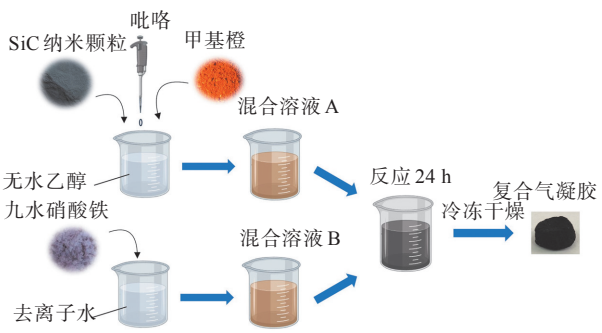

图1 PPy/SiC复合气凝胶的制备过程

Fig. 1 Preparation process of PPy/SiC composite aerogel

1.3 表征与测试

1.3.1 微观形貌表征 采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)(JSM-5510LV)观察样品的表面形貌。采用X射线衍射仪(X-ray diffractometer,XRD)(D8 ADVANCE)和傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectrometer,FTIR)(NICOLET6 700)测试样品的物相组成和结构特征。

1.3.2 电化学性能测试 将样品、乙炔黑、质量分数为10%的聚四氟乙烯按一定比例混合后制成3 mm×3 mm的小方块,用10 MPa的压力将其固定在钢网片内制成电极材料。采用以电极材料为工作电极、Pt为辅助电极、Ag/AgCl为参比电极的三电极体系测试电极材料在1 mol·L^{-1} H_2SO_4电解液中的电化学性能。

采用科思特CS 2350型电化学工作站测试电极材料的线性循环伏安(cyclic voltammetry,CV)曲线、恒电流充放电(galvanostatic charge-discharge, GCD)曲线、电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)。基于不同电流密度下的GCD曲线,依据式(1)计算电极材料的比电容。

$$C = \frac{I \times \Delta t}{m \times \Delta V} \tag{1}$$

式(1)中:C为比电容(F·g^{-1}),I为放电电流(A),Δt为放电时间(s),m为活性物质的质量(g),ΔV为总电压差(V)。

1.3.3 光热蒸发性能测试 将表面均匀涂有20 mg PPy/SiC复合气凝胶粉末的泡沫圆片放置在装有模拟海水(质量分数为3.5%的NaCl溶液)的烧杯中,用氙灯光源(1 kW·m^{-2})模拟太阳光进行照射。记录模拟海水蒸发装置在不同时间的质量损失和界面温度。

在恒定实验条件下,对涂覆PPy/SiC复合气凝胶的泡沫圆片进行了12次光热循环测试(1 h/循环),并记录蒸发装置在每个循环周期后的质量损失。对涂覆复合气凝胶的泡沫圆片进行3次加热/冷却循环测试(5 min光照/5 min暗间隔),实时监测并记录蒸发装置在循环过程中的界面温度变化。

2 结果与讨论

2.1 SEM表征

SiC纳米颗粒、SP-3、SP-2、SP-1样品的SEM图如图2所示。由图2(a)可以观察到SiC纳米颗粒为直径范围在20~160 nm的不规则类球形颗粒。如图2(b,c,d)所示,SP-3、SP-2、SP-1均呈现类球形颗粒团聚特征,且颗粒的粒径依次为100~200、120~220、130~240 nm。复合气凝胶的粒子直径较SiC纳米颗粒有所增大,这是因为Py单体在氧化聚合过程中生成的PPy包裹在SiC纳米颗粒表面。而且,由于SP-3、SP-2、SP-1中SiC纳米颗粒与Py的投料质量比依次递减,包裹在SiC纳米颗粒外的PPy层依次变厚,从而导致SP-3、SP-2、SP-1的粒子直径依次增大,表明PPy成功包裹在SiC纳米颗粒上。

2.2 XRD表征

SiC纳米颗粒和SP-2的XRD图谱如图3所示。SiC纳米颗粒的XRD图谱在2θ为35.7°、41.6°、60.0°和72.1°处出现尖锐的衍射峰,分别与SiC中的(111)、(200)、(220)和(311)标准晶面的衍射峰对应[27]。SP-2的XRD图谱在2θ为20°~30°之间出现的宽波段的峰是非晶态PPy的特征峰[28],在2θ为35.7°和60.1°处的微弱衍射峰分别归属于SiC纳米颗粒的(111)、(220)晶面对应的特征峰。从SP-2的XRD图谱中未能观察到SiC纳米颗粒的(200)、(311)晶面对应的衍射峰,这是因为SiC纳米颗粒被PPy包裹在内部,SiC纳米颗粒的特征峰被PPy的峰掩盖。这也说明在SiC/PPy复合气凝胶中,PPy包覆在SiC纳米颗粒上。

2.3 FTIR表征

SiC纳米颗粒、PPy和SP-2的FTIR谱图如图4所示。在SiC纳米颗粒的FTIR谱图中,799和919 cm^{-1}

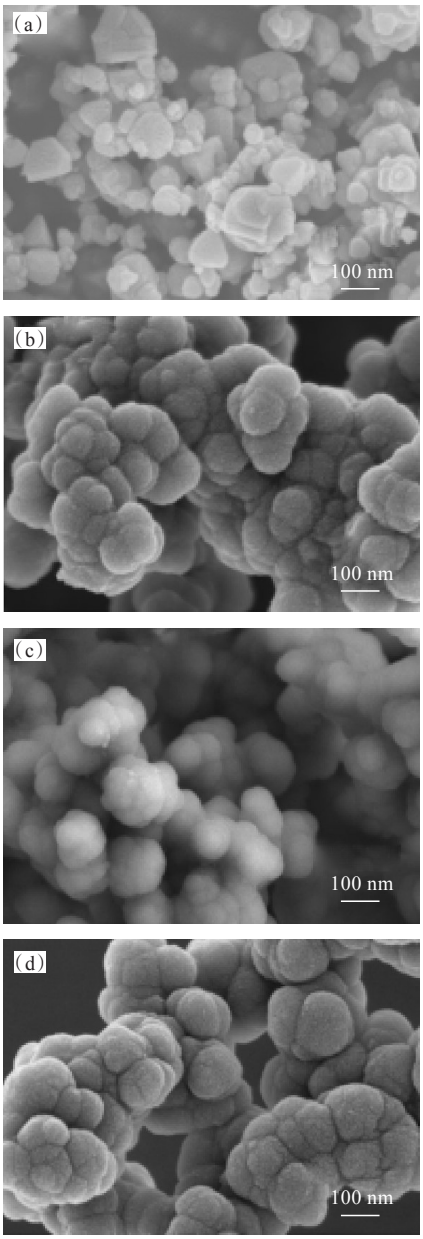

图 2　SiC 纳米颗粒(a)、SP-3 (b)、SP-2 (c)和 SP-1 (d)的 SEM 图

Fig. 2　SEM images of SiC nanoparticles (a), SP-3 (b), SP-2 (c), and SP-1 (d)

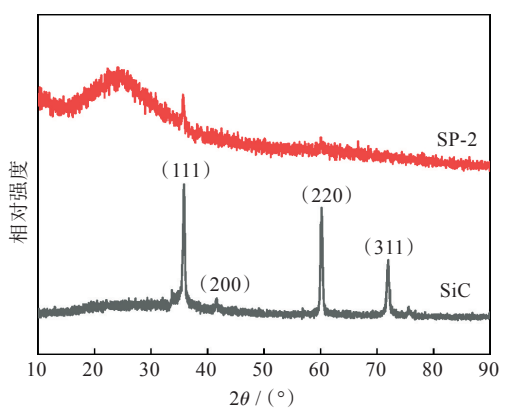

图 3　SiC 纳米颗粒和 SP-2 的 XRD 图

Fig. 3　XRD patterns of SiC nanoparticles and SP-2

处的吸收峰是由 Si—C 键伸缩振动产生的[29]。在 PPy 的 FTIR 谱图中，3 446、1 556、1 457、1 383、1 187 cm^{-1} 处的特征峰分别是由 N—H 键伸缩振动、吡咯环中的 C=C 双键骨架振动[30]、吡咯环对称伸缩振动、C—N 键伸缩振动和 C—H 键面内变形振动引起的。在 SP-2 的 FTIR 谱图中，可以观察到上述 PPy 的特征峰，但是几乎观察不到 SiC 纳米颗粒的特征峰，这是因为 SP-2 中的 SiC 纳米颗粒被 PPy 完全包覆。FTIR 表征结果进一步验证了 PPy 与 SiC 纳米颗粒成功复合。

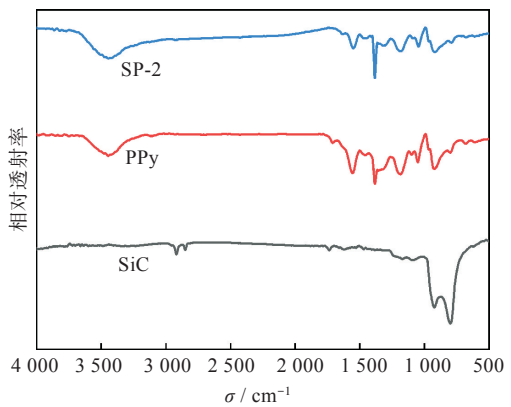

图 4　SiC 纳米颗粒、PPy、SP-2 的 FTIR 谱图

Fig. 4　FTIR spectra of SiC nanoparticles, PPy and SP-2

2.4　电化学性能测试

图 5(a)是 PPy、SP-3、SP-2、SP-1 在 −0.4~0.6 V 的电压窗口下、扫描速率为 50 $mV·s^{-1}$ 的 CV 曲线。PPy 的 CV 曲线形状近似矩形，这展示了双电层电容行为的典型特征。SP-3、SP-2、SP-1 的 CV 曲线形状均为准矩形。相较于 PPy 气凝胶，添加了 SiC 纳米颗粒的复合气凝胶的 CV 曲线包裹的面积明显增大，说明 SiC 纳米颗粒与 PPy 进行复合能够增强复合材料的储能能力和提高电极材料的充放电效率。SP-3、SP-2、SP-1 的 CV 曲线中，类矩形包裹的面积呈现先增大后又减小的趋势。这是因为当 SiC 纳米颗粒与 Py 的投料质量比较大时，PPy 不能完全包覆 SiC 纳米颗粒；当投料质量比适中时，PPy 均匀包覆在 SiC 纳米颗粒的表面，有利于电化学性能的增强；当投料质量较小时，SiC 纳米颗粒表面的 PPy 层过厚，不利于电化学性能的进一步提升[31]。

图 5(b)为 PPy、SP-3、SP-2、SP-1 在电流密度为 1 $A·g^{-1}$ 时的 GCD 曲线，均为准三角形。SP-2 的充放电时间最长，比电容(216.9 $F·g^{-1}$)最高，这与 CV 曲线呈现的规律一致。如图 5(c)所示，SP-2 在 0.5、1.0、2.0、4.0、5.0、8.0、10.0 $A·g^{-1}$ 电流密度下的 GCD 曲线均呈准三角形的形状，当电流密度为

0.5 A·g^{-1}时，SP-2的充放电时间为1 643.3 s。如图5(d)所示，在相同电流密度下，SP-3、SP-2、SP-1的比电容均大于PPy的比电容，说明SiC纳米颗粒增强了复合材料的储能能力。

通过EIS测试得到了PPy、SP-3、SP-2、SP-1的奈奎斯特图，如图5(e)所示，材料的奈奎斯特图由低频区域的直线和高频区域的半圆组成。SP-2在低频区的斜率比PPy、SP-3、SP-1的斜率大，说明SP-2电极表面的离子扩散速率最大，扩散电阻最小。SP-2在高频区的半圆直径比PPy、SP-3、SP-1的小，表明SP-2的电荷转移电阻最小，电子最容易从电解质转移到SP-2电极表面。对比PPy、SP-3、SP-2、SP-1的阻抗物性可知，SP-2中SiC纳米颗粒和Py的投料质量比最佳。

PPy和SP-2在200 mV·s^{-1}扫描速率下的1 000次CV循环稳定性测试结果如图5(f)所示。PPy的比电容保持率为83.8%，而SP-2的比电容保持率可达95.0%，表明PPy与SiC纳米颗粒的复合有效提升了PPy的循环稳定性。SP-2在前100次循环中，比电容保持率超过100%，这是由循环过程中的电化学氧化过程导致的。

CV、GCD、EIS和电化学循环稳定性测试结果表明，SiC纳米颗粒可以增强复合材料的电化学性能和循环稳定性，适当的投料质量比能更大程度发挥PPy和SiC纳米颗粒之间的协同作用，改善电极材料的电化学行为。

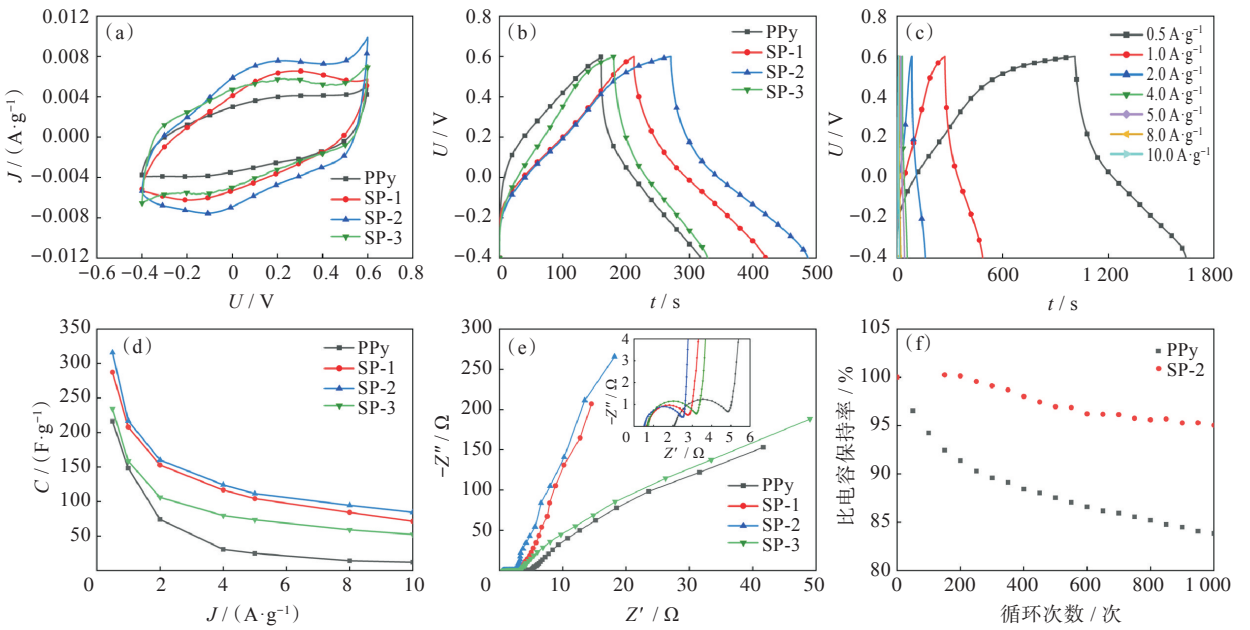

图5 电化学性能：(a)50 mV·s^{-1}扫描速率下的CV曲线，(b)1 A·g^{-1}电流密度下的GCD曲线，(c)SP-2在不同电流密度下的GCD曲线，(d)不同电流密度下的比电容，(e)奈奎斯特图，(f)PPy和SP-2在200 mV·s^{-1}扫描速率下的比电容保持率

Fig. 5 Electrochemical performance: (a) CV curves at a scanning rate of 50 mV·s^{-1}, (b) GCD curves at 1 A·g^{-1} current density, (c) GCD curves of SP-2 at different current densities, (d) specific capacitance at different current densities, (e) Nyquist plot, (f) specific capacitance retention of PPy and SP-2 at a scan rate of 200 mV·s^{-1}

2.5 光热蒸发性能测试

对照组(空白泡沫圆片)、SP-3、SP-2、SP-1在模拟海水中的质量变化如图6(a)所示，所有样品的质量变化与辐照时间均呈线性关系。SP-2被氙灯光源照射60 min后的质量损失为1.98 kg·m^{-2}，是对照组质量损失(0.67 kg·m^{-2})的2.96倍。图6(b)是不同样品在模拟海水中的蒸发界面温度随时间变化的曲线。所有曲线都呈现先快速升温后缓慢升温的趋势，与其他样品相比，SP-2表现出更快的升温速率，其蒸发1 h后的界面温度为52.1 ℃。对照组、SP-3与SP-1蒸发1 h后的界面温度分别为36.3、48.4和47.1 ℃。SiC/PPy复合气凝胶的光热蒸发性能较对照组大幅度提升，是一种颇具应用前景的光热材料。

如图6(c)所示，SP-2在模拟海水中12次光热循环的蒸发速率范围在1.98~2.03 kg·m^{-2}·h^{-1}之间，说明SP-2具有良好的蒸发稳定性，是一种耐用的光热材料。如图6(d)所示，3次加热/冷却循环过程中的蒸发界面最高温度依次为36.5、37.0、36.8 ℃，每次循环结束时的蒸发界面温度依次为22.4、22.6、22.7 ℃，说明3次循环后SP-2的光热性能基本没有差异，表现出良好的蒸发循环稳定性。

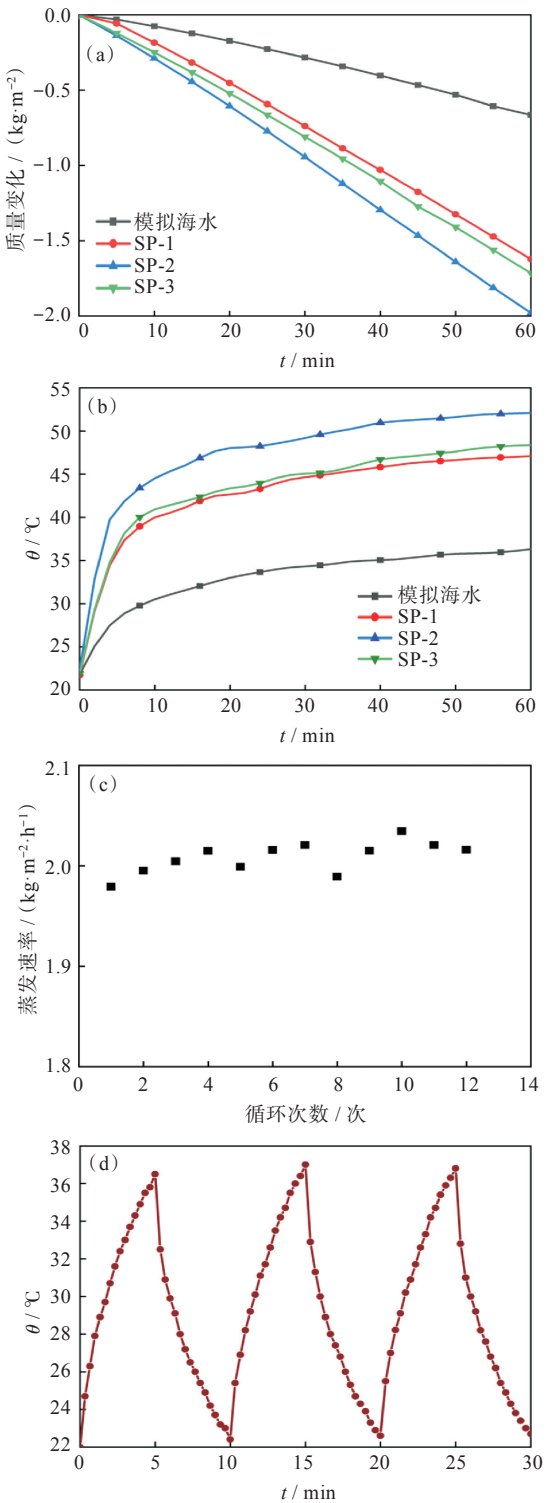

图6　光热蒸发性能：不同样品在模拟海水中质量变化(a)以及蒸发界面温度随时间的变化(b)；SP-2在模拟海水中12次光热循环过程中的蒸发速率(c)以及3次加热/冷却循环过程中蒸发界面温度随时间的变化(d)

Fig. 6　Photothermal evaporation performance of different samples in simulated seawater: mass change (a), and evaporation interface temperature change with time (b); Evaporation rate of SP-2 during 12 photothermal cycles in simulated seawater (c), and its evaporation interface temperature change with time during 3 heating/cooling cycles (d)

3　结　论

本文采用原位氧化聚合法制备出了SiC/PPy复合气凝胶，并通过SEM、XRD和FTIR等表征手段证实了PPy在SiC纳米颗粒表面的有效包覆。电化学测试结果表明，SiC/PPy复合气凝胶具有储能能力强(在1 A·g^{-1}的电流密度下比电容最高可达216.9 F·g^{-1})和循环稳定性出色(SP-2在1 000次CV循环稳定性测试后的比电容保持率为95.0%)等优点。光热蒸发测试结果表明，PPy/SiC复合气凝胶的蒸发速率比对照组高，并且在经历光热循环测试后复合气凝胶的光热性能基本没有变化。该复合气凝胶有望应用于超级电容器和太阳能蒸发器领域。

参考文献

[1] MARADIN D. Advantages and disadvantages of renewable energy sources utilization [J]. International Journal of Energy Economics and Policy, 2021, 11(3): 176-183.

[2] LI C, JIN S, ARCHER L A, et al. Toward practical aqueous zinc-ion batteries for electrochemical energy storage [J]. Joule, 2022, 6(8): 1733-1738.

[3] 陈晓敏，徐丹，魏影，等. 过渡金属纳米异质材料在超级电容器中的应 [J]. 应用技术学报，2024，24(3)：266-275，315.

[4] ZHANG Y, MEI H X, CAO Y, et al. Recent advances and challenges of electrode materials for flexible supercapacitors [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2021, 438: 213910.

[5] ACHARYA J, OJHA G P, PANT B, et al. Construction of self-supported bimetallic MOF-mediated hollow and porous tri-metallic selenide nanosheet arrays as battery-type electrodes for high-performance asymmetric supercapacitors [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(42): 23977-23993.

[6] CUI X M, RUAN Q F, ZHUO X L, et al. Photothermal nanomaterials: a powerful light-to-heat converter [J]. Chemical Reviews, 2023, 123(11): 6891-6952.

[7] CAI Y H, WU J F, SHI S Q, et al. Advances in desalination technology and its environmental and economic assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 397: 136498.

[8] 张鹏，方龙，杜寒威，等. 三聚氰胺海绵基太阳能蒸发器的研究进展 [J]. 武汉工程大学学报，2023，45(6)：599-605.

[9] 周彬，鄢莹，田源灏，等. 多功能聚吡咯/聚酰亚胺电磁屏蔽复合膜的制备与性能研究[J]. 包装工程，2024，

45(9):261-269.

[10] 黄天龙,杜寒威,魏端丽,等.多功能聚吡咯复合水凝胶传感器的制备与性能研究[J].武汉工程大学学报,2022,44(6):629-635.

[11] SONG Y, SHANG M J, LI J G, et al. Continuous and controllable synthesis of MnO_2/PPy composites with core-shell structures for supercapacitors [J]. Chemical Engineering Journal,2021,405:127059.

[12] ZESHAN M, ZEESHAN M, SHERIF E S M,et al. Synergistic enhancement of electromagnetic wave absorbance in spinel ferrite-polypyrrole composites[J]. Applied Nanoscience,2023,13(6):4651-4659.

[13] MENG L S, YANG S, MA Y, et al. Porous polypyrrole nanotube-based organohydrogels: versatile materials for robust electromagnetic interference shielding in harsh environments [J]. Chemical Engineering Journal,2024,479:147643.

[14] WANG Z, YAN Y T, SHEN X P, et al. A wood-polypyrrole composite as a photothermal conversion device for solar evaporation enhancement [J]. Journal of Materials Chemistry A,2019,7(36):20706-20712.

[15] ZHENG Y Y, XU J, YANG X S, et al. Decoration $NiCo_2S_4$ nanoflakes onto PPy nanotubes as core-shell heterostructure material for high-performance asymmetric supercapacitor [J]. Chemical Engineering Journal,2018,333:111-121.

[16] 刘斐,米舒,张金洋,等.CO_2可逆溶剂中原位复合聚吡咯制备纤维素基光热转换气凝胶材料研究[J].化工新型材料,2023,51(11):151-156.

[17] CHOUDHARY R B, ANSARI S, PURTY B. Robust electrochemical performance of polypyrrole (PPy) and polyindole(PIn) based hybrid electrode materials for supercapacitor application: a review [J]. Journal of Energy Storage,2020,29:101302.

[18] EL NADY J, SHOKRY A, KHALIL M, et al. One-step electrodeposition of a polypyrrole/NiO nanocomposite as a supercapacitor electrode [J]. Scientific Reports,2022,12(1):3611.

[19] WU Y Z, SHEN L, ZHANG C X, et al. Polyacid doping-enabled efficient solar evaporation of polypyrrole hydrogel [J]. Desalination, 2021, 505: 114766.

[20] WANG X H, WU Z X, CHEN Z K, et al. Effect of preform structure on mechanical and thermal properties of SiC_f/SiC composites [J]. Journal of Central South University,2024,31(1):101-113.

[21] CHANG H W,TSAI Z Y, YE J J, et al. Synthesis and characterization of Ni—Co—O nanosheets on silicon carbide microspheres/graphite composite for supercapacitor applications [J]. C,2023,9(4):101.

[22] ZHANG Z H,TAN J, CHENG L S, et al. In-situ growth of silicon carbide nanofibers on carbon fabric as robust supercapacitor electrode [J]. Ceramics International,2021,47(17):24652-24662.

[23] TANG Q, CHEN X Y, ZHOU D L,et al. Biomass-derived hierarchical porous carbon/silicon carbide composite for electrochemical supercapacitor [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,2021,620:126567.

[24] NGUYEN T K, ABEROUMAND S, DAO D V. Advances in Si and SiC materials for high-performance supercapacitors toward integrated energy storage systems [J]. Small,2021,17(49):2101775.

[25] OJHA G P, KANG G W, KUK Y S, et al. Silicon carbide nanostructures as potential carbide material for electrochemical supercapacitors: a review [J]. Nanomaterials,2023,13(1):150.

[26] WANG X G, ZHANG C Y,WANG K,et al. Highly efficient photothermal conversion capric acid phase change microcapsule: silicon carbide modified melamine urea formaldehyde [J]. Journal of Colloid and Interface Science,2021,582(Part A):30-40.

[27] LIU Y Y, JIA L N, WANG W B, et al. Effect of Ni content on the wear behavior of Al-Si-Cu-Mg-Ni/SiC particles composites [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(2): 374-383.

[28] YIN X G, LIU X Y, LI H, et al. Photocatalytic degradation of rhodamine B by recyclable AgBr/polypyrrole (PPy) nano-catalysts [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition),2023,38(5):1198-1204.

[29] 邱海鹏,关星宇,徐俊杰,等.基体改性对SiC/SiC复合材料高温抗氧化性能的影响[J].现代技术陶瓷,2023,44(3):183-192.

[30] 温书宝,郭家铭,马小悦,等.聚吡咯涂覆碳纤维的制备及其复合材料的力学性能研究[J].化工新型材料,2023,51(11):123-127,137.

[31] LIU R N, SUN S X, ZHONG R Q, et al. Nitrogen-doped microporous carbon coated on carbon nanotubes for high performance supercapacitors [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2020, 305: 110300.

本文编辑:苗 变