

文章编号: 1007-8827(2012)02-0129-06

静电纺丝法制备多孔纳米碳纤维 及其电化学性能研究

刘双^{1,2}, 宋燕¹, 马昌^{1,2}, 史景利¹, 郭全贵¹, 刘朗¹

(1. 中国科学院炭材料重点实验室, 中国科学院山西煤炭化学研究所, 山西 太原 030001;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 分别以聚乙烯醇(PVA)/热固性酚醛树脂(PF)/碳酸钾(K_2CO_3)和PVA/PF的水溶液为纺丝原液,通过静电纺丝、固化和炭化处理制得多孔纳米碳纤维。利用扫描电子显微镜(SEM)、低温氮气吸脱附等对所制多孔炭纳米纤维进行表征,并将所制多孔炭纤维作为模拟电容器电极材料,利用循环伏安和恒电流充放电进行了电化学性能测试。结果表明:纺丝原液中加入 K_2CO_3 后所制多孔纳米碳纤维的比表面积增大(从 $564\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 提高到 $668\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$),电化学性能提高(在电流密度为 $0.2\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 的情况下,比电容由 $165\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ 提高到 $178\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$)。

关键词: 静电纺丝;多孔纳米碳纤维;酚醛树脂;碳酸钾;电化学性能

中图分类号: TQ 342⁺.742

文献标识码: A

1 前言

超级电容器,又称电化学电容器,是一种性能介于传统电容器和二次电池之间的新型高能量存储器件,具有大比容量、长循环寿命、高功率密度,且可快速充放电、对环境无污染、低温性能良好等优点,因而受到广泛关注,已应用于电子通讯设备、电动工具、太阳能发电、国防领域等^[1-3]。在超级电容器组件中,电极材料是影响超级电容器性能的关键因素。炭材料、金属氧化物和导电聚合物的单一电极材料以及复合电极材料是目前常用的电极材料。综合各种电极材料的制备工艺及电化学性能,纳米碳纤维因其较大的比表面积和较低的电阻有明显的优势^[4]。

纳米碳纤维常用的制备方法有化学气相沉积^[5]、电弧放电^[6]、激光汽化^[7]、模板法^[8-9]等,但这些制备方法较复杂。静电纺丝是近来研究较多的一种能够连续制备微、纳米纤维的技术^[10],该制备方法具有简单、快速、环境友好等优点,且可制备直径可控、较大的比表面积等结构特点的纤维^[11],近年来以电纺法制备用于电极材料的碳纤维受到越来越多的关注^[12]。而且电纺法制备的纳米碳纤维膜可直接作为电极片,避免了颗粒状、纤维状等活性炭

在用作电极材料时因黏结剂的加入导致孔堵塞及导电性下降^[13]。

纳米碳纤维作为电极材料有较好的循环寿命和良好的电导率,但存在有效利用面积小、比电容低等缺点。在聚合物溶液中添加无机盐作为成孔剂,通过溶液静电纺丝成形后,去除无机盐形成纳米多孔结构是一种提高纤维比表面积的有效方法。Kim等^[14]在聚丙烯腈(PAN)的N,N-二甲基酰胺(DMF)溶液中加入氯化锌,制备的纳米碳纤维比表面积达 $550\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 。Gupta等^[15]在聚酰胺6的甲酸溶液中加入三氯化镓后进行电纺,得到比表面积为 $12\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 的多孔纳米纤维。Ma等^[16]在PAN/DMF溶液中加入碳酸氢钠溶液,经盐酸洗涤除去 NaHCO_3 得到多孔纳米碳纤维。张校波等^[12]在PAN的DMF溶液中加入无水醋酸锌后电纺,制得比表面积达 $413\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 的多孔纳米碳纤维。但是目前所用前驱体的多数为不适于活化造孔的聚合物,不利于产品孔结构的调节和高比表面积纳米纤维的制备^[17-18]。酚醛树脂具有分子结构确定、杂质含量少等优点,其特殊的三维交联结构经热解后能形成许多具有类石墨微晶结构的玻璃炭,因而极易活化制得高比表面积纳米碳纤维^[19]。但因普通热固性酚醛树脂的聚合度较低,在电场力作用下,不能形成

收稿日期:2011-11-29; 修回日期:2012-04-01

基金项目:国家自然科学基金(50602046),山西省自然科学基金(2007011075)和中国科学院山西煤炭化学研究所杰出青年人才基金。

通讯作者:宋燕. Tel: +86-351-4250553, E-mail: yansong@126.com

作者简介:刘双(1987-),女,山东临朐人,硕士生,主要从事新型炭材料的研究. E-mail: skliushuang@163.com

连续的纤维,只可形成极小的液滴^[20],通常需要添加诸如 PVA 等高分子作为成纤载体制备复合纤维,而后再通过后续热处理除去 PVA 等。

笔者利用 PVA 作为成纤载体,分别以 PVA/PF/K₂CO₃或者 PVA/PF 的水溶液为纺丝原液,通过静电纺丝、固化和炭化处理制得了多孔纳米碳纤维,并将其用作电容器电极材料。考察了纺丝原液中碳酸钾的添加对所制多孔纳米碳纤维结构以及电化学性能的影响。

2 实验部分

2.1 材料与仪器

聚乙烯醇(PVA),聚合度为 1750±50,国药集团化学试剂有限公司;热固性酚醛树脂(PF,型号 0908-2124),固含量为 44.55%,四川德阳恒鑫化工试验厂;碳酸钾(K₂CO₃),天津市北辰方正试剂厂,分析纯。

集热式恒温加热磁力搅拌器(DF-101S,巩义市英峪高科仪器厂);静电纺丝装置自行搭建,包括微量注射泵(KDS100,Focus Technology Co. Ltd. USA);高压电源(gamma ES50P-20W/DDPM gamma, high voltage research inc, USA);接收装置为不锈钢网。

2.2 静电纺丝法制备多孔纳米碳纤维

电纺原液制备:称取一定量 K₂CO₃和 PVA,配置成混合水溶液(其中 PVA 和 K₂CO₃的质量分数分别为 12%和 0.5%,由于 PVA 对盐有一定的容忍度^[21],K₂CO₃的最大加入量为质量分数 0.5%)。按 PVA:PF 质量比 2:1,在混合水溶液中加入 PF,在 40℃水浴中搅拌 2 h 至均一溶液,静置消泡,作为电纺原液备用。

电纺过程:施加 25 kV 电压于 9 号(直径 0.62 mm)针头上,负极接收极为接地的不锈钢网,接收距离为 18 cm,微量注射泵流速为 1.5 mL/h,液滴受加速电场作用向负极运动,在此过程中溶剂挥发,得到 PVA/PF/K₂CO₃复合纳米纤维。将复合纳米纤维于 150℃下固化 1 h,然后放入炭化炉中,在氮气保护下经 900℃炭化制得纳米碳纤维。所得纳米碳纤维在 1 mol·L⁻¹的盐酸溶液中浸泡 24 h,然后用热水冲洗除去其中无机物至清洗液为中性,得到多孔炭纳米纤维,记为 P-CNFs。

以未加入 K₂CO₃的纺丝原液所纺的炭纳米纤维做对比实验,制备方法相同,记为 C-CNFs。

2.3 样品表征

采用 S4800 扫描电子显微镜(Hitachi,日本)观察样品的微观结构,加速电压 10 kV。热性能测试在 STA-409PC(NETZCH,德国)热分析仪上完成,Ar 气氛,升温速率 5℃·min⁻¹。氮气吸脱附实验在 ASAP 2020 型氮气吸附仪(Micromeritics,美国)上进行,由 Brunauer-Emmett-Teller(BET)法测定比表面积,Density Functional Theory(DFT)法计算微孔孔径分布,t-plot 法计算微孔孔容(v_{micro}),总孔容(v_{total})由 0.99 相对压力下氮气吸附数据计算得到,微孔率($v_{\text{m}}/v_{\text{t}}$)为 v_{micro} 和 v_{total} 的比值。电化学性能测试采用三电极体系在 CHI660C 电化学工作站(辰华,中国)上完成。将多孔纳米碳纤维在 10 MPa 的压力下压在泡沫镍上制成工作电极,参比电极和对电极分别为饱和甘汞电极(SCE)和铂电极,电解液为 6 mol·L⁻¹的氢氧化钾溶液,采用循环伏安法和恒电流充放电对其进行电化学性能测试。不同的电流密度下比容量的计算采用如下公式:

$$C = I \times \Delta t / (m \times \Delta V),$$

其中: I 是放电电流,A; Δt 是放电时间,s; m 是电极片的质量,g; ΔV 是实际的放电电位降,V; C 是单电极的比电容,F·g⁻¹。

3 结果与讨论

3.1 显微结构

图 1 是各种纳米纤维的扫描电镜图,由图片分析软件(ImageJ)可知 PVA/PF 原丝的平均直径为 400 nm(图 1a)且表面光滑。炭化后纤维直径减小、纤维间搭接点增加(图 1b)。加入 K₂CO₃的电纺原液电导率增加,一方面使得静电纺时电场力增强,加强了拉伸效果,纤维变细;另一方面使得液滴表面电荷增多,增加了溶液喷射量,导致纤维直径增大^[22]。协同作用的结果,使得所制原丝的不均匀性和纤维间搭接点增加(图 1c)。由于 K₂CO₃与 PVA 和 PF 分子之间相互作用,导致炭化后纤维直径收缩加剧,扭曲程度增大(图 1d)。

3.2 热重分析

图 2 为 PVA、固化后的 PF、PVA/PF、PVA/PF/K₂CO₃的热重曲线。由图可以看出 900℃时,PF 的残炭率为 44.55%;而 PVA 几乎完全分解,仅有 3.73%的残留物。由于 PVA/PF 的质量比为 2:1,理论计算 PVA/PF 的残炭量为 14.70%,而热重分析为 10.54%,比理论值略有下降,可能是由于 PVA 的加入使得酚醛分子之间固化交联变得困难导致残

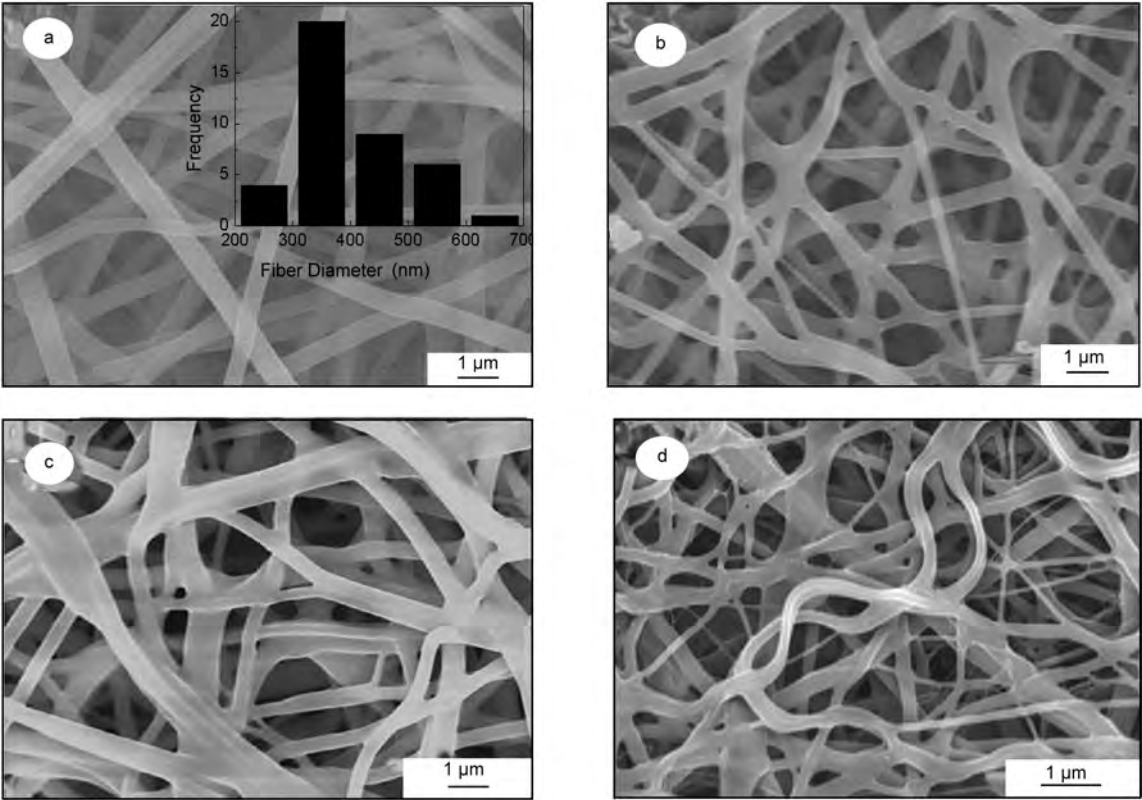


图 1 各种纳米纤维的扫描电镜照片：(a) PVA/PF 原丝，(b) PVA/PF 碳纤维，(c) PVA/PF/K₂CO₃ 原丝，(d) PVA/PF/K₂CO₃ 碳纤维

Fig. 1 SEM images of nanofibers: (a) original fiber of PVA/PF, (b) carbonized fiber of PVA/PF, (c) original fiber of PVA/PF/K₂CO₃ and (d) carbonized fiber of PVA/PF/K₂CO₃

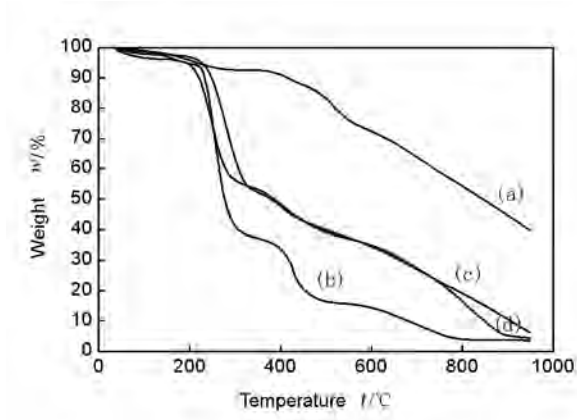


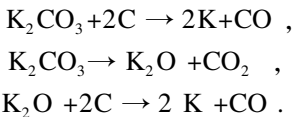
图 2 (a)PF, (b)PVA, (c)PVA/PF, (d) PVA/PF/K₂CO₃ 的热重曲线

Fig. 2 TG curves of (a) PF, (b) PVA, (c) PVA/PF and (d) PVA/PF/K₂CO₃

炭率下降。PF/PVA 中加入质量分数 0.5% 的 K₂CO₃ 后,残炭率由 10.54% 下降到 5.23%,说明 K₂CO₃ 的加入起到了活化的作用,由于其在 900 °C 后的残炭率基本不变,因此炭化温度选择 900 °C。

McKee^[23] 发现 K₂CO₃ 的活化过程包括惰性气氛

下 K₂CO₃ 还原生成 K、K₂O、CO、CO₂ 的反应,反应式如下:



K₂CO₃ 的致孔机理一般认为有两个方面:其一,通过 K₂CO₃ 与碳反应生成钾消耗碳使孔隙发展;其二,当炭化温度高于金属钾的沸点(762 °C)时,钾气化扩散进入微晶炭内部,使炭片层发生膨胀扭曲,增加了缺陷点从而进一步形成新的微孔^[24]。

3.3 比表面积及孔分布

纳米碳纤维的孔结构参数及 DFT 孔径分布曲线分别示于表 1 和图 3。由表 1 和图 3 可知,P-CNTs 的比表面积和总孔容分别为 668 m²·g⁻¹ 与 0.30 cm³·g⁻¹,比 C-CNTs 增加了 18% 和 15%,微孔率由 92.3% 提高到 97.7%,平均孔径由 1.82 nm 减小到 1.80 nm,表明 K₂CO₃ 活化产生的基本都是微孔。

3.4 电化学性能测试

两种纳米碳纤维在扫描速率为 5 mv·s⁻¹ 时的循环伏安曲线如图 4 所示。对于双电层电容器,循环伏

表 1 纳米碳纤维的孔结构参数

Table 1 Porous structure of carbon nanofibers

Samples	$S_{\text{BET}}/\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	$v_{\text{total}}/\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$	$v_{\text{micro}}/\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$	$v_{\text{m}}, v_{\text{t}}^{-1}/\%$	D/nm
P-CNFs	668	0.30	0.29	97.7	1.80
C-CNFs	564	0.26	0.24	92.3	1.82

Note: P-CNFs; carbonized fiber of PVA/PF/ K_2CO_3 ; C-CNFs; carbonized fiber of PVA/PF; S_{BET} : specific surface area; v_{total} : total pore volume; v_{micro} : microporous pore volume; $v_{\text{m}}, v_{\text{t}}^{-1}$: microporous ratio; D : average pore size.

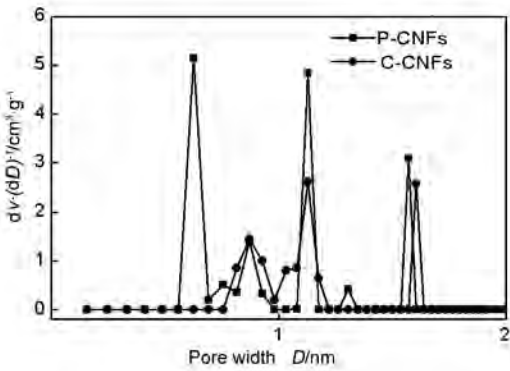


图 3 纳米碳纤维的孔径分布曲线

Fig. 3 Pore size distributions of carbon nanofibers

(P-CNFs and C-CNFs denoted the same meaning as in Table 1.)

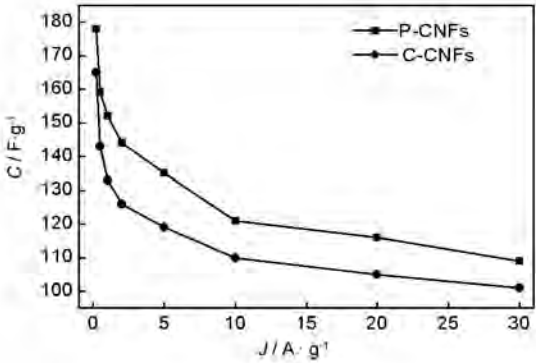


图 5 纳米碳纤维在不同充放电电流密度下的比容量

Fig. 5 Specific capacitances of carbon nanofibers at

different current densities(P-CNFs and C-CNFs

denoted the same meaning as in Table 1.)

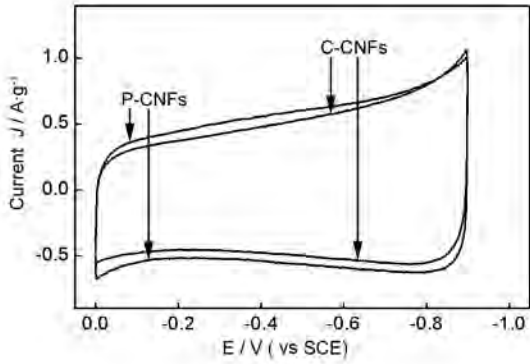


图 4 纳米碳纤维的循环伏安曲线图

Fig. 4 Cyclic voltammograms of carbon nanofibers

(P-CNFs and C-CNFs denoted the same meaning as in Table 1)

体之间不可避免地存在电阻,造成了分散电容效应的出现。分散电容效应抑制电压扫描方向改变后电流达到平台值的速度,使循环伏安曲线偏离理想状况下的矩形^[26]。图 4 中两种样品的循环伏安曲线类似,说明两种纳米碳纤维具有类似的微观结构,与表 1 和图 3 的得出的数据一致。

在相同扫描速率下,P-CNFs 的循环伏安曲线具有更大的响应电流,说明 K_2CO_3 活化可有效提高纳米碳纤维在 KOH 电解液体系中的容量性能。曲线所围的面积表示电容器的功率密度,等效串联电阻 (ESR)可以由曲线斜率 V/I 求得,显然经 K_2CO_3 活化后纤维的曲线所包面积明显增大,说明功率密度得到提高。

图 5 是纳米碳纤维样品的比电容随电流密度的变化曲线。由图 5 可知:在相同电流密度下,P-CNFs 的比电容较大。如在电流密度为 $0.2\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 时,P-CNFs 的比电容为 $178\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$,而 C-CNFs 的比电容仅为 $165\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ 。这是由于随着比表面积增大,有更多的孔表面吸附电解液离子形成双电层,从而导致比电容增大。同时,两种纳米碳纤维的比电容随电

安曲线矩形度越好,表明电极的电容特性和双电层特征越优良,从图中可以看出二者均呈现类矩形窗口,且没有氧化还原峰,兼具典型电容器的特点^[25]。对于一般的多孔电极,电荷在其内部的分布是分散的,如果电解质离子在孔中运动速度较快,产生的电阻相对较小。但在较小的微孔内,由于孔径较小以及孔道的多样性导致电解质离子运动速度较慢,产生的电解液电阻较大,同时电极内活性物质与集流

流密度的增大均逐渐减小。这是由于在小电流放电时电解质离子可充分扩散到电极材料的孔道中,而在大电流放电时电解质离子由于孔道的限制只能扩散到部分孔道中,因此只有部分表面得到利用,导致比电容下降。由图 5 还可看出,P-CNFs 在 $30 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 的大电流密度时比电容仍为 $109 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$,显示了较好的倍率特性。亦即,经 K_2CO_3 活化后纳米碳纤维具有较高的倍率特性。

4 结论

分别以 PVA/PF/ K_2CO_3 和 PVA/PF 的水溶液为纺丝原液,通过静电纺丝、固化、炭化、水洗处理制备了两种多孔纳米碳纤维。其中前者的比表面积和总孔容分别达 $668 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.3 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ 比后者分别提高了 18% 和 15%。将所制两种纳米碳纤维用作电容器电极材料时,前者的比电容、功率密度亦均优于后者。

参考文献

- [1] Conway B E, Pell W G. Power limitations of supercapacitor operation associated with resistance and capacitance distribution in porous electrode devices [J]. J Power Sources, 2002, 105 (2): 169-181.
- [2] Liu T C, Pell W G, Conway B E, et al. Behavior of molybdenum nitrides as materials for electrochemical capacitors [J]. Electrochem Soc, 1998, 145 (6): 1882-1888.
- [3] Frackowiak E. Carbon materials for supercapacitor application [J]. Phys Chem Chem Phys, 2007, 9 (15): 1774-1785.
- [4] Kim C, Park S H, Lee W J, et al. Characteristics of supercapacitor electrodes of PBI-based carbon nanofiber web prepared by electrospinning [J]. Electrochimica Acta, 2004 (50): 877-881.
- [5] Yi S P, Zhang H Y, Pei L, et al. The electrochemical hydrogen storage of CNTs synthesized by CVD using LaNi_5 alloy particles as catalyst and treated with different temperature in nitrogen [J]. J Alloy Comp, 2006, 420 (1-2): 312-316.
- [6] Huang H J, Kajiura H, Murakami Y S, et al. Metal sulfide catalyzed growth of carbon nanofibers and nanotubes [J]. Carbon, 2003, 41 (3): 615-618.
- [7] Puzosky A A, Geoghegan D B, Fan X, et al. In situ imaging and spectroscopy of single wall carbon nanotube synthesis by laser vaporization [J]. Appl Phys Lett, 2000, 76 (2): 182-184.
- [8] Liu H Y, Wang K P, Teng H S. A simplified preparation of mesoporous carbon and the examination of the carbon accessibility for electric double layer formation [J]. Carbon, 2005, 43 (3): 559-566.
- [9] 刘 颖,詹 亮,张 睿,等. 印刻法制备中间相沥青基中孔炭 [J]. 新型炭材料, 2007, 22 (3): 259-263.
(LIU Ying, ZHAN Liang, ZHANG Rui, et al. Preparation of mesophase pitch based mesoporous carbons using an imprinting method [J]. New Carbon Materials, 2007, 22 (3): 259-263.)
- [10] Ramakrishna S, Fujiwara K, Teo W E, et al. An Introduction to Electrospinning and Nanofibers [M]. USA: WorldScientific Pub. Co. Inc., 2005: 26-30
- [11] Li D, Xia Y N. Electrospinning of Nanofibers: Reinventing the Wheel [J]. Adv Mater, 2004, 16: 1151-1170.
- [12] 张校波,陈名海,张校刚,等. 静电纺丝制备多孔碳纳米纤维及其电化学电容行为 [J]. 物理化学学报, 2010, 26 (12): 3169-3174.
(ZHANG Xiao-bo, CHEN Ming-hai, ZHANG Xiao-gang, et al. Preparation of Porous Carbon nanofibers by electrospinning and their electrochemical capacitive behavior [J]. Acta Phys-Chim Sin, 2010, 26 (12): 3169-3174.)
- [13] Kim C, Yang K S. Electrochemical properties of carbon nanofiber web as an electrode for supercapacitor prepared by electrospinning [J]. Appl Phys Lett, 2003, 6 (83): 1216-1218.
- [14] Kim C, Ngoc B T N, Yang K S, et al. Self-Sustained Thin-Webs Consisting of Porous Carbon Nanofiber for supercapacitors via the electrospinning of polyacrylonitrile solutions containing zinc chloride [J]. Adv Mater, 2007, 19: 2341-2346.
- [15] Gupta A, Saquing C, Afshari M, et al. Porous nylon-6 fibers via a novel salt-induced electrospinning method [J]. Macromolecules, 2009, 42 (3): 709-715.
- [16] MA G P, YANG D Z, NIE J. Preparation of porous ultra fine polyacrylonitrile (PAN) fibers by electrospinning [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2009, 20 (2): 147-150.
- [17] Yoshida A, Tanahashi I, Nishino A. Effect of concentration of surface acidic functional groups on electric double-layer properties of activated carbon fibers [J]. Carbon, 1990, 28 (5): 611.
- [18] Tanahashi I, Yoshida A, Nishino A. Activated carbon fiber sheets as polarizable electrodes of electric double layer capacitors [J]. Carbon, 1990, 28 (4): 477.
- [19] 韩鹏献,王成扬,时志强,等. 水蒸汽活化树脂炭用做双电层电容器电极材料 [J]. 无机材料学报, 2007, 22 (6): 1046-1050.
(HAN Peng-xian, WANG Cheng-yang, SHI Zhi-qiang, et al. Electrode materials of electric double layer capacitor prepared by steam activation of phenolic formaldehyde resin [J]. Journal of Inorganic Materials, 2007, 22 (6): 1046-1050.)
- [20] 廖若谷,史铁钧,周玉波,等. 酚醛基电纺纤维的制备和分散形态研究 [J]. 高分子学报, 2006, 4 (2): 245-349.
(LIAO Ruo-gu, SHI Tie-jun, ZHOU Yu-bo, et al. The study on preparation and morphology of electrospun fibers based on phenol formaldehyde [J]. Acta Polymerica Sinica, 2006, 4 (2): 245-349.)
- [21] 严瑞瑄. 水溶性高分子 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998: 73-74.
(YAN Rui-xuan. Water-Soluble Polymers [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998: 73-74.)
- [22] 卢文芸,覃小红. 氯化锂对静电纺 PVA 纳米纤维的拉伸过程的影响 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2011, 37 (1): 23-27

- (LU Wen-yun, TAN Xiao-hong. Effect of LiCl on the spinning stretching of PVA nanofiber on electrospinning [J]. Journal of Donghua University (natural science), 2011, 37(1): 23-27.
- [23] McKee D W. Mechanisms of the alkali metal catalyzed gasification of carbon [J]. Fuel, 1983, 62(2): 170-175.
- [24] Foo K Y, Hameed B H. Utilization of rice husks as a feedstock for preparation of activated carbon by microwave induced KOH and K₂ CO₃ activation [J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 9814-9817.
- [25] XUE R, YAN J Y, LIU X X, et al. Effect of activation on the carbon fibers from phenol-formaldehyde resins for electrochemical supercapacitors [J]. J Appl Electrochem, 2011, 41: 1357-1366.
- [26] 田永明. 不同改性处理对双电层电容器炭电极结构及电化学性能的影响 [D]. 太原: 中国科学院山西煤炭化学研究所, 2008.
- (TIAN Yong-ming. Influence of different modification methods on the electric double layer capacitor carbon electrode structure and electrochemical properties [D]. Taiyuan: Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences, 2008.)

The electrochemical performance of porous carbon nanofibers produced by electrospinning

LIU Shuang^{1,2}, SONG Yan¹, MA Chang^{1,2}, SHI Jing-li¹, GUO Quan-gui¹, LIU Lang¹

(1. Key Laboratory of Carbon Materials, Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Taiyuan 030001, China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Porous carbon nanofibers were prepared by electrospinning of mixed solutions of polyvinylalcohol/phenol formaldehyde and polyvinylalcohol/phenol formaldehyde/potassium carbonate, followed by stabilization and carbonization. The microstructure of the samples was studied by SEM and N₂ adsorption/desorption. The electrochemical performance of these porous carbon nanofibers as electrodes of electrical double layer capacitors was investigated by cyclic voltammetry and constant current charge/discharge cycling. Results showed that the BET surface areas of as-prepared porous carbon nanofibers with and without potassium carbonate were 668 and 564 m²·g⁻¹, and their specific capacitances were 178 and 165 F·g⁻¹ at a current density of 0.2 A·g⁻¹, respectively.

Keywords: Electrospinning; Porous carbon nanofibers; Phenolic resin; Potassium carbonate; Electrochemical performance

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(50602046); Natural Science Foundation of Shanxi Province, China(2007011075); Outstanding Young Talent Fund of Shanxi Institute of Coal Chemistry, Chinese Academy of Sciences.

Corresponding author: SONG Yan. Tel: +86-351-4250553, E-mail: yansong@126.com

Author introduction: LIU Shuang(1987-), female, Master, engaged in the research of new carbon materials. E-mail: skliushuang@163.com

炭专业文献中的关键词 (Keywords for carbons) —技术方法 (Techniques)

Adsorption 吸附	Electron diffraction 电子衍射	Mass spectrometry 质谱分析
Atomic force microscopy 原子力显微镜	Electron energy loss spectroscopy 电子能量损失谱	Mercury porosimetry 压汞法
BET surface area BET 表面积	Electron microscopy 电子显微镜	Microcalorimetry 微量热分析仪(微量热法)
Chemisorption 化学吸附	Electron paramagnetic resonance 电子顺磁共振	Modeling 塑型
Computational chemistry 计算化学	Electron spin resonance 电子自旋共振	Molecular simulation 分子模拟
Differential scanning calorimetry 示差扫描量热分析	Ellipsometry 椭圆对称,椭圆测量	Mossbauer spectroscopy 穆斯保尔谱
Dynamical mechanical thermal analysis 动力机械热分析(动态热机械分析)	Image analysis 图像分析	Nuclear magnetic resonance 核磁共振
Electron spectroscopy 电子频谱	Infrared spectroscopy 红外光谱	Neutron scattering 中子散射
Electrochemical analysis 电化学分析	Ion scattering spectroscopy 离子散射谱	Optical microscopy 光学显微镜
	Light scattering 光散射	Photoelectron spectroscopy 光电电子能谱
		Raman spectroscopy 拉曼光谱

(李 峰,王茂章 供稿)