

银白杨树叶基活性炭的制备及其电化学性能研究

芦宇婷*, 潘超#, 高兆辉

大连海洋大学, 海洋科技与环境学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2021年10月9日; 录用日期: 2021年11月2日; 发布日期: 2021年11月9日

摘要

将生物质废弃物合理利用为可再生能源具有重要意义。树叶是一种可再生的生物质, 本文以银白杨 (*Populus alba*) 树叶作为前驱体, 经清洗、炭化、活化过程制备了树叶多孔碳 (PALPC), 并通过改变碳化温度和活化条件, 进一步研究不同方法制备的多孔碳材料电化学性能。结果表明, 碳化温度为 900 °C, 酸煮 (浓硫酸和浓硝酸 3:1 (wt)) 条件下, 得到的 PALPC 电化学性能最优, 在以 6 M KOH 作为电解质的三电极系统中, 0.2 A/g 电流密度下表现出 110.2 F/g 的高比电容和良好的倍率性能; 5 A/g 电流密度下, 经过 5000 次充放电循环后, 电容保持率为 97.8%, 表现出极佳的电化学稳定性。电化学性能表明, 银白杨树叶可以作为一种新型生物质材料用于生产高性能超级电容器和低成本储能装置。

关键词

银白杨树叶, 多孔碳, 超级电容器, 电化学性能

Preparation and Electrochemical Performance of Leaf-Based Activated Carbon of *Populus alba*

Yuting Lu*, Chao Pan#, Zhaohui Gao

College of Ocean Technology and Environment, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

Received: Oct. 9th, 2021; accepted: Nov. 2nd, 2021; published: Nov. 9th, 2021

Abstract

The rational conversion of biomass waste into renewable energy is of great significance. In this

*第一作者。

#通讯作者。

paper, the renewable *Populus alba* leaves were used as the precursor, and the PALPC was successfully prepared by washing, carbonizing, and activating. At the same time, we analyzed the electrochemical performance of the PALPC prepared under different carbonization temperatures and activation methods. Results show that PALPC have the optimal electrochemical performance under the carbonization temperature of 900°C with a H₂SO₄/HNO₃ ratio of 3 boiling. In a three-electrode system with 6 M KOH as the electrolyte, PALPC have a high specific capacitance of 110.2 F/g and good rate performance at a current density of 0.2 A/g. PALPC reveal robust cycling stability with 2.2% capacitance loss during 5000 cycles at a current density of 5 A/g. In summary, *Populus alba* leaves are a new type of biomass material used to produce high-performance supercapacitors and low-cost energy storage devices.

Keywords

Populus Alba Leaf, Porous Carbon, Supercapacitor, Electrochemical Performance

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

超级电容器是一种新式储能装置,因其具有电容量大、能量密度高、充放电效率高、成本低廉、清洁环保、使用期限长等特性,被应用于众多电力系统领域[1] [2] [3]。研究表明,超级电容器性能的优异取决于电极材料的选择,而比表面积大、导电能力强、化学性质稳定的多孔碳材料,是当下最为普遍的电极原材料之一,其中生物质碳材料因其成本低、可循环利用、来源广泛、易制备、分级多孔结构等优势,更是理想电极原材料[4] [5]。

选取生物质碳材料既要满足量大易获取的需求,又要满足具有良好的电化学性能的要求。目前被用于制备碳材料的生物质种类较多,如桔皮[6]表现出 860 m²/g 的高比表面积,材料复合金属氧化物在 1 A/g 的电流密度下比电容可以达到 186 F/g;玉米秸秆[7] [8]经 CaCl₂活化后比表面积可以到达 370.6 m²/g;树皮[9]经 KOH 活化处理在 0.5 A/g 电流密度下比电容可达到 386 F/g;板栗壳[10]经 ZnCl₂活化后比表面积达 813.9 m²/g,在 1 A/g 电流密度下比电容可以达到 506 F/g,1 万次循环后电容保持率高达 91 %;柳絮[11]经 KOH 活化 8 h 时在 1 A/g 电流密度下比电容可以达到 317 F/g,1 万次循环后电容保持率仍为 99.5%;毛竹笋壳[12]经 KOH 活化后,比表面积达 1129.4 m²/g,在 1 A/g 电流密度下比电容可以达到 128.2 F/g;柚子皮[13]经 K₂CO₃活化后,比表面积达 661.7 m²/g,在 1 A/g 电流密度下比电容可以达到 413 F/g,5 千次循环后电容保持率为 96%;香菇[14]经 KOH 活化后,比表面积高达 1594 m²/g,在 0.5A/g 电流密度下比电容可以达到 325 F/g。

银白杨树叶为我国北方地区秋季常见落叶,通常落叶收集后采用田间堆积或焚烧处理,一方面引起环境污染问题,另一方面银白杨树叶作为一种天然木质纤维素未得到有效利用也造成了资源的浪费[15]。因此,本文采集大连地区银白杨落叶作为原材料,探究一种新式“变废为宝”的途径,树叶经前处理、高温碳化、酸化活化处理,制备具有纤维状结构的多孔碳。结合 SEM、XRD、FTIR 等手段表征材料的物化性能,并通过电化学工作站测试其电化学性能,结果表明银白杨树叶基活性碳具有优异的电化学性能。

2. 实验部分

2.1. 实验材料及试剂

银白杨树叶,为秋季成熟落叶(采自大连椒金山山体公园);硫酸、硝酸、盐酸(均购自于天津市科密

欧化学试剂有限公司, 优级纯级别); 聚偏氟乙烯、无水乙醇、氢氧化钾(均购自于国药集团化学试剂有限公司, AR 级别); 泡沫镍(购自于大连爱蓝天高新技术材料有限公司); 乙炔黑(购自于山西卡本贸易有限公司)。

2.2. 实验过程

2.2.1. 树叶基活性炭材料的制备

取一定量收集的银白杨树叶, 利用去离子水多次反复对树叶进行超声清洗, 再将清洗后的树叶泡入无水乙醇中 12 h, 用来除去银白杨树叶表面不易清洗的杂质。最后将浸泡后的材料用去离子水多次反复清洗, 以确保附着在树叶表面的杂质完全被除去。将处理干净的树叶放入真空干燥箱, 在恒定温度 60℃ 的条件下进行干燥过夜。将烘干的树叶磨碎放入坩埚后置于管式炉, 设置程序在氮气氛围保护下以 5℃/min 的速率由室温分别升至 700、800、900℃, 焙烧 2 h 后自然降至室温。焙烧后的产物取出研磨成粉末颗粒, 即树叶生物质碳材料。根据焙烧温度样品分别标记为 PALPC-700、PALPC-800、PALPC-900。

2.2.2. 树叶活性炭的酸化处理

利用浓硫酸和浓硝酸分别配置 1 mol/L 的溶液, 将两种酸性溶液按质量比 3:1 混合后倒入 250 mL 圆底烧瓶中备用(不超过烧瓶体积的 2/3)。称取一定量 PALPC-900 碳材料, 将材料倒入混合酸性溶液中, 加热煮沸后继续煮 30 min, 静置冷却至室温。将生物质碳材料抽滤分离清洗干净, 洗净的材料在 60℃ 下干燥, 得到酸煮生物质碳材料, 标记为 PALPC-SANA-900。

作为对比, 配置 1 mol/L 稀盐酸溶液适量, 称取一定量 PALPC-900 碳材料放入 1 mol/L 稀盐酸中, 室温下磁力搅拌 6 h, 将搅拌后的混合物清洗抽滤。洗净的材料在 60℃ 下干燥, 得到酸洗生物质碳材料, 标记为 PALPC-HA-900。

图 1 为银白杨树叶生物质炭的制备工艺流程图。其中图 1(a)为银白杨树叶, 图 1(b)为银白杨树叶经过炭化得到的多孔碳材料。

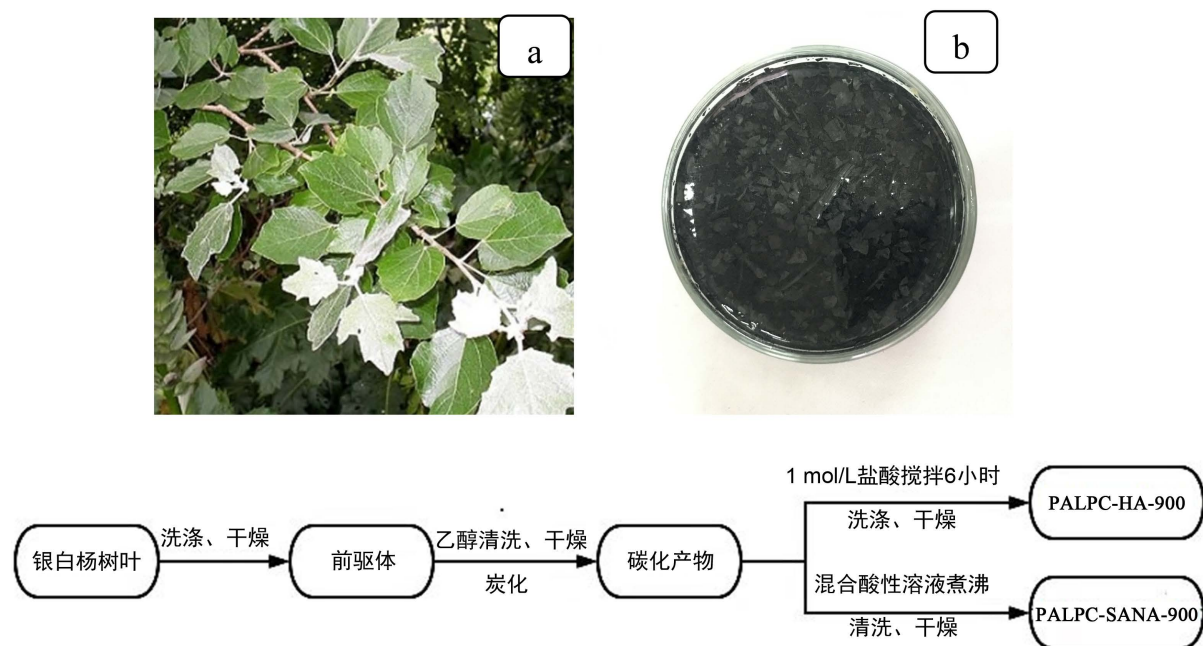


Figure 1. Preparation process of leaf biochar
图 1. 银白杨树叶生物质炭的制备工艺流程

2.3. 电化学性能测试

将碳材料、乙炔黑(导电剂)和PVDF(粘结剂)按照8:1:1的质量比混合磨碎,然后将混合物均匀的涂在泡沫镍上,60℃恒温干燥4h。使用压片机将涂有材料的泡沫镍和未涂片的泡沫镍加压至10MPa,压成工作电极,以6mol/L的KOH为工作电解液,铂片电极为对电极,Ag/AgO电极为参比电极。测试生物质碳材料的循环伏安曲线(CV)、恒电流充放电曲线(GCD)以及电化学阻抗曲线(EIS),其中电压窗口设置为-1.0~0V。

电极材料的比电容计算公式为[16]:

$$C = \frac{I \times \Delta t}{m \times \Delta V} \quad (1)$$

式中: I 为充放电电流, Δt 为放电时间, m 为电极材料的质量, ΔV 为电压窗口。

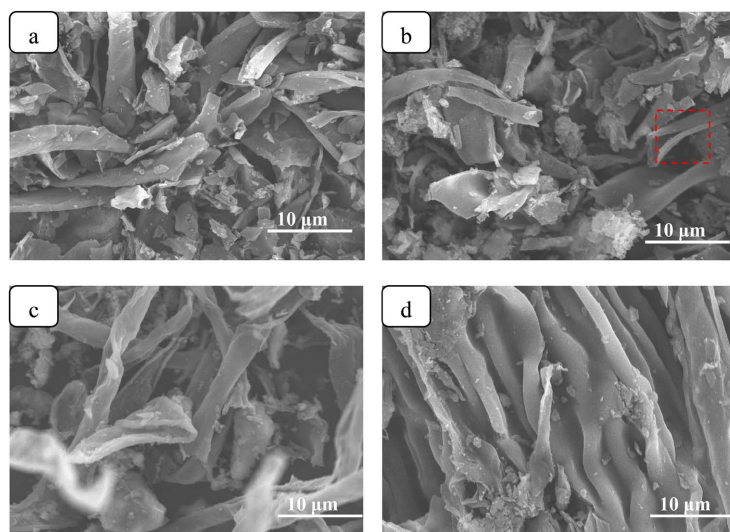
2.4. 材料的测试与表征

使用同步式热重分析仪(STA 449C)分析氮气氛围下树叶的失重过程,利用X射线衍射仪(布鲁克 D8 advance)和红外光谱仪(美国 Nicolet 460)分析该材料的组成,采用扫描电子显微镜(JSM-7800F 型)对碳材料的形貌特征进行表征。

3. 结果与分析

3.1. 微观形貌表征

树叶经700℃(PALPC-700)、800℃(PALPC-800)、900℃(PALPC-900)碳化后的微观形貌分别如图2(a)、图2(b)、图2(c)所示。从图中可以看出,经过高温焙烧后,碳材料呈现出纤维与颗粒的复合结构,颗粒为不规则形状,纤维呈现扁平形状,且图2(b)中的红色线框标识的纤维显示出中空结构;对比三种温度下焙烧得到的碳材料,可以发现随着温度的增加,碳材料中的颗粒的数量和尺寸均有所减少,900℃时几乎看不到大块的颗粒,这说明高温下有利于碳纤维的形成。图2(d)是PALPC-900经过酸煮处理后(PALPC-SANA-900)的SEM微观结构图。从图中可以看出,经过酸煮处理后纤维表面更加光滑,且纤维的有序性得到提升,这说明经过酸处理后,树叶碳中含有的无机离子被溶解掉,从而提高了碳的纯净度。



(a) PALPC-700; (b) PALPC-800; (c) PALPC-900; (d) PALPC-SANA-900

Figure 2. SEM images of leaf biomass carbon materials at different treatment conditions
图 2. 不同处理条件树叶生物质碳材料的 SEM 图

3.2. 热重分析

图3为银白杨树叶的热重分析图,通过图中曲线可知银白杨树叶材料在氮气条件下由于高温环境造成失重。该过程主要分为三部分。第一部分在100℃~200℃,质量减小的比较缓慢,这是由于温度增加使得树叶表面水分会受热蒸发,且在较低温度下还有部分易挥发的油类物质析出。第二部分是200℃~600℃,失重速度先快后慢,这是因为树叶中含有的很多物质如脂肪、蛋白质等在高温下发生热解,造成部分化学键断裂。第三部分是600℃~1000℃,质量减小趋势平缓,此时树叶中的有机物在高温作用下逐渐分解完全,得到的碳化产物从内部结构到成分都逐渐趋于稳定。因此,树叶的焙烧温度设置为700℃,800℃和900℃。

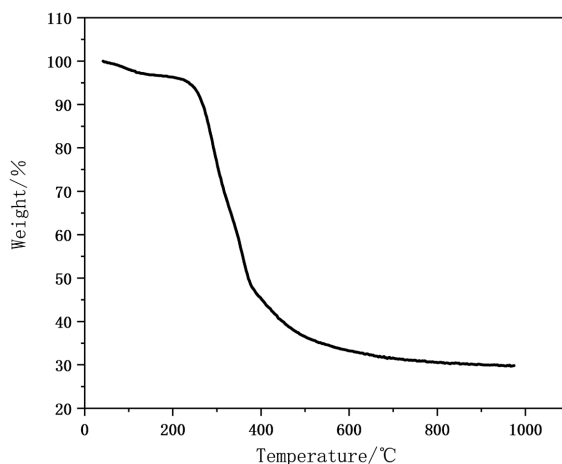


Figure 3. Thermogravimetric chart of leaf

图3. 银白杨树叶的热重分析图

3.4. XRD 分析

图4为树叶及PALPC-SANA-900的XRD图谱。PALPC-SANA-900在 $2\theta = 22^\circ$ 存在一个明显的衍射峰,在 $2\theta = 43^\circ$ 左右出现另一个相对平缓的峰,这两个峰分别是活性炭的类石墨结构中微晶(002)晶面和(100)晶面,与石墨的PDF标准谱中的衍射数据相对应,观察衍射峰发现, $2\theta = 20^\circ \sim 24^\circ$ 和 $2\theta = 43^\circ$ 的衍射角峰宽变窄,说明酸活化后的碳材料的石墨乱层化程度增加,形成丰富的纤维状多孔碳结构。而树叶谱图中在 $2\theta = 21^\circ$ 的位置出现了纤维素结晶化的特征峰。

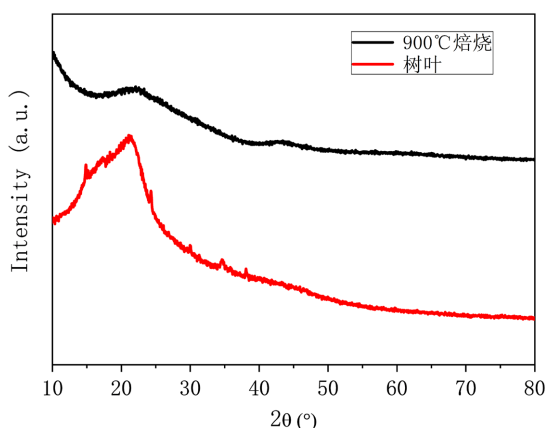


Figure 4. XRD spectrum of leaf and PALPC-SANA-900

图4. 树叶和PALPC-SANA-900的XRD谱图

3.4. 红外光谱分析

图 5 为 PALPC-SANA-900 的红外光谱。从图中可以看出, 3406 cm^{-1} 出现-OH 的特征吸收峰, 为 O-H 的伸缩振动; 1624 cm^{-1} 的吸收峰, 为 C=C 键伸缩振动引起的; 在 1382 cm^{-1} 出现的峰, 为 C-H 键和 N-O 键拉伸振动; 1126 cm^{-1} 出现的峰, 为 C-O-C 醚基和 S=O 键的伸缩振动, 这说明 PALPC-900 在经过酸煮处理后表面含有羟基等酸性含氧官能团, 这些官能团能够使材料表面的亲水性提高, 从而对材料的比电容产生一定影响。

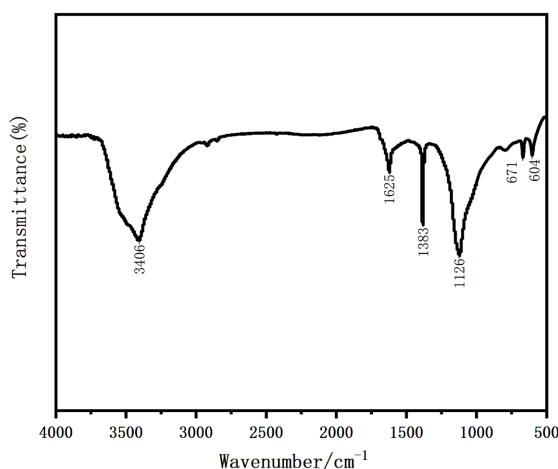


Figure 5. FTIR spectra of PALPC-SANA-900

图 5. PALPC-SANA-900 的 FTIR 图

3.5. 树叶基碳材料的电化学性能

3.5.1. 焙烧温度对电化学性能影响

为研究焙烧温度对银白杨树叶碳材料的电化学性能的影响, 分别考察了 700°C 、 800°C 和 900°C 焙烧温度下电极的循环伏安、恒流充放电和交流阻抗性能。

图 6(a) 是相同扫描速率 0.01 v/s 时, 不同焙烧温度下碳材料的循环伏安曲线图。从图中分析可知, 不

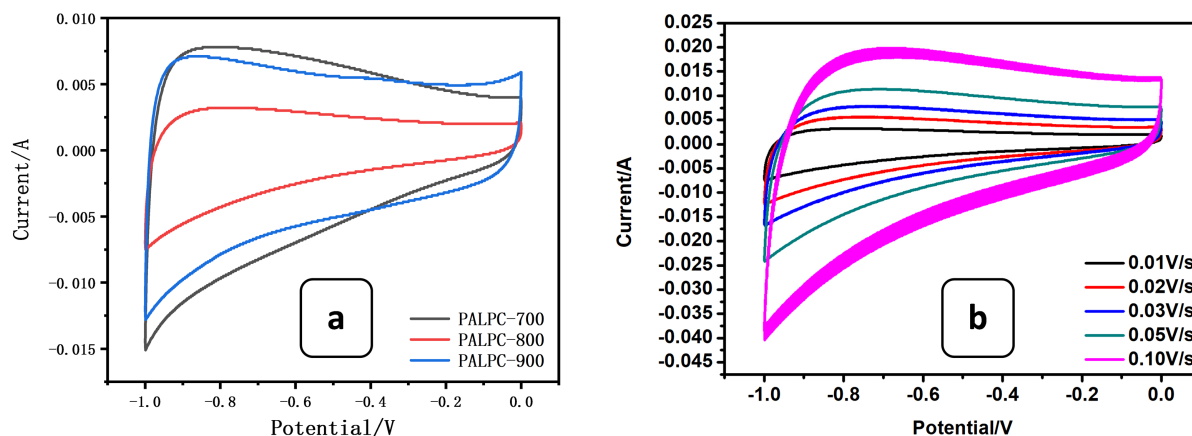


Figure 6. (a) CV curves of PALPC-700, PALPC-800 and PALPC-900 at scan rate of 0.01 V/s ; (b) CV curves of PALPC-900 at scan rate of $0.01, 0.02, 0.03, 0.05$ and 0.1 V/s

图 6. (a) PALPC-700、PALPC-800、PALPC-900 在 0.01 V/s 下的 CV 曲线图; (b) PALPC-900 在 $0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1\text{ V/s}$ 扫速下的 CV 曲线图

同焙烧温度所得碳材料均呈现出类矩形的特征,这说明碳电极以双电层电容为主,其中 PALPC-900 的 CV 曲线所围成的类矩形面积最大,表现出较好的电化学性能。图 6(b)进一步考察扫描速率对 PALPC-900 材料的 CV 性能的影响。从低速率的 0.01 V/s 增加到高速率的 0.1 V/s,曲线形状没有明显变化,仍呈现类矩形特征,说明 PALPC-900 在高速扫描下仍保持较好的电化学稳定性。

图 7(a)是相同电流密度 0.2 A/g 时,不同焙烧温度下碳材料的充放电性能图,从图中可以观察到 3 种材料的恒流充放电曲线表现为近似等腰三角形,同时充电电压和放电电压与时间成近似线性关系,这说明材料的充放电可逆性并不好。图 7(b)为不同电流密度下的恒流充放电曲线,可以看出随着电流密度的增加,曲线形状没有发生明显变化。从图 7(c)中可以看出,相同电流密度下, PALPC-900 电极的比电容值最高,但增大电流密度后,比电容都有相当程度的衰减。

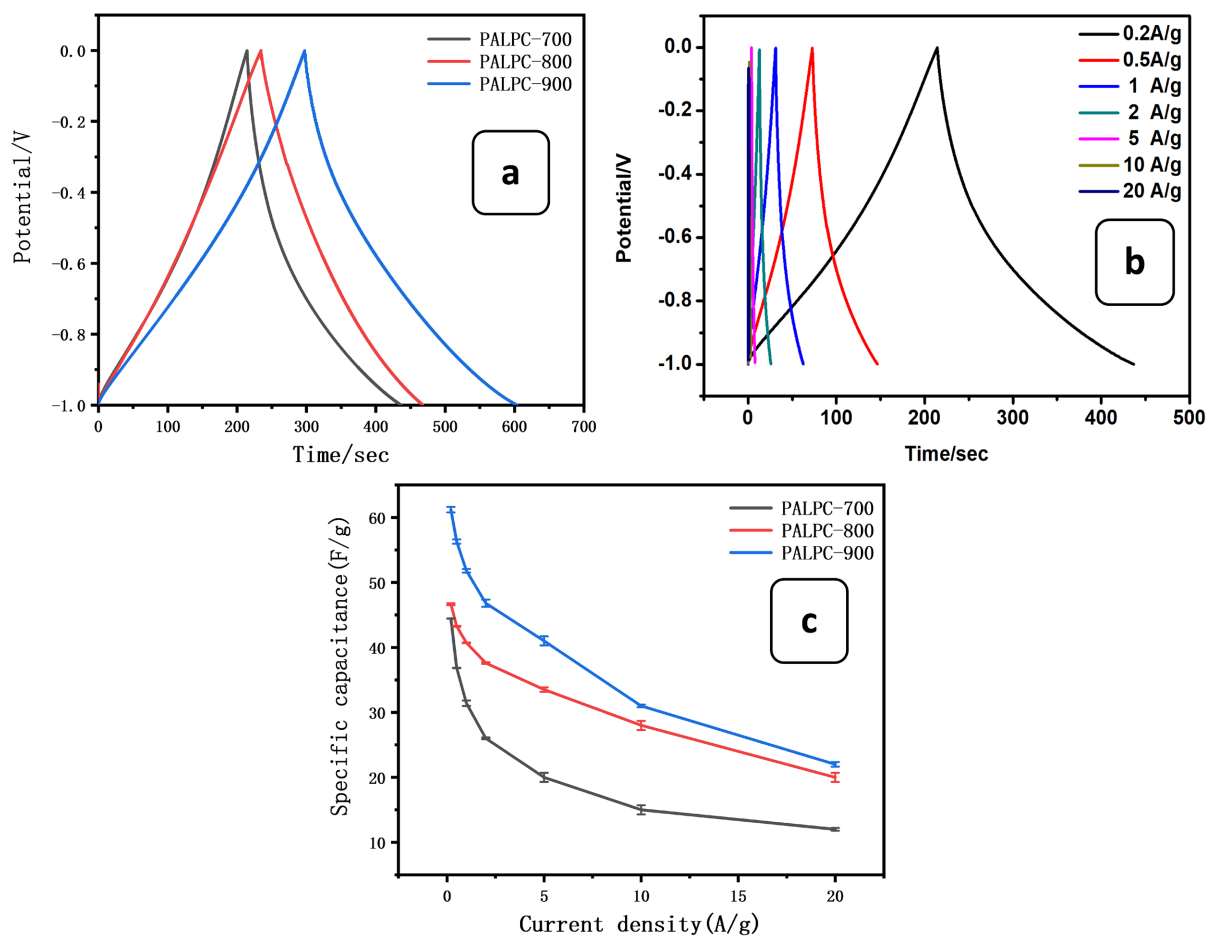


Figure 7. (a) GCD curves of PALPC-700, PALPC-800 and PALPC-900 at 0.2 A/g current density; (b) GCD curves of PALPC-900 at different current density; (c) Specific capacitance curves of PALPC-700, PALPC-800 and PALPC-900 at different current densities

图 7. (a) PALPC-700、PALPC-800、PALPC-900 在电流密度为 0.2 A/g 下的充放电曲线; (b) PALPC-900 在不同电流密度下的充放电曲线; (c) PALPC-700、PALPC-800、PALPC-900 在不同电流密度下的比电容曲线

图 8 为交流阻抗谱图,交流阻抗谱主要由高频区的半圆弧、中频区的 45°斜线和低频区近似垂直于实轴的直线组成。高频区是由电极材料的内阻、电解液的电阻、工作电极与泡沫镍之间的接触电阻的总和组成的,通过对比高频区阻抗曲线与实轴的交点发现,相比于焙烧温度 700°C 和 800°C,900°C 的电极内阻最低,内阻分别为 0.54 Ω、0.44 Ω、0.42 Ω 而且 PALPC-900 半圆弧直径最小,由此可以看出 PALPC-900

最有利于电解液离子的传输。在低频区通过与类垂直直线的斜率对比发现, PALPC-900 的曲线斜率最高, 从而说明 PALPC-900 的扩散电阻最小, 电化学性能最佳。

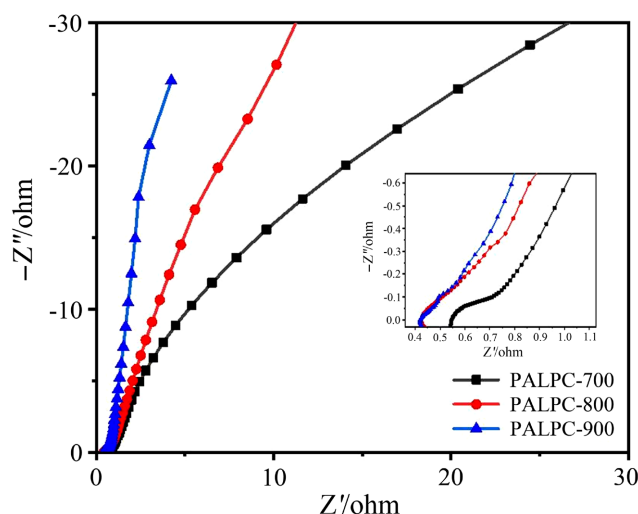


Figure 8. EIS of PALPC-700, PALPC-800 and PALPC-900
图 8. PALPC-700、PALPC-800、PALPC-900 的交流阻抗谱图

3.5.2. 酸化活化处理对电化学性能影响

进一步考察了酸化处理条件对树叶生物质碳材料电化学性能的影响。图 9(a) 是相同扫描速率 0.01 v/s 时, 不同活化条件处理的碳材料的循环伏安曲线图。与 PALPC-900 相比, 两种酸处理活化后的材料 CV 曲线呈现出类矩形形状且无明显的氧化还原峰, 图形所围成的面积也有明显变大, 其中 PALPC-SANA-900 所围成的类矩形面积最大, 表明这一条件下材料的电化学性能最好。图 9(b) 表示不同扫描速率对 PALPC-SANA-900 的 CV 性能的影响。随着扫描速率增加, 曲线形状仍表现为类矩形, 说明该材料在高速扫描下电化学稳定性较好。

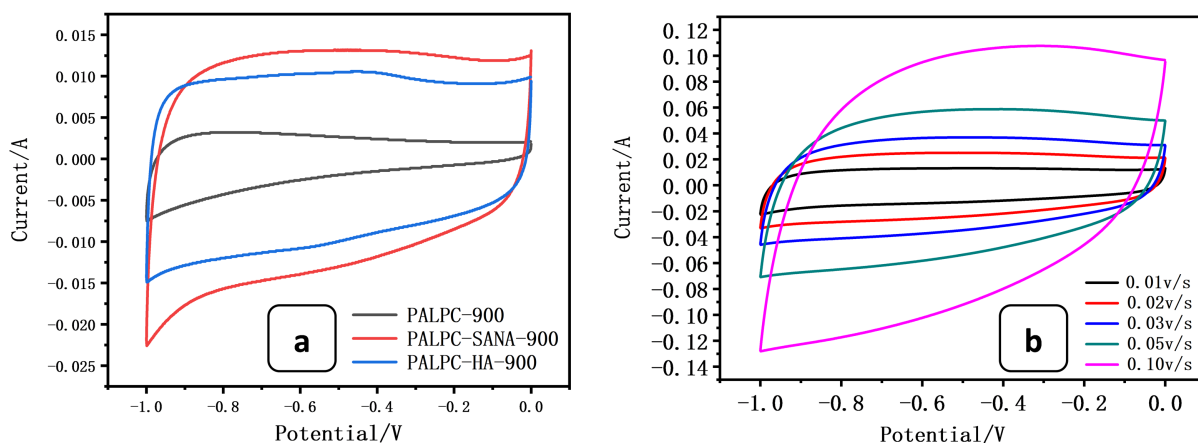


Figure 9. (a) CV curves of PALPC-900, PALPC-HA-900 and PALPC-SANA-900 at scan rate of 0.01 V/s; (b) CV curves of PALPC-SANA-900 at scan rate of 0.01, 0.02, 0.03, 0.05 and 0.1 V/s

图 9. (a) PALPC-900、PALPC-HA-900、PALPC-SANA-900 在 0.01 V/s 下的 CV 曲线图; (b) PALPC-SANA-900 在 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.1 V/s 扫描下的 CV 曲线图

图 10(a) 为不同活化条件处理的碳材料的充放电性能图, 可以看出酸化处理后的充放电曲线相比较未处

理的, 其等腰三角形特征和充、放电与时间关系线性特征更加明显, 说明酸化处理后的材料电化学可逆性更好。进而观察不同电流密度下 PALPC-SANA-900 的恒流充放电曲线如图 10(b)所示, 电流密度从 0.2 A/g 增加到 20 A/g 曲线仍呈现类似等腰三角形形状, 图像具有对称性说明该材料可逆性良好。从图 10(c)中可以看出, 三种材料的比电容均随着电流密度增大而减小。同时, 在相同电流密度 0.2 A/g 下, PALPC-900 的比电容为 61.2 F/g, PALPC-HA-900 的比电容为 80.8 F/g, PALPC-SANA-900 的比电容可以达到 110.2 F/g。这说明, PALPC-SANA-900 比 PALPC-900、PALPC-HA-900 的电化学性能好。PALPC-SANA-900 电极的循环稳定性测试(图 10(d))可以看出, 电流密度为 5 A/g 时, 充放电循环 5000 次后, 电容保持率为 97.8%, 说明该电极稳定性较好。

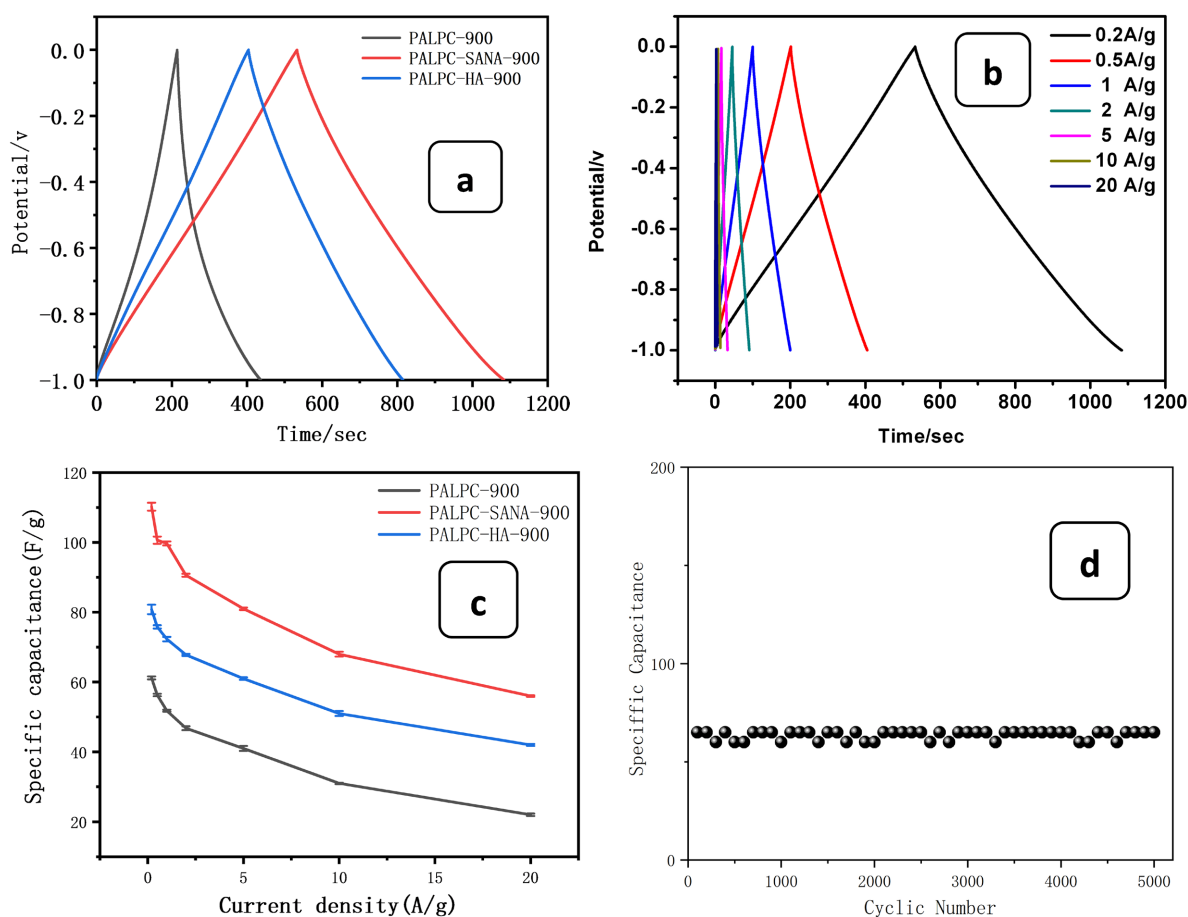


Figure 10. (a) GCD curves of PALPC-900, PALPC-HA-900 and PALPC-SANA-900 at 0.2 A/g current density; (b) GCD curves of PALPC-SANA-900 at different current density; (c) Specific capacitance curves of PALPC-900, PALPC-HA-900 and PALPC-SANA-900 at different current densities; (d) Cycle performance of PALPC-SANA-900 at a current density of 5 A/g

图 10. (a) PALPC-900、PALPC-HA-900、PALPC-SANA-900 在电流密度为 0.2 A/g 下的充放电曲线; (b) PALPC-SANA-900 在不同电流密度下的充放电曲线; (c) PALPC-900、PALPC-HA-900、PALPC-SANA-900 在不同电流密度下的比电容曲线; (d) PALPC-SANA-900 在 5.0 A/g 电流密度下的循环性能

图 11 是交流阻抗频谱曲线, 相比于 PALPC-900, PALPC-HA-900 和 PALPC-SANA-900 在低频区的斜线近乎垂直上升, 这说明电解液离子在生物质碳内部孔隙内扩散阻力较低, 更有利于电子的收集和传输。从图中可以观察到 PALPC-SANA-900 的内阻比 PALPC-900 减小约两倍, 说明 PALPC-SANA-900 的导电性更好。

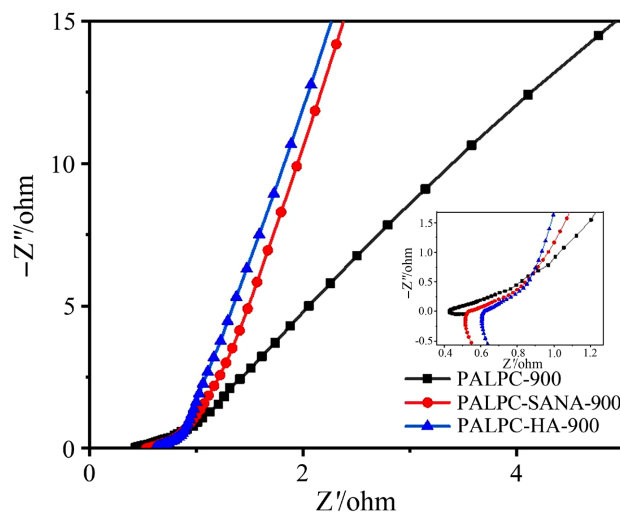


Figure 11. EIS of PALPC-900, PALPC-HA-900 and PALPC-SANA-900

图 11. PALPC-900、PALPC-HA-900、PALPC-SANA-900 的交流阻抗谱图

4. 结论

本文以银白杨树叶作为前驱体, 经过简单的高温碳化和酸化活化的方法制备了多孔活性炭材料。研究了焙烧温度、活化条件对材料微观结构和电化学性能的影响。结果表明 900℃焙烧条件下得到的活性炭材料的电化学性能好于 700℃和 800℃。两种酸化处理方式的活性炭电化学性能均好于未处理的活性炭, 且经过浓硫酸和浓硝酸混酸煮的 PALPC-SANA-900 表现出更优异的性能。在 6M KOH 电解液中, 电流密度为 0.2 A/g 时, PALPC-SANA-900 的比电容可以达到 110.2 F/g, 且在 5 A/g 电流密度下测试循环稳定性, 充放电循环 5000 次后比电容值几乎无衰减。这说明以银白杨树叶为原料的多孔活性炭有望为开发超级电容器新型碳电极提供参考。

致 谢

感谢辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0734)、辽宁省教育厅基金(LJKZ0709)、大连海洋大学“湛蓝学者”基金对本论文的资助。

参考文献

- [1] 陈英放, 李媛媛, 邓梅根. 超级电容器的原理及应用[J]. 电子元件与材料, 2008, 27(4): 6-9.
- [2] 胡毅, 陈轩恕, 杜砚, 尹婷. 超级电容器的应用与发展[J]. 电力设备, 2008, 9(1): 19-22.
- [3] Wang, S.H. (2021) Research on Marine Photovoltaic Grid-Connected System Based on Super Capacitor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **680**, Article ID: 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/680/1/012016>
- [4] Serrano-Ruiz, J.C. (2020) Biomass: A Renewable Source of Fuels, Chemicals and Carbon Materials. *Molecules (Basel, Switzerland)*, **25**, 5217. <https://doi.org/10.3390/molecules25215217>
- [5] Adekunle, M.A. and Ani, F.N. (2015) Recent Development in the Production of Activated Carbon Electrodes from Agricultural Waste Biomass for Supercapacitors: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **52**, 1282-1293. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.129>
- [6] Wang, C., Xiong, Y., Wang, H.W. and Sun, Q.F. (2018) All-Round Utilization of Biomass Derived All-Solid-State Asymmetric Carbon-Based Supercapacitor. *Journal of Colloid and Interface Science*, **528**, 349-359.
- [7] 罗运虎, 李德民, 孙艺涵. 玉米秸秆多孔生物质碳的制备及其应用[J]. 黑龙江科学, 2021, 12(8): 44-45.
- [8] 邓筠飞, 杜卫民, 王梦瑶, 等. 基于玉米秸秆合成的多孔生物质炭材料及其电化学储能[J]. 应用化学, 2019,

- 36(11): 1323-1332.
- [9] 孙中新. 基于杉树皮的多级孔碳材料的制备及其在超级电容器中的应用[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- [10] 王芳平, 马婧, 李小亚, 乔艳, 周凯玲. 板栗壳生物炭高性能对称性超级电容器电极材料的制备及性能[J]. 化工进展, 2021, 40(8): 4381-4387.
- [11] 林焯, 姚路, 吴登鹏, 张亚非. 基于柳絮的生物质活性炭制备及电容性能的研究[J]. 电子元件与材料, 2018, 37(10): 13-21.
- [12] 杨文耀, 黄昊, 朱欣月, 李杰, 向静. 基于毛竹笋壳生物质碳材料的制备及其超级电容器性能[J]. 电子元件与材料, 2020, 39(7): 66-71.
- [13] 王芳平, 周凯玲, 马婧, 李小亚. 葡萄柚皮多孔碳高性能对称性超级电容器电极材料的制备及性能[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(3): 495-502.
- [14] 胡青桃, 张文达, 李涛, 晏晓东, 顾志国. 香菇生物质基氮掺杂微孔碳材料的制备及其在超级电容器中的应用[J]. 无机化学学报, 2020, 36(8): 1573-1581.
- [15] 沈金龙, 毛爱军, 王远亮, 江宁, 董志扬. 纤维素酶在木质纤维素生物质转化中的应用研究[J]. 微生物学报, 2004(4): 507-510.
- [16] Lu, A.H. and Zheng, J.T. (2001) Study of Microstructure of High-Surface-Area Polyacrylonitrile Activated Carbon Fibers. *Journal of Colloid and Interface Science*, **236**, 369-374. <https://doi.org/10.1006/jcis.2000.7425>