酒糟纤维素碳气凝胶的制备及在超级电容器中的 应用

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2022.01.002

李顺 摘 要: 电极材料是决定超级电容器性能的主要因素,因此,合成具备特定 邬俊晖¹ 形貌、组成以及性能优异的电极材料是构建高性能超级电容器的关键。从酒 槽中提取植物纤维素,再通过冷冻干燥和热碳化处理,制备具有乱层石墨结 构的纤维素碳气凝胶功能材料,并将其应用于超级电容器。研究结果表明, 1. 湖南工业大学 最优碳化温度700℃下制备的纤维素碳气凝胶作为电极材料,在浓度为6 生命科学与化学学院 湖南 株洲 412007 mol/L 的 KOH 溶液和 1 A/g 的电流密度下,其比电容为 183.5 F/g; 而且该 2. 广西丹泉酒业有限公司 电极材料在 20 A/g 高电流密度下,仍保持 90.0 F/g 的比电容,展现出优异的 广西 河池 547000 倍率性能。交流阻抗拟合结果表明,CA-700 组装的超级电容器界面传质电 阻和扩散电阻分别为 0.2829 Ω和 5.7210 Ω; CA-700 展现出较低的传质、扩 散阻力和优异的电化学储能特性。 关键词:酒糟;纤维素;碳气凝胶;超级电容器 中图分类号: TQ152 文献标志码:A 文章编号: 1674-7100(2022)01-0009-08 引文格式:许建雄,李 顺,覃建良,等.酒糟纤维素碳气凝胶的制备及在 超级电容器中的应用 [J]. 包装学报, 2022, 14(1): 9-16.

研究背景 1

许建雄^{1,2}

覃建良²

李娜

超级电容器也称电化学电容器,是介于传统电容 器和充电电池之间的一种新型、高效、绿色的储能装 置,具有比普通静电电容器容量大、比二次电池功率 高、充放电速度快、循环寿命长、工作温度范围宽、 对环境无污染、免维护、安全性高等诸多优点,受 到学者们广泛地关注和研究^[1-2]。超级电容器的主体 是电极材料,其种类和性能极大程度上决定了器件的 整体性能和应用场所。电极材料主要分为两类:1) 利用材料的表面积和孔道进行物理吸附的双电层电 极材料, 如碳基材料^[3-5]和碳化物衍生物^[6-7]; 2)利 用具有氧化还原活性的赝电容材料,如金属氧化物/ 氢氧化物^[8-10]、金属有机框架^[11-12]、导电聚合物^[13-14] 及金属硫化物^[15-17]。其中碳基材料具有高比表面积、 低成本、化学稳定性和热稳定性高以及电导率较高等 优点,在超级电容器储能中有着广泛的应用。

超级电容器储能碳基材料主要包括多孔碳[18-19]、 石墨烯^[20-21]、碳纳米管^[22-23]、碳纳米纤维^[24-25]和碳 气凝胶等。其中碳气凝胶(carbon aerogel, CA)由 于其超低密度和较高的比表面积,被认为是一种良好 的双电层电容器电极材料^[26-28]。传统碳气凝胶一般

收稿日期: 2021-12-02

基金项目: 丹泉酒业酱香型酒糟的资源化利用研究及推广应用(企业横向)课题

作者简介: 许建雄(1984-), 男, 湖北黄冈人, 湖南工业大学副教授, 博士生导师, 主要从事绿色包装与功能纳米材料研究, E-mail: xujianxiong8411@163.com

包装学报 PACKAGING JOURNAL 2022 年第14卷第1期Vol.14No.1 Jan. 2022

采用酚醛树脂的碳化制得^[28],这样得到的有机气凝 胶虽具有较高的比表面积和比电容,但是存在前驱 体有毒且价格昂贵, 气凝胶的合成过程复杂等问题, 从而大大阻碍了碳气凝胶在实际中的大规模生产和 应用^[29]。

纤维素具有来源广泛、价格低廉、制备工艺绿色 安全等特点。近年来,纤维素气凝胶备受研究者青睐, 并广泛应用于储能领域^[30-31]。通过冷冻干燥技术, 利用拥有独特纳米结构的纤维素,构建具有三维网络 结构的纤维素气凝胶,其表现出了更大的比表面积和 较宽的孔径分布范围。

目前,制备纤维素碳气凝胶的前驱体材料主要 有:再生纤维素^[32-33]、纳米纤维素^[34-35]和纤维素 衍生物^[36-37]。其中,再生纤维素具备易降解和结构 多样的特点,广泛用于气凝胶的制备。

本研究以酒糟生物质废弃物为原料提取植物纤 维素,通过溶胶、凝胶、冷冻干燥得到纤维素气凝胶, 并以纤维素气凝胶为前驱体,通过高温碳化处理得到 具有高比表面积、高导电性的纤维素碳气凝胶材料。 将纤维素碳气凝胶作为电极材料用于超级电容器储 能,并探讨碳化温度对该电容器的电化学行为和储能 性能的影响。

实验 2

2.1 主要原材料与仪器

1) 原材料

丹泉酒业酱香型酒糟,湿基含水质量分数 为58.46%。氢氧化钠,化学纯;硝酸,质量分数 为36.5%;乙醇,分析纯;次氯酸钠,有效氯质 量分数为35.5%; 尿素, 分析纯。以上原材料均 为天津博迪化工股份有限公司生产。聚四氟乙烯 (polytetrafluoroethylene, PTFE) 乳液, 质量分数为 60%, 广州松柏化学有限公司。乙炔黑, 电池级, 阿 拉丁试剂(上海)有限公司。

2) 仪器

场发射扫描电子显微镜 (field emission scanning electron microscope, FSEM), HITACHI S-4800, 日 本日立集团; X 射线衍射分析仪(X-ray diffraction, XRD), D/Max 2500, 日本理学株式会社; 电化学 工作站, CHI760E, 上海辰华仪器有限公司。

2.2 纤维素的提取

1) 预处理。称取 10 g 烘干的酒糟, 以 1:30 的固

液比(干酒糟质量与 NaOH 溶液体积之比, g/mL) 加入质量分数为 3% 的 NaOH 溶液, 于 60 ℃下水浴 搅拌处理12h,过滤水洗至中性。

2)提取。以1:20的固液比(干酒糟质量与硝 酸 / 乙醇混合液体积之比, g/mL) 加入硝酸 / 乙醇混 合液(体积比为1:3)在60 ℃下水浴搅拌处理12h, 过滤水洗至中性。

3)漂白。以1:20的固液比(干酒糟质量与次氯 酸钠溶液体积之比,g/mL)加入质量分数6%的次氯 酸钠溶液,加入冰醋酸调节 pH 值至 3~5,氧化除去 木质素 2 h, 过滤水洗至中性, 得到絮状分散均匀纤 维素悬浮液。

2.3 纤维素碳气凝胶的制备

将纤维素悬浮液在-85 ℃、0.06 MPa下冷冻干 燥除去凝胶中的冰晶,随后在氩气氛围和一定温度下 碳化,升温速率为5℃/min,碳化时间为2h。降温 后将样品取出,用浓度为1 mol/L 的 HCl 溶液洗涤除 杂,再用去离子水洗至中性,真空干燥后得到纤维素 碳气凝胶。将在 400, 700, 1000 ℃碳化得到的碳气凝 胶(CA)分别记为CA-400、CA-700和CA-1000。

2.4 电极片的制备

所制备的 CA 样品、导电剂乙炔黑和黏结剂聚四 氟乙烯(PTFE)按质量比 8:1:1 称取备用。将 CA 与 乙炔黑在研钵中充分研磨,混合均匀后,加入到含聚 四氟乙烯的乙醇分散液中超声分散,均匀搅拌8h得 到均一的浆液。随后将浆液滴涂在洁净的12 mm 圆 形泡沫镍极片上,真空干燥 8h 得到测试电极片。

2.5 纤维素碳气凝胶的形貌结构表征和电化学性能 测试

1)形貌结构表征

將待测材料研磨喷金处理后,用牙签蘸取试样 粘在导电胶上,通过电镜在 5~20 kV 的工作电压和 5~10 mA 的工作电流下,观察样品的微观形貌。

采用 D/Max 2500 型衍射分析仪,对样品的物相 结构进行分析。测试衍射线采用 Cu 靶 Ka, 入射波长 λ为 0.154 06 nm, 扫描范围为 10°~80°, 扫描速率为 $5 (^{\circ})/\min_{\circ}$

2) 电化学性能测试

采用纤维素碳气凝胶为工作电极,浓度为6mol/L 的 NaOH 水 溶 液 为 电 解 质, Hg/HgO 和 铂 片 (2 cm×2 cm)分别作为参比和对电极的三电极体系, 在室温下测试超级电容器的电化学性能。

1 许建雄,等 酒糟纤维素碳气凝胶的制备及在超级电容器中的应用

3 结果与讨论

3.1 酒糟纤维素碳气凝胶的形貌和晶体结构

3.1.1 形貌

采用扫描电镜对不同碳化温度下的纤维素气凝 胶形貌进行观察,结果如图1所示。由图1a、1c和 1e可知,在所有碳化温度下得到的气凝胶结构比较 致密,碳化后纤维素气凝胶的网络结构被破坏,孔壁 重新组装成较大的颗粒,颗粒与颗粒间存在大量空 隙。仔细观察发现,在400℃和700℃碳化条件下(图 1b和1d),酒糟原生的紧凑层状纤维结构被保留下 来,纤维壁上没有观察到明显的二级孔,这与高温下 纤维素融化引起的纤维素分子重新连接有关^[38];在 1000℃碳化条件下(图1f),纤维结构发生部分塌缩, 表面的层状纤维部分剥离脱落。



a) CA-400 放大 1000 倍



b) CA-400 放大 10 000 倍



c) CA-700 放大 1000 倍



d) CA-700 放大 10 000 倍



e) CA-1000 放大 1000 倍



f) CA-1000 放大 10 000 倍 图 1 纤维素碳气凝胶的 SEM 图 Fig. 1 SEM image of cellulose carbon aerogel

3.1.2 晶体结构

通过 XRD 对不同碳化温度下合成的酒糟纤维素 碳气凝胶的晶体结构进行表征,结果如图 2 所示。 从图 2 可以看出,不同碳化温度下合成的 CA-400、 CA-700 和 CA-1000 的 XRD 曲线均表现出较宽的衍 射峰,整体呈现出无定形碳结构。这与碳化过程中 结晶结构的纤维素转变为无定形的乱层石墨碳有关。 一般地,在 24.4°和 44.5°衍射角处出现的宽衍射峰 对应于石墨的(002)和(100)型晶面,表明纤维素 气凝胶碳化后朝着石墨化结构的转变。随着碳化温 度的升高,CA-700 和 CA-1000 的(002)和(100) 型晶面的衍射峰有所增强,表明材料结晶性的增加。 通常,对于无定形的石墨碳而言,在保留原生缺陷结

1 包装学报 PACKAGING JOURNAL 2022年第14卷第1期Vol. 14 No. 1 Jan. 2022

构的基础上,实现部分的石墨化有利于电解质离子的 有效吸附和电子的快速传输。



3.2 酒糟纤维素碳气凝胶的电化学性能

为评估不同碳化温度下合成的酒糟纤维素碳气 凝胶的电化学性能,将酒糟纤维素碳气凝胶组装成超 级电容器工作电极,在以铂片作为对电极、Hg/HgO 作为参比电极的三电极体系中,电压窗口为-1~0 V, KOH 溶液浓度为 6 mol/L 的条件下,进行循环伏安 (cyclic voltammetry, CV)、恒电流充放电(galvanostat charge discharge, GCD)、倍率和交流阻抗测试。

3.2.1 循环伏安性能

纤维素碳气凝胶电极,在5~100 mV/s 扫描速 率下的循环伏安曲线如图3所示。由图3可以看出, 3个纤维素碳气凝胶电极,在所有扫速下的曲线没 有明显的氧化还原峰,这与离子在电极材料的储存 和扩散方式有关。电解质离子在材料的体相结构中 的嵌入/脱出过程表现为双电层电容行为。不同的 是, CA-400 电极在 CV 特性曲线中表现出较小的 曲线积分面积(图 3a),这与在材料更大的内阻造 成的较小的电流响应有关。此外, CA-700 电极材 料相较于 CA-1000 电极材料呈现出更大的电流响应 (图 3b 和 3c)。这表明了在一定温度下随温度的 升高,材料本体石墨化增加的同时,也伴随着适合 电子传输和离子扩散结构的坍塌和破坏。在5 mV/s 的扫描速率下, CA-400、CA-700和 CA-1000的比 容量分别为 25.1, 172.6, 60.7 F/g。CA-700 表现出更 加优异的电化学性能。这表明纤维素碳气凝胶结构 的转变影响电子传输和离子扩散,最终决定了超级 电器的电化学性能。



纤维素碳气凝胶电极材料在 1~20 A/g 电流密度 下的恒电流充放电测试结果如图 4 所示。



由图 4 可以看出,纤维素碳气凝胶电极在 1~20 A/g 电流密度下,电极的充放电曲线均呈现出类三角 形(在小电流密度下观察到部分极化现象),且不 存在明显的充放电平台,表现出双电层的储能特性。 CA-400 在放电过程中观察到较大的电压降(0~0.4 V),直接导致了较低的比容量,与 CV 曲线中观察 到的结果保持一致。与 CA-1000 相比, CA-700 虽然 石墨结晶度较低,但却呈现出更长的充放电时间和更 高的比电容。

一般地,碳基电极材料的比电容主要取决于表面 电容过程和材料内部的扩散过程。其中表面电容过程 与材料表面和边缘的缺陷、活性位点对于电解质离子 的吸附有关;而扩散过程与材料的具体形貌、结构和 孔道有关。CA-700 在拥有较低电阻的同时,保留了 材料本体的稳定结构,这种部分有序的石墨化域与材 料表面缺陷结合的结构,在保证电子快速传输的同时 也提供离子合适的吸附活性位点,因此呈现出更高的 电化学容量。

3.2.3 CA-700 电极的倍率性能与交流阻抗

对不同碳化温度下酒糟纤维素碳气凝胶的形貌、 结构和电化学性能表征与评估的结果表明,CA-700 电极表现出优异的储能特性,因此对CA-700电极进 一步进行了倍率和交流阻抗测试。

在 1~20 A/g 电流密度下 CA-700 电极的倍率性能 测试如图 5 所示。





由图 5 可知, CA-700 电极材料在 1,2,5,10,20 A/g 的电流密度下,比电容分别为 183.5,160.2,133.0, 112.0,90.0 F/g。这是由于随电流密度的增大,受限 于电解液离子扩散速率,电解质离子在大电流密度下 并不能实现完整的嵌入 / 脱出过程,材料的离子存储 结构没有得到有效的利用,致使电解液离子和电极的 宏观有效接触面积减小,电极材料的比电容下降。

为进一步了解 CA-700 电极材料的电子传输和离子扩散过程,在三电极体系下进行交流阻抗谱测试,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,阻抗曲线分别由高频区域与实轴相 交的直线部分、中频区域弯曲的小半圆弧部分以及低 频区域与实轴呈一定角度的直线部分组成。通常,在 高频区域与实轴相交的直线与测试过程中的电解质、

● 装 学 报 PACKAGING JOURNAL 2022 年第14 卷第1 期 Vol. 14 No. 1 Jan. 2022

电极和溶液电阻有关;中频区域的小段圆弧受电解质 离子扩散进入溶液-电极表面的双电层界面影响;低 频区域的倾斜直线与电子和离子在电极材料体相中 的固体扩散有关。





对图 6 中曲线的不同区域进行等效电路的拟合, *R*₁ 表示三电极测试体系中电极和电解质总的欧姆电 阻; *R*₂ 和常相位角元件(CPE)分别表示电解质离 子在溶液 - 电极界面扩散过程的电阻和电容部分; *R*_w 表示电解质离子在电极中固相扩散过程的沃伯格阻 抗。等效电路图中的具体元件拟合数值如表1所示。 由表1可知, CA-700 电极组装的超级电容器欧姆电 阻、界面传质电阻和扩散电阻分别为: 0.6145, 0.2829, 5.7210 Ω 表现出较低的传质和扩散电阻。

表 1 阻抗拟合电路中的元件参数 Table 1 Components parameters in the impedance fitted circuit

参数	R_1/Ω	R_2/Ω	$CPE/(S \cdot s^n)$	$R_{ m w}/\Omega$
取值	0.6145	0.2829	2.642E-3, <i>n</i> =0.7474	5.7210

4 结论

本文以酒糟为原料制备了纤维素碳气凝胶,并将 其作为电极材料应用于超级电容器作储能研究,可得 如下结论:

1)700 ℃下得到的 CA-700 材料在作为电极材料
 时,表现出优异的电化学性能。在 1, 2, 5, 10, 20 A/g
 的电流密度下,比电容分别为 183.5, 160.2, 133.0,
 112.0,90.0 F/g。

2) 交流阻抗拟合结果表明, CA-700 电极组装的

超级电容器欧姆电阻、界面传质电阻和扩散电阻分 别为:0.6145、0.2829、5.7210Ω,具备较低的传质、 扩散阻力和优异的电化学储能特性。

酒糟纤维素碳气凝胶,凭借其制备工艺简单和成 本低廉的优势,用做超级电容器电极储能材料具有广 阔的应用前景。

参考文献:

- ZHANG Y, GUI Y H, WU X B, et al. Preparation of Nanostructures NiO and Their Electrochemical Capacitive Behaviors[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(5): 2467–2470.
- [2] MILLER J R, SIMON P. Materials Science. Electrochemical Capacitors for Energy Management[J]. Science, 2008, 321(5889): 651–652.
- [3] ZHENG S H, WU Z S, WANG S, et al. Graphene-Based Materials for High-Voltage and High-Energy Asymmetric Supercapacitors[J]. Energy Storage Materials, 2017, 6: 70–97.
- [4] YANG Z F, TIAN J R, YIN Z F, et al. Carbon Nanotube-and Graphene-Based Nanomaterials and Applications in High-Voltage Supercapacitor: A Review[J]. Carbon, 2019, 141: 467-480.
- [5] WANG K, ZHAO N, LEI S W, et al. Promising Biomass-Based Activated Carbons Derived from Willow Catkins for High Performance Supercapacitors[J]. Electrochimica Acta, 2015, 166: 1–11.
- [6] CHMIOLA J, YUSHIN G, GOGOTSI Y, et al. Anomalous Increase in Carbon Capacitance at Pore Sizes Less than 1 Nanometer[J]. Science, 2006, 313(5794): 1760–1763.
- [7] MORIN S A, BIERMAN M J, TONG J, et al. Mechanism and Kinetics of Spontaneous Nanotube Growth Driven by Screw Dislocations[J]. Science, 2010, 328(5977): 476-480.
- [8] DU W, BAI Y L, XU J Q, et al. Advanced Metal-Organic Frameworks (MOFs) and Their Derived Electrode Materials for Supercapacitors[J]. Journal of Power Sources, 2018, 402: 281-295.
- [9] LIU W, YIN X B. Metal-Organic Frameworks for Electrochemical Applications[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2016, 75: 86–96.
- [10] MENG Q F, CAI K F, CHEN Y X, et al. Research Progress on Conducting Polymer Based Supercapacitor Electrode Materials[J]. Nano Energy, 2017, 36: 268– 285.

- [11] SHI Y, PENG L L, DING Y, et al. Nanostructured Conductive Polymers for Advanced Energy Storage[J]. Chemical Society Reviews, 2015, 44(19): 6684–6696.
- [12] DUBAL D P, GOMEZ-ROMERO P, SANKAPAL B R, et al. Nickel Cobaltite as an Emerging Material for Supercapacitors: An Overview [J]. Nano Energy, 2015, 11: 377–399.
- [13] GAO M R, XU Y F, JIANG J, et al. Nanostructured Metal Chalcogenides: Synthesis, Modification, and Applications in Energy Conversion and Storage Devices[J]. Chemical Society Reviews, 2013, 42(7): 2986.
- [14] LAI C H, LU M Y, CHEN L J. Metal Sulfide Nanostructures: Synthesis, Properties and Applications in Energy Conversion and Storage[J]. J Mater Chem, 2012, 22(1): 19–30.
- [15] GAO Y P, HUANG K J. NiCo2S4 Materials for Supercapacitor Applications[J]. Chemistry: An Asian Journal, 2017, 12(16): 1969–1984.
- [16] ZHANG X Y, ZHANG H Z, LIN Z Q, et al. Recent Advances and Challenges of Stretchable Supercapacitors Based on Carbon Materials[J]. Science China Materials, 2016, 59(6): 475–494.
- [17] KARTHIKEYAN K, AMARESH S, LEE S N, et al. Construction of High-Energy-Density Supercapacitors from Pine-Cone-Derived High-Surface-Area Carbons[J]. ChemSusChem, 2014, 7(5): 1435–1442.
- [18] YAN J, WEI T, QIAO W M, et al. A High-Performance Carbon Derived from Polyaniline for Supercapacitors[J].
 Electrochemistry Communications, 2010, 12(10): 1279–1282.
- [19] WEI L, SEVILLA M, FUERTES A B, et al. Polypyrrole-Derived Activated Carbons for High-Performance Electrical Double-Layer Capacitors with Ionic Liquid Electrolyte[J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(4): 827–834.
- [20] CHEN P, YANG J J, LI S S, et al. Hydrothermal Synthesis of Macroscopic Nitrogen-Doped Graphene Hydrogels for Ultrafast Supercapacitor[J]. Nano Energy, 2013, 2(2): 249–256.
- [21] ZHU S, ZHANG H, CHEN P, et al. Self-Assembled Three-Dimensional Hierarchical Graphene Hybrid Hydrogels with Ultrathin β -MnO₂ Nanobelts for High Performance Supercapacitors[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(4): 1540–1548.
- [22] NIU Z Q, ZHOU W Y, CHEN J, et al. Compact-Designed Supercapacitors Using Free-Standing Single-Walled Carbon Nanotube Films[J]. Energy &

Environmental Science, 2011, 4(4): 1440.

- [23] HU L B, PASTA M, MANTIA F L, et al. Stretchable, Porous, and Conductive Energy Textiles[J]. Nano Letters, 2010, 10(2): 708–714.
- [24] GUPTA K, LIU T Y, KAVIAN R, et al. High Surface Area Carbon from Polyacrylonitrile for High-Performance Electrochemical Capacitive Energy Storage[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2016, 4(47): 18294–18299.
- [25] CHEN Y J, AMIRI A, BOYD J G, et al. Promising Trade-Offs between Energy Storage and Load Bearing in Carbon Nanofibers as Structural Energy Storage Devices[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(33): 1901425.
- [26] WANG Q, CAO Q, WANG X Y, et al. A High-Capacity Carbon Prepared from Renewable Chicken Feather Biopolymer for Supercapacitors[J]. Journal of Power Sources, 2013, 225: 101–107.
- [27] LV Y K, GAN L H, LIU M X, et al. A Self-Template Synthesis of Hierarchical Porous Carbon Foams Based on Banana Peel for Supercapacitor Electrodes[J]. Journal of Power Sources, 2012, 209: 152–157.
- [28] SI W J, ZHOU J, ZHANG S M, et al. Tunable N-Doped or Dual N, S-Doped Activated Hydrothermal Carbons Derived from Human Hair and Glucose for Supercapacitor Applications[J]. Electrochimica Acta, 2013, 107: 397–405.
- [29] MORENO-CASTILLA C, DAWIDZIUK M B, CARRASCO-MARÍN F, et al. Surface Characteristics and Electrochemical Capacitances of Carbon Aerogels Obtained from Resorcinol and Pyrocatechol Using Boric and Oxalic Acids as Polymerization Catalysts[J]. Carbon, 2011, 49(12): 3808–3819.
- [30] WU Z Y, LI C, LIANG H W, et al. Ultralight, Flexible, and Fire-Resistant Carbon Nanofiber Aerogels from Bacterial Cellulose[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2013, 52(10): 2925-2929.
- [31] ZU G Q, SHEN J, ZOU L P, et al. Nanocellulose-Derived Highly Porous Carbon Aerogels for Supercapacitors[J]. Carbon, 2016, 99: 203-211.
- [32] GHASEMI M, TSIANOU M, ALEXANDRIDIS P. Assessment of Solvents for Cellulose Dissolution[J]. Bioresource Technology, 2017, 228: 330–338.
- [33] SAYYED A J, DESHMUKH N A, PINJARI D V. A Critical Review of Manufacturing Processes Used in Regenerated Cellulosic Fibres: Viscose, Cellulose Acetate, Cuprammonium, LiCl/DMAc, Ionic Liquids, and NMMO Based Lyocell[J]. Cellulose, 2019, 26(5): 2913–2940.
- [34] DE FRANCE K J, HOARE T, CRANSTON E

D. Review of Hydrogels and Aerogels Containing Nanocellulose[J]. Chemistry of Materials, 2017, 29(11): 4609-4631.

- [35] LÜ D, DU H S, CHE X P, et al. Tailored and Integrated Production of Functional Cellulose Nanocrystals and Cellulose Nanofibrils via Sustainable Formic Acid Hydrolysis: Kinetic Study and Characterization[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, 7(10): 9449–9463.
- [36] OPREA M, VOICU S I. Recent Advances in Composites Based on Cellulose Derivatives for Biomedical Applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 247:

116683.

- [37] LIN R J, LI A, LU L B, et al. Preparation of Bulk Sodium Carboxymethyl Cellulose Aerogels with Tunable Morphology[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 118: 126–132.
- [38] SZCZEŚNIAK L, RACHOCKI A, TRITT-GOC J. Glass Transition Temperature and Thermal Decomposition of Cellulose Powder[J]. Cellulose, 2008, 15(3): 445– 451.

(责任编辑:邓光辉)

Preparation of Distilled Grains Cellulose Based Carbon Aerogel and Application in Supercapacitors

XU Jianxiong^{1, 2}, LI Shun¹, QIN Jianliang², WU Junhui¹, LI Na¹

(1. College of Life Sciences and Chemistry, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;2. Guangxi Danquan Wine Industry Co., Ltd., Hechi Guangxi 547000, China)

Abstract: Electrode material is the main factor to determine the performance of supercapacitor, therefore, synthesizing electrode materials with specific morphology, composition and excellent performance is the key to constructing high-performance supercapacitors. Cellulose-based disordered layer graphite structure carbon aerogel was prepared from distilled grains by extraction, freeze-drying and thermal carbonization, and used as electrode materials for supercapacitor. The results revealed that at the optimal carbonization temperature of 700 $^{\circ}$ C, the specific capacity of the synthesized cellulose carbon aerogel electrode in KOH solution with concentration of 6 mol/L and a current density of 1 A/g was 183.5 F/g. The specific capacity of 90.0 F/g was maintained at high current density of 20 A/g, indicating the excellent rate performance of the supercapacitor assembled by CA-700 were 0.2829 and 5.7210 Ω , respectively. CA-700 exhibited low mass transfer, diffusion resistance and excellent electrochemical energy storage characteristics.

Keywords: distilled grain; cellulose; carbon aerogel; supercapacitor