第 49 卷第 3 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 3
2021 年 3 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　March，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200489

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

王芳平，周凯玲，马　婧，李小亚

(甘肃省生物电化学与环境分析重点实验室，省部共建生态环境相关高分子材料教育部重点实验室，
西北师范大学化学化工学院，兰州 730070)

摘　要：以柚子皮为碳源(GC)，高温氧化碳化(GCO)处理后采用 K_2CO_3 活化制得 GCO600，最佳优化产物 GCO600-14 具有丰富的网状孔隙，其比表面积达 661.7 m^2/g。三电极体系中，在 1 A/g 时，GCO600-14 的比电容为 413 F/g，电流密度扩大 30 倍后仍可达到 2 896 F/g，为原先的 70%；循环 5 000 圈后比电容仍未原来值的 96%。构建的对称性电容器 GCO600-14//GCO600-14 能量密度为 26、20.2 (W·h)/kg 时，相应的功率密度分别为 720、20 800 W/kg。说明 GCO600-14 作为新型的、环境友好的储能材料具有潜在的应用前景。

关键词：超级电容器；多孔碳；柚子皮；生物质
中图分类号：　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)03–0495–08
网络出版时间：2021–01–21



Preparation and Properties of Porous Carbon Electrode Material of Grapefruit Peel for High Performance Symmetrical Supercapacitor

WANG Fangping, *ZHOU Kailing*, *MA Jing*, *LI Xiaoya*
(Key Laboratory of Eco-Environment-Related Polymer Materials, Ministry of Education of China, Key Laboratory of Bioelectrochemistry & Environmental Analysis of Gansu, College of Chemistry and Chemical Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A series of porous carbon based supercapacitor electrode materials (GCO600) were synthesized *via* simple oxidative carbonization (GCO) with K_2CO_3 activation using grapefruit peel as a resource. The optimized product GCO600-14 has massive network pores and a specific surface area of 661.7 m^2/g. In the three-electrode system, the specific capacitance of GCO600-14 is 413 F/g at 1 A/g, and the specific capacitance can still reach 289 F/g when the current density increases to 30 times, which is 70% of the initial value. The cycling stability has a capacitance retention of 96% after 5 000 cycles. For GCO600-14//GCO600-14 symmetric supercapacitor, the energy density is 26 (W·h)/kg at a power density of 720 W/kg and 20.2 (W·h)/kg at a power density of 20 800 W/kg, respectively. It is indicated that GCO600-14 could have potential application prospects in environmentally friendly energy storage materials.

Keywords: supercapacitor; porous carbon; shaddock peel; biomass

超级电容器具有功率密度高、循环寿命长、成本低以及环境友好等优势[1]。电极材料是决定超级电容器性能的关键因素[2]，为了制备性能优异的电极材料，科学家们把目光投向了具有高稳定性和高能量密度的碳基材料[3]。碳材料可以通过缩短离子的扩散长度(大孔)、促进离子传输(中孔)、增加电荷容纳量(微孔)来增强超电容性能。常用的碳基材料有石墨烯[4]、碳纳米管和模板碳等[5–6]，由于合成工艺复杂和经济效益不高等原因，这些碳材料的批量生产和实际应用往往受到影响[7]。因此，用生物质废品衍生的碳材料来制备高含碳量、低成本的碳基电极材料是较优异的选择[8–9]。生物质碳源包括樱桃核，竹子，玉米芯，花生壳，核桃壳，黄瓜皮，橙子皮，松针，棕榈，椰子壳，高粱，咖啡豆壳，橡

收稿日期：2020–07–02。　修订日期：2020–07–23。
基金项目：国家自然科学基金 (21065010)资助。
第一作者：王芳平(1973—)，女，副教授。

Received date: 2020–07–02.　**Revised date:** 2020–07–23.
First author: WANG Fangping (1973–), male, female, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: wangfp@nwnu.edu.cn

胶木屑，板栗壳，果核，棉花，鸡毛，稻壳等。

生物质活性炭的制备过程通常包含碳化和活化 2 步，这 2 个关键步骤一般需要在超高温度下进行，且整个过程需要氮气保护，这些苛刻的条件不仅阻碍了碳材料的生产和应用，同时，制备过程消耗大量的能源造成环境污染、安全隐患等[10–11]。为了解决这些问题，科学家们一直在寻找更温和、便捷、安全且有效的制备方式，如水热碳化、掺入杂原子[12]、氧化等等。

本工作提出了一种有效制备活性碳材料前驱体的空气气氛氧化方法，比常用的碳化方法更温，需要的温度更低，且不需要惰性气体保护，但在氧化过程中可引入更多含氧官能团，增加材料的亲水性从而使得材料在水性电解液中与电解液接触更充分[13]。将清洗干净的柚子皮置于空气氛围中，200 ℃氧化 12 h 制备前驱体 GCO，将氧化后的产物与 K_2CO_3 混合后置于管式炉中，升温至 600 ℃并用 N_2 保护。最佳优化产品 GCO600-14 具有 3D 多孔交联结构，比表面积高达 661.7 m^2/g。在 1 A/g 时的 GCO600-14 电极比电容可达到 413 F/g，循环 5 000 圈次后电容保持率为 96%。组装的对称电容器也具有较高的能量密度和功率密度。

1 实验

1.1 试剂

碳酸钾纯度为 99% (质量分数)，盐酸纯度为 95%~98%，乙炔黑纯度为 99%。

1.2 GCO600-14 电极材料的制备

葡萄柚取出果肉后用去离子水清洗柚皮，将干净柚皮放在 60 ℃烘箱中烘干后研成粉末(GC)，置于 200 ℃的空气氛围烘箱中保温 12 h，制成前驱体(GCO)。称取质量比为 1:4 的 GCO 和 K_2CO_3，混合研磨均匀后放入管式炉中，在氮气保护下，以 5 ℃/min 的升温速度分别升温到 500、600、700 ℃，恒温 2 h 后取出自然冷却至室温，样品用 2 mol/L 盐酸和去离子水反复交替洗涤，再置于烘箱中烘干，命名为 GCO500-14 (500 为温度，14 为 GCO 与 K_2CO_3 的质量比 1:4)，GCO600-14、GCO700-14。为了探究 K_2CO_3 的含量对材料性能的影响，又制备了 GCO600-12、GCO600-16。合成示意图如图 1 所示。



图 1 生物碳材料制备流程图

Fig. 1 Preparation flow chart

1.3 电极制备

将质量比为 80:14 的 GCO600-14 和乙炔黑混合后加入 0.25% Nafion 溶液，超声分散均匀，滴涂在的玻碳电极上作为工作电极，饱和甘汞电极作为参比电极，铂片用作对电极。在 CHI660E 电化学工作站上进行循环伏安法(CV)，恒流充放电(GCD)和电化学阻抗(EIS)测试。在蓝电电池测试仪(CT2001A)上进行循环稳定性测试。

1.4 计算公式

在电化学测试过程中，通过式(1)计算电极材料比电容：

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

式中：I 为充放电电流；Δt 为放电时间；ΔV 为最大电压与最小电压之差；m 为活性物质的质量。

根据式(2)、式(3)计算能量密度 E(W·h/kg)和功率密度 P(W/kg)。

$$E=\frac{C_{\mathrm{m}}\times\Delta V^2}{2}a \tag{2}$$

$$P=\frac{E}{\Delta t} \tag{3}$$

式中：ΔV 为电压差；Δt 为放电时间；C_{m} 为二电极下测试的比电容。

1.5 样品表征

用 JSM–6701F 型描扫电子显微镜和 JEM–2010 型透射电子显微镜分析产物的形貌特征。用 D/Max-2400X 射线粉末衍射仪分析产物物相组成，测试条件：Cu 靶，管电压 40 kV，管电流 60 mA。用 ASAP–2020 型氮气吸附仪测试分析比表面积和孔径，通过 inVia 型 Raman 光谱仪进行测试产物的石墨化缺陷程度。

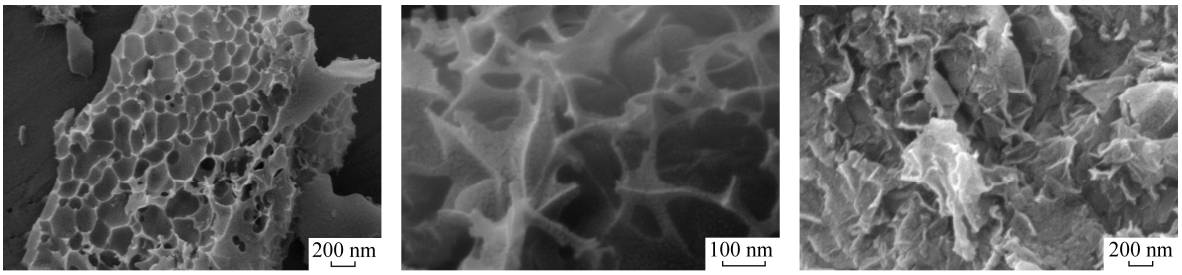
2　结果与讨论

2.1　SEM 分析

图 2a~图 2c 为不同活化温度下制备材料的 SEM 照片。由图 2a~图 2c 可知，在低温时，K_2CO_3 仅在碳片表面刻蚀出一些坑洞；温度升高到 600 ℃时碳材料呈现出相互交错的网络结构，这种结构有助于电子的高效穿梭，同时扩大了材料的比表面积，这一结构可能是由 K_2CO_3 分解释放出的 CO_2 所致[14]。温度升高至 700 ℃时，材料出现了团聚、结块的现象。K_2CO_3 含量对材料微观结构的影响如图 2d 和图 2e，GCO 与 K_2CO_3 质量比为 1:2 时，材料结成大块，表面呈现少量规律的孔结构；当质量比增大到 1:6 时，材料出现了碎片化，可以清晰看到过高的温度导致碳材料孔结构关闭，这可能是由于网状结构在高温、高浓度活化剂下发生塌陷、网结构断裂造成的[15]；活化温度为 600 ℃、GCO 与 K_2CO_3 质量比为 1:4 时，电子传输通多最丰富、材料比表面积最大。

2.2　XRD 和 Raman 分析

图 3 为不同样品的 XRD 谱和 GCO600-14 的 Ranman 光谱。由图 3a 可见，所有 GCO 材料在 2θ=14°~20°处出现宽而弱的衍射峰，可归属于涡轮

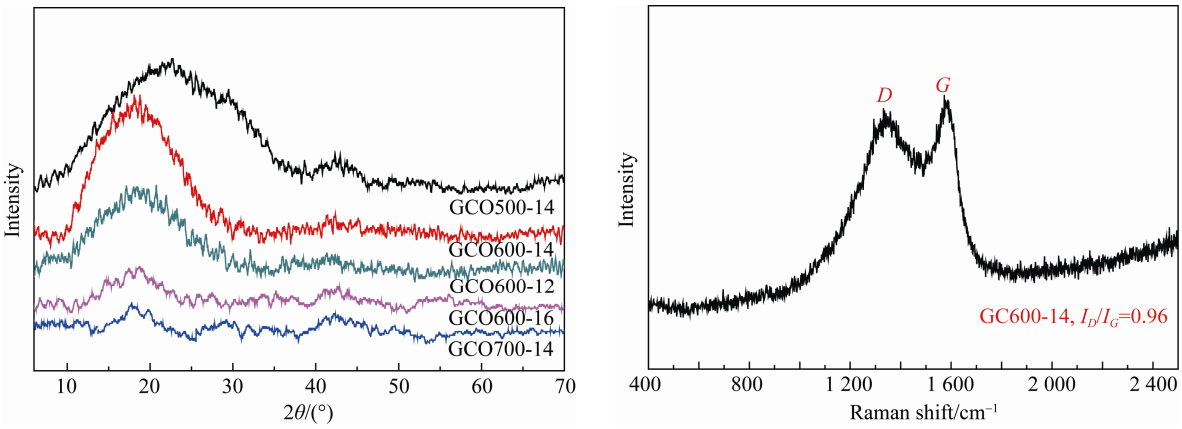


(a) GCO500-14　(b) GCO600-14　(c) GCO700-14

(d) GCO600-12　(e) GCO600-16

图 2　不同样品的 SEM 照片

Fig. 2　SEM images of different samples



(a) XRD patterns　(b) Raman spectrum

图 3　不同样品的 XRD 谱和 GCO600-14 的 Ranman 光谱

Fig. 3　XRD patterns of different samples and Raman spectrum of GCO600-14

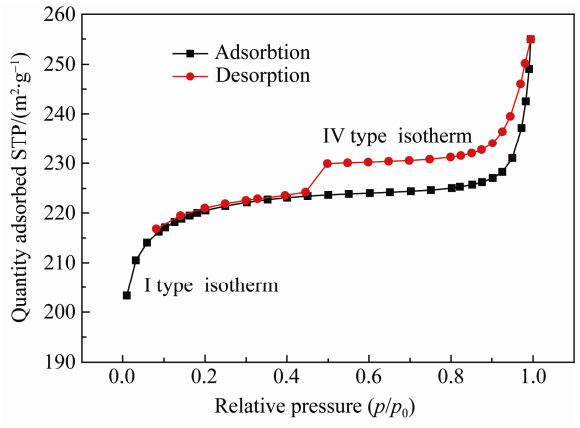
层碳的(002)晶面[16]，说明材料结晶度低。(002)晶面在一定程度上可说明材料的石墨化程度，GCO600-14 的(002)面强度远强于 GCO500-14 和 GCO700-14，前者还具有峰展宽的特点，表明温度过高或过低都会降低活化后碳材料的石墨化程度[17]。对 GCO600-14 的石墨化程度进一步用 Raman 光谱表征，如图 3b 所示。在 1 347 cm^{-1} 和 1 586 cm^{-1} 处有 2 个明显的峰，1 347 cm^{-1} (D)处的峰与缺陷和无序度有关，而 1 581 cm^{-1} (G)处的峰来自石墨结构[18]。I_D/I_G 计算数据接近 1.0，D-带的强度仅略低于 G-带的强度，表明低石墨化碳具有高度缺陷或多孔性[19]，与 XRD 检测结果一致。

2.3　BET 测试

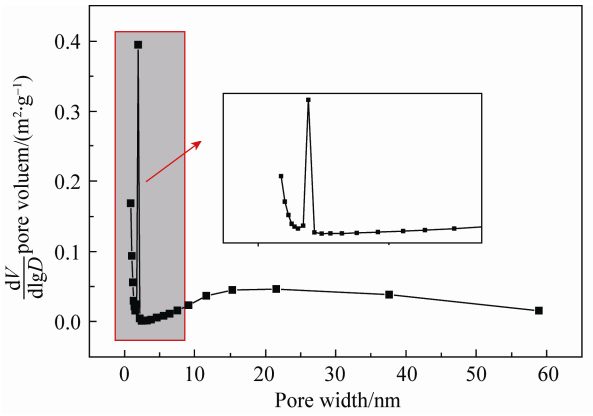
图 4 为 GCO600-14 的 N_2 吸附和脱附图和孔径分布曲线。由图 4 可见，GCO600-14 的 BET 谱(图 4a)显示出 I 型和 IV 型吸附等温线的混合特征，在低压下具有明显的吸附态，在中压范围内具有滞后回归线，表明 GCO600-14 具有微孔和介孔特性[19]，表面积为 661.7 m^2/g。BJH 孔分布图(图 4b)显示 GCO600-14 包含中孔和微孔，孔的平均直径为 4.7 nm。这是由于碳酸盐和生物炭开始热解时产生 CO，CO_2，H_2O 和其他气体，熔融混合物可能像面包膨松剂一样膨胀，当气体溢出时，将形成连续的孔结构，类似于软模板。GCO600-14 的这些特性有利于超级电容器电极材料中的电荷存储和粒子传输，电化学超级电容器测试进一步证明了这一点。

2.4　电化学性能分析

图 5 为不同活化温度和不同比例活化剂下以 GCO 为前驱体的 CV 和 EIS 曲线。由图 5a 和图 5b 可见，所有样品几乎都呈矩形，表明碳的电容主要来自 EDLC 特性[19]。从图 5a 可以发现当温度为 600 ℃时，CV 闭合曲线的积分面积最大，说明温度过高或者过低都会影响 GCO 材料的电化学性能，与 SEM 分析结果一致。由图 5c 和图 5d 可见，每个图谱都由高中频区域的半圆和低频区域的曲线组成，半圆在高频区实轴上的截距归因于由电解质、电极和隔板引起的 Ω 电阻(电荷转移电阻)[20]，电荷转移电阻与活性物质和电解质的界面传输效率有关[21]；曲线代表与电极上的电子扩散相关的 Warburg 阻抗。GCO600-14 不仅在高频区有更小的半圆，在低频区的斜率也较大，总体数据优于其他几个样品，与充放电过程中得出的结论一致，说明 GCO 和 K_2CO_3 质量比为 1:4、活化温度为 600 ℃是最佳方案。



(a) GCO600-14 N_2 adsorption–desorption map



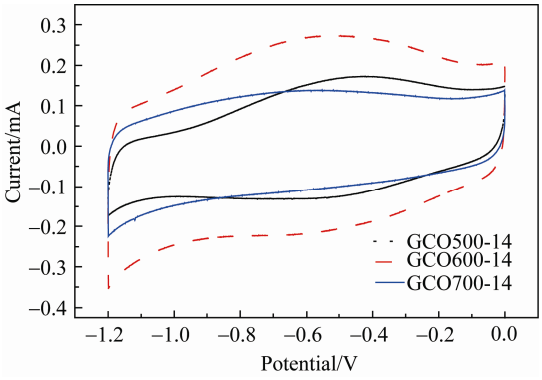
(b) Pore size distribution chart

Illustration is the distribution diagram under small aperture.

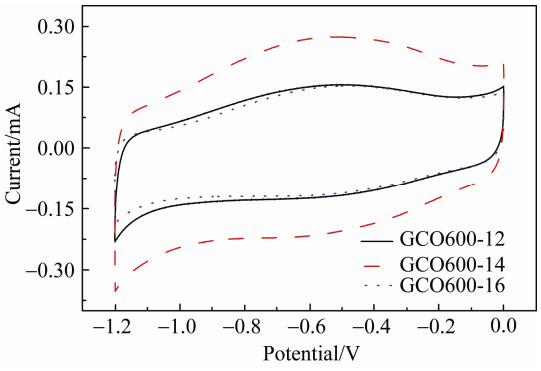
图 4　GCO600-14 的 N_2 吸附–脱附和孔径分布曲线

Fig. 4　GCO600-14 N_2 adsorption–desorption map and pore size distribution chart

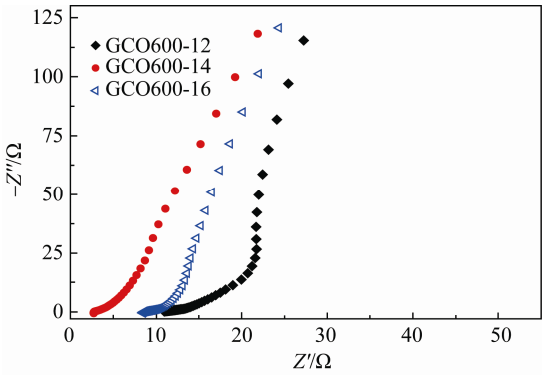
图 6 为 GC600-14 在三电极体系中的电化学性能曲线。从图 6a 可以看出，CV 曲线的形状几乎没有发生改变；在同样的电压值下，将电流密度从 1 A/g 增加到 30 A/g，观察它的充放电曲线(图 6b)，发现其形状也没有发生改变，说明 GCO600-14 具有杰出的倍率性能[19]。但随着电流密度的增大，电池的比电容发生了衰减，这主要是因为高的交流电密度对双电层型电容器不利，电子没有足够的时间扩散到整个孔中[19]。为具体说明衰减情况，将不同电流密度下的比电容用式(1)计算后呈现在图 6c 中，电流密度分别为 1、2、4、8、10、15、20、25、30 A/g 时，对应的比电容为 413、350、333、325、313、308、300、298、285 F/g，高于文献[22–25]报道的生物质电极材料，如表 1 所示。当电流密度扩大 30 倍后，电容下降至原来的 70%，仍然是较为可观的数字。紧接着在 5 A/g 下，对 GCO600-14 的



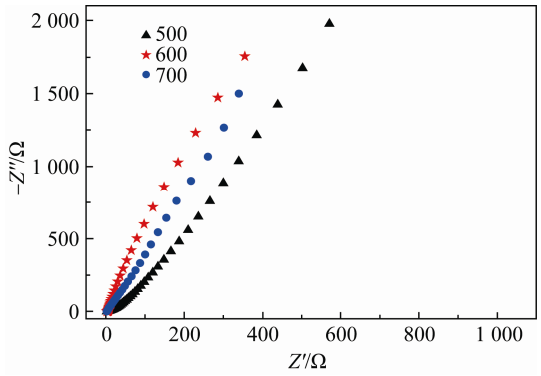
(a) CV curves at different activation temperature



(b) CV curves with different ratios of activators



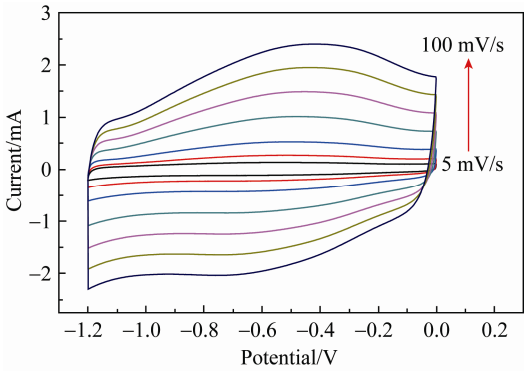
(c) EIS curves with different ratios of activators



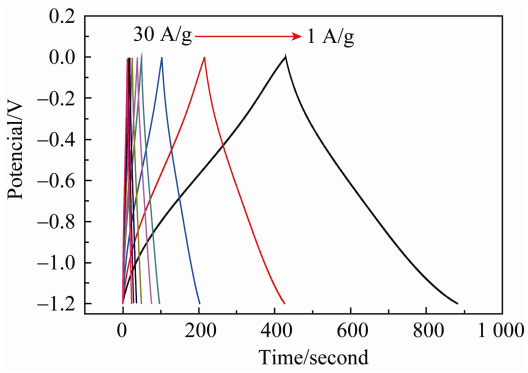
(d) EIS curves at different activation temperatures

图 5　不同活化温度和不同比例活化剂下以 GCO 为前驱体的 CV 和 EIS 曲线

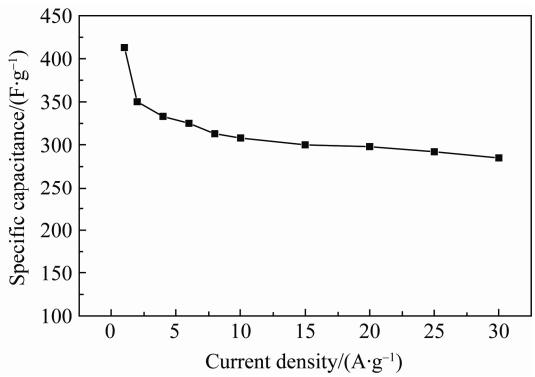
Fig. 5　CV and EIS curves with GCO as precursor at different activation temperatures and activators of different proportions



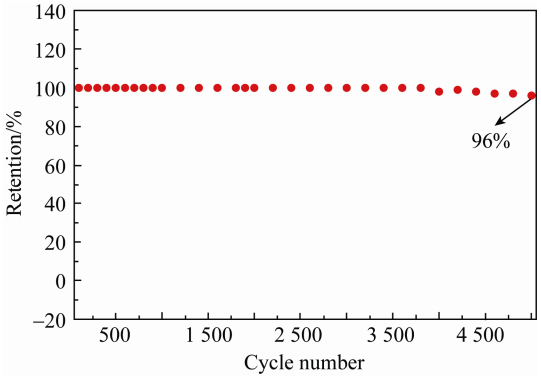
(a) CV curve of GC600-14



(b) GCD curve of GC600-14



(c) Current density-specific capacitance curve



(d) Cyclic performance curve

图 6　GC600-14 在三电极体系中的电化学性能曲线

Fig. 6　Diagram of electrochemical performance of GC600-14 under three-electrode system

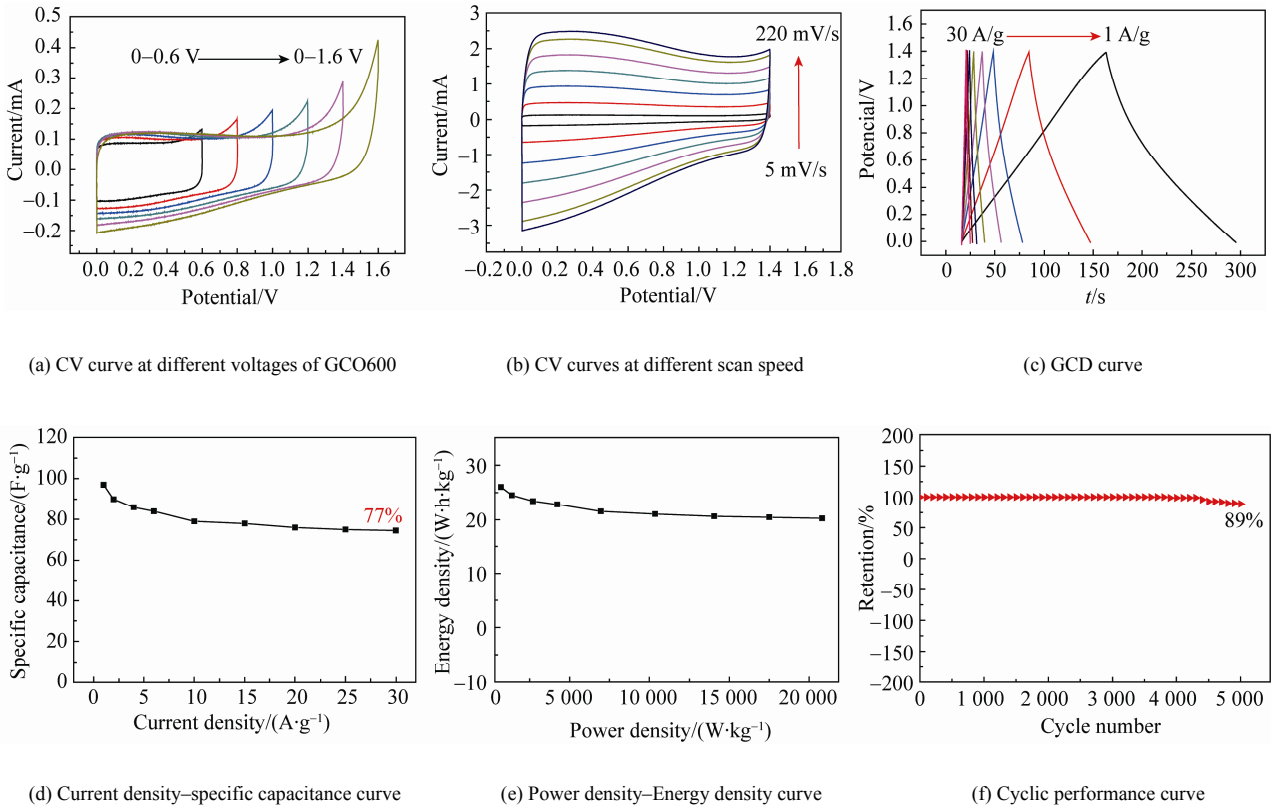
表 1 GCO600-14 电极材料与文献中的三电极性能

Table 1 Performance comparison of the GCO600-14 electrode material in three-electrode with previously published results

Electrode material	Current density/ ($A·g^{-1}$)	Specific capactance/ ($F·g^{-1}$)	Electrolyte	References
NCNS	1.00	268	1 M H_2SO_4	[22]
CBC-5	1.00	390	3 M KOH	[23]
AOMCs	0.20	35	1 M H_2SO_4	[24]
PCN1-3-1	0.05	324	6 M KOH	[25]
GCO600-14	1.00	413	6 M KOH	This work

循环性能进行测试，如图 6d，当循环 5 000 圈后该电容器的电容量仍可保持初始值的 96%。GCO600-14 如此出色的电化学性能得益于其高比表面积和独特 3D 大孔互连网络结构[26]。高比表面积可为双电层的构造提供足够的电极-电解质界面供电子吸附，而 3D 互连多孔结构可通过缩短扩散路径来确保快速的离子扩散。开放的中孔骨架为离子提供了缓冲地带，以及用于快速离子传输的通道，少量的微孔被用作电荷储存器[27]。

图 7 为 GCO600-14//GCO600-14 二电极的测试结果。由图 7 可见，在 10 mV/s 的扫速下，将电压窗口的范围从 0 V 扩展至 1.6 V 进行 CV 表征，在 1.6 V 时 CV 曲线出现明显的极化峰，故选取对称二电极最大电压为 1.4 V，在该电压下进行不同扫描速率的 CV 测试。由图 6b 可见，即使扫描速率增加至 220 mV/s 时，CV 曲线的形状几乎保持不变，且 CV 曲线的形状近似矩形，说明该电容器具有典型双电层行为[28]。同样在 0~1.4 V 的电势窗口下进行充放电测试，并计算了不同电流密度时的比电容如图 6d，计算结果表明：在 1 A/g 时，比电容为 97 F/g，30 A/g 时为 74.6 F/g，电流密度增大 30 倍后，比电容仍可保持初始值的 77%，这是相当优异的。且 GCD 曲线形状趋近于等腰三角，表明碳材料优异的可逆性[29]。当功率密度为 720 W/kg 时，能量密度可达到 26 (W·h)/kg，功率密度为 20 800 W/kg 时，能量密度仍可达到 20.2 (W·h)/kg。在 10 A/g 的电密度下对 GCO600-14//GCO600-14 的循环性能进行测试，连续充放电测试，发现在循环 5 000 圈后电容仍可保持在初始值的 89% (图 7f)，这表明该对称电容器的寿命长、稳定性强[30]。



(a) CV curve at different voltages of GCO600 (b) CV curves at different scan speed (c) GCD curve

(d) Current density–specific capacitance curve (e) Power density–Energy density curve (f) Cyclic performance curve

图 7 GC600-14 在二电极体系中的电化学性能

Fig. 7 Diagram of electrochemical performance of GC600-14 under two-electrode system

3　结论

从柚皮中获得了大孔互连网络结构的生物质碳(GCO600-14)，提出了一种在空气氛围下有效的制备活性炭前驱体的方法，该方法比熟知的 AC 制备过程条件更温和，且不需要惰性气体保护。

GCO600-14 具有较大的比表面积(661.7 m^2/g)、丰富的网状孔隙。值得注意的是，在三电极体系下，GCO600-14 在 1 A/g 时的比电容为 413 F/g，电流密度扩大 30 倍后仍可达到 289 F/g，为原先的 70%。

二电极体系中，在对称超级电容器 GCO600-14//GCO600-14 当电流密度增加 30 倍后比电容可保持原来的 77%。当功率密度为 720 W/kg 时，能量密度可达到 26 (W·h)/kg，当功率密度为 20 800 W/kg 时，能量密度仍可达到 20.2 (W·h)/kg，且在循环 5 000 圈后三电极的电容没有明显下降。以上数据都说明 GCO600-14 作为新型的、环境友好的储能材料具有潜在的开发价值和广泛的应用前景。

参考文献:

[1] SIMON P, GOGOTSI Y, et al. Materials for electrochemical capacitors[J]. Nat Mater, 2008, 7(7): 845–854.

[2] SHIN W, LU J, et al. ZnS coating of cathode facilitates lean-electrolyte Li-S batteries[J]. Carbon Energy, 2019, 1(2): 165–172.

[3] 周王帆, 陈新, 曹红亮, 等. 法国梧桐枯叶基活性炭的制备及其在超级电容器中的应用[J]. 化工学报, 2017, 68(7): 2918–2923.
ZHOU W F, CHEN X, CAO H L, et al. CIESC J (in Chinese), 2017, 68(7): 2918–2923.

[4] XIA X H, CHAO D L, et al. Three-dimensional graphene and their integrated electrodes[J]. Nano Today, 2014, 9(6): 785–807.

[5] XIA X H, ZHANG Y Q, et al. Novel metal@carbon spheres core–shell arrays by controlled self-assembly of carbon nanospheres: a stable and flexible supercapacitor electrode[J]. Adv Energy Mater, 2015, 5(6): 1401709.

[6] YANG C S, JANG Y S, JEONG H K. Bamboo-based activated carbon for supercapacitor applications[J]. Curr Appl Phy, 2014, 14(12): 1616–1620.

[7] SUN G, ZHANG X, LIN R, et al. Hybrid fibers made of molybdenum disulfide, reduced graphene oxide, and multi-walled carbon nanotubes for solid-state, flexible, asymmetric supercapacitors[J]. Angew Chem Int Ed Eng, 2015, 54(15): 4651–4656.

[8] BALASUBRAMANAN S, KAMATCHI KAMARAI P. Fabrication of natural polymer assisted mesoporous Co_3O_4/carbon composites for supercapacitors[J]. Electrochim Acta, 2015, 168: 50–58.

[9] GAO S, WEI X, FAN H, et al. Nitrogen-doped carbon shell structure derived from natural leaves as a potential catalyst for oxygen reduction reaction[J]. Nano Energy, 2015, 13: 518–526.

[10] KAN T, STREVOV V, EVANS T J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: a review of product properties and effects of pyrolysis parameters[J]. Renew Sust Energy Rev, 2016, 57: 1126–1140.

[11] PORITOSH Roy, GORETTY Dias. Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review[J]. Renew and Energy Rev, 2017, 77: 59–69.

[12] 代红蕾, 田艳红, 张学军, 等. 循环伏安法制备聚苯胺活性炭超级电容器膜电极[J]. 化工学报, 2012, 63(10): 3330–3334.
DAI H L, TIAN Y H, ZHANG X J, et al. CIESC J (in Chinese), 2012, 63(10): 3330–3334.

[13] WAN L, WEI W, XIE M, et al. Nitrogen, sulfur co-doped hierarchically porous carbon from rape pollen as high-performance supercapacitor electrode[J]. Electrochim Acta, 2019, 311: 72–82.

[14] OCHAI-EIEH F, MADITO M J, MAKGOPO K, et al. Electrochemical performance of hybrid supercapacitor device based on birnessite-type manganese oxide decorated on uncapped carbon nanotubes and porous activated carbon nanostructures[J]. Electrochim Acta, 2018, 289: 363–375.

[15] CHIOE G, CHEREAU B D, CECILIA M M, et al. Protected amino acid-based hydrogels incorporating carbon nanomaterials for near-infrared irradiation-triggered drug release[J]. ACS Appl Mater Inter, 2019, 20(2): 738–749.

[16] GEGE H Y, WANG T Y, ZHANG X X, et al. High-performance hierarchical N-doped porous carbons from hydrothermally carbonized bamboo shoot shells for symmetric supercapacitors[J]. J Taiwan Inst Chem Eng, 2019, 96: 672–680.

[17] 徐杰, 陈新, 王玲玲. 用过期切片面包制备环保超级电容器活性炭电极材料[J]. 化工学报, 2019, 70(9): 3582–3589.
XU J, CHEN X, WANG L L. CIESC J (in Chinese), 2019, 70(9): 3582–3589.

[18] ZOU Z, LIU T, et al. Highly mesoporous carbon flakes derived from a tubular biomass for high power electrochemical energy storage in organic electrolyte[J]. Mater Chem Phy, 2019, 223: 16–23.

[19] LI J, XIAO R, LI M, et al. Template-synthesized hierarchical porous carbons from bio-oil with high performance for supercapacitor electrodes[J]. Fuel Processing Technol, 2019, 192: 239–249.

[20] GAO S, LI X, LI L, et al. A versatile biomass derived carbon material for oxygen reduction reaction, supercapacitors and oil/water separation[J]. Nano Energy, 2017, 33: 334–342.

[21] 李娜, 王先友, 李双双. 模板法制备有序中孔炭材料及其性能, 化工学报[J]. 2008, 5(12): 3150–3157.
LI N, WANG X Y, LI S S. CIESC J (in Chinese), 2008, 5(12): 3150–3157.

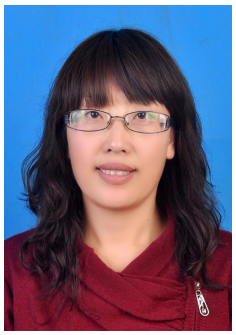
[22] KESAVAN T, SASIDHARAN M, Palm spathe derived N-doped carbon nanosheets as a high performance electrode for Li-ion batteries and supercapacitors[J]. ACS Sustain Chem Eng, 2019, 7(14): 12160–12169.

[23] 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.
DENG Y F, DU W M, WANG M Y, et al. Appl Chem (in Chinese), 2019, 36(11): 1323–1332.

[24] CASTRO-GUTIERREZ J, DIEZ N, et al. High-rate capability of supercapacitors based on tannin-derived ordered mesoporous

carbons[J]. ACS Sustain Chem Eng, 2019, 7(21): 17627–17635.
[25] GUAN L, PAN L, et al. Synthesis of biomass-derived nitrogen-doped porous carbon nanosheests for high-performance supercapacitors[J]. ACS Sustain Chem Eng, 2019, 7(9): 8405–8412.
[26] HUSSAIN S, VIKRAMAN D, TRUONG L, et al. Facile and cost-effective growth of MoS_2 on 3D porous graphene-coated Ni foam for robust and stable hydrogen evolution reaction[J]. J Alloy Compd, 2019, 788: 267–276.
[27] MARTINEZ-CASILLAS D C, MASCORRO-GUTIERREZ I, et al. A sustainable approach to produce activated carbons from pecan nutshell waste for environmentally friendly supercapacitors[J]. Carbon, 2019, 148: 403–412.
[28] GUO D, XIN R, WANG Y, et al. N-doped carbons with hierarchically micro- and mesoporous structure derived from sawdust for high performance supercapacitors[J]. Micropor Mesopor Mater, 2019, 279: 323–333.
[29] DU W, WANG X, SUN X, et al. Nitrogen-doped hierarchical porous carbon using biomass-derived activated carbon/carbonized polyaniline composites for supercapacitor electrodes[J]. J Electroanal Chem, 2018, 827: 213–220.
[30] SIMON P, GOGOTSI Y. Materials for electrochemical capacitors[J]. Nat Mater, 2008, 7(7): 845–854.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



王芳平，西北师范大学化学化工学院副教授，硕士生导师，研究方向为新能源材料的制备及其性能研究。先后主持国家自然科学基金 1 项、甘肃省自然科学基金 1 项、甘肃省高分子重点实验室项目 1 项、横向课题 2 项，申请国家发明专利 5 项，授权 4 项。在国内外学术刊物上发表研究论文 30 余篇。