第 48 卷第 10 期
2020 年 10 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 10
October，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20190759

褐煤制备纳米级多孔碳及其电容脱盐性能

杨 勇，赵春霞，李骏申，羊美丽，陈 文

(武汉理工大学材料科学与工程学院，武汉 430070)

摘 要：选用天然材料褐煤为原料，以 KOH 为活化剂，在惰性气氛下热处理制备了纳米多孔碳材料。结果表明：所制备的碳材料具有丰富的介孔和微孔，平均孔径约 2 nm，比表面积可达 3 135 m^2/g。以该纳米多孔碳制作成电极后，比电容量可达 267 F/g，经过 1 000 次循环后，比电容量仍保持 95%以上。用于电容脱盐时，电吸附量可达 18.9 mg/g，且吸脱附循环性能优良。

关键词：褐煤；纳米多孔碳；比电容量；电容脱盐
中图分类号：TB34/O646　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)10–1505–07
网络出版时间：2020–07–13

Nanoporous Carbon Prepared from Lignite for Capacitive Deionization

YANG Yong, *ZHAO Chunxia*, *LI Junshen*, *YANG Meili*, *CHEN Wen*
(School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A nanoporous carbon material was prepared *via* high-temperature heat treatment with lignite as raw material and KOH as an activating agent in inertia atmosphere. The results show that nanoporous carbon has massive mesopores and micropores with an average pore size of 2 nm, and the specific surface area can reach 3 135 m^2/g. The specific capacitance of the symmetrical capacitor assembled with nanoporous carbon as an electrode is up to 267 F/g. A significant capacity retention of 95% is obtained after 1 000 cycles. The electrosorption capacity of the salt ions can reach 18.9 mg/g with a good adsorption and desorption cycle performance.

Keywords: lignite; nanoporous carbon; specific capacitance; capacitive deionization

地球上 97%的水是海水，淡水仅有 3%。我国人均淡水占有量仅为世界人均的 1/4，是世界上最缺水的国家之一。面对日益严峻的全球化淡水资源形势，海水淡化技术受到了越来越多国家的重视与支持。

电容脱盐(CDI)作为一种新型的海水淡化技术，具有操作简便、成本低、不产生二次污染、离子回收率高等优点，是一种很有前途的海水淡化技术[1]。电容脱盐基于电化学原理，是通过在电极之间施加外电场使得溶液与电极界面之间形成双电层，迫使带电离子向相反的带电电极移动。当电场被切断甚至反转时，被吸收的离子被释放到本体溶液中，电极被再生[2]。电极材料作为电容脱盐技术的核心，是影响脱盐效率的最大因素之一。良好的电极材料应该具有较大的比表面积，合理的孔径分布和优异的导电性等性能[3]。电容脱盐是基于双电层模型进行的吸脱附过程，故双电层电容量与电容脱盐量成正比，碳材料因具有高的比表面积而受到研究者的青睐。高比表面积的碳材料主要有活性炭(AC)[4]、碳气凝胶(CAs)[5]、活性炭布(ACC)[6]、活性炭纤维(ACFs)[7]、碳纳米管(CNTs)[8–9]、介孔碳(MC)[10]和石墨烯(graphene)[11]等。Kumar 等[12]以间苯二酚、甲醛为前驱体，通过溶胶凝胶缩合法制备碳气凝胶，该材料的比表面积可达 2 600 m^2/g，最大的电吸附量可

收稿日期：2019–11–22。　修订日期：2020–02–11。
基金项目：国家重点研发计划(2016YFB0303904)。
第一作者：杨 勇(1995—)，男，硕士研究生。
通信作者：赵春霞(1977—)，女，博士，教授。

Received date: 2019–11–22.　**Revised date:** 2020–02–11.
First author: YANG Yong (1995–), male, Master candidate.
E-mail: 1055317630@qq.com
Correspondent authors: ZHAO Chunxia (1977–), female, Ph.D., Professor.
E-mail: Zhaochunxia@whut.edu.cn

达 10.5 mg/g。Dianbudiyanto 等[13]利用微波处理和过氧化氢辅助水热法制备了分层多孔三维石墨烯，脱盐电吸附量可达 21.6 mg/g。上述碳材料虽然脱盐吸附量较好，但通常制备工艺要求高、成本较高，影响其大规模推广应用。褐煤资源丰富、含碳量高且价格低廉，可作为原料制备高比表面积的多孔碳材料，并在催化剂载体和吸附分离等方面取得了一些效果，在电化学领域、特别电容脱盐方面具有应用前景[14]。

本工作选用天然材料褐煤作为原材料制备纳米级多孔碳，研究了碱煤比、热处理温度对多孔碳结构的影响，并将该纳米多孔碳用于电化学电容和电容脱盐测试，研究纳米多孔碳的结构对其电化学性能的影响。

1 实验

1.1 纳米级多孔碳材料的制备

以山西褐煤作为原材料，将 KOH 活化与热处理相结合制备得到纳米级多孔碳材料。主要步骤为：将原煤样粉碎后通过 200 目筛(筛孔孔径为 75 μm)筛分，得到的褐煤粉末依次用硝酸与氢氟酸清洗，再用去离子水反复清洗至 pH 值为 7，烘干。然后以 KOH 与褐煤按照 *X*:1 的质量比混合，置于管式炉中，在 N_2 气氛下以 5 ℃/min 的速率升温至指定温度并保温 1 h。自然冷却至室温后取出，用盐酸对物料进行清洗，再用去离子水进行反复清洗至 pH 值为 7，得到纳米级多孔碳材料，记为 BC-*X*-*T* (碱煤比 *X*=1~4；*T* 为热处理温度，750~850 ℃)。

1.2 多孔碳电极的制作

将上述制备的纳米级多孔碳材料和乙炔黑、聚四氟乙烯(PTFE)按照质量比 8:1:1 混合，加入异丙醇作为分散剂，于玛瑙研钵中研磨至泥团状，然后将混合材料分别涂覆于泡沫镍和碳纸表面，并施加适当的压力使表面平整，120 ℃真空干燥后得到多孔碳电极(泡沫镍电极用于测量电化学性能，碳纸电极用于测量电容脱盐性能)。

1.3 结构表征与性能测试

采用德国元素分析系统公司的 Vario EL cube 型元素分析仪对原煤中的碳元素进行检测。采用德国耐驰 STA409 型综合热分析仪对原煤进行综合热分析测试。采用荷兰帕纳科 Empyrean 型 X 射线衍射仪(XRD)和英国雷尼绍 InVia 型共焦显微 Raman 光谱仪对样品的组成、物相结构进行分析。采用美国麦克 ASAP 2020M 型全自动比表面积及孔隙度分析仪对样品进行 N_2 吸脱附测试，利用 Brunauer–Emmett–Teller(BET)测试方法计算比表面积，利用 Barret–Joyner–Halenda(BJH)方法计算孔容。采用上海辰华 CHI660E 型电化学工作站对材料进行电化学性能测试，电极材料的比电容 *C* (F/g)通过式(1)计算：

$$C=2I\Delta t/(m\Delta V) \quad (1)$$

式中：*I* 是放电电流，A；*t* 是放电的时间，s；Δ*V* 放电电压，V；*m* 是单个电极片的活性物质的质量，g。采用上海仪电 DDSJ-308 型电导率仪测试电解质溶液的电导率变化，模拟电容脱盐装置如图 1 所示，两片电极平行放置于电解液中，上端外接稳压电源，转子放置于杯底，并对溶液的电导率进行实时测量，监测盐水浓度变化，再通过式(2)计算电容脱盐电吸附量 *q* (mg/g)：

$$q=(c_0-c)V/m \quad (2)$$

式中：c_0 和 *c* 分别为电解液的初始和最终浓度，mg/L；*V* 为电解液的体积，L；*m* 为活性物质的质量，g。

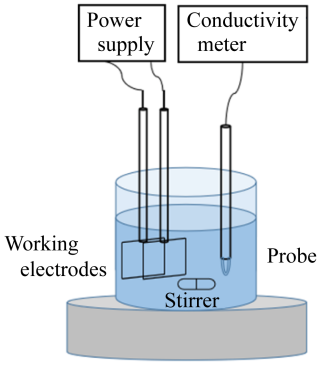


图 1 模拟脱盐装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simulated desalination plant

2 结果与讨论

2.1 褐煤原样分析

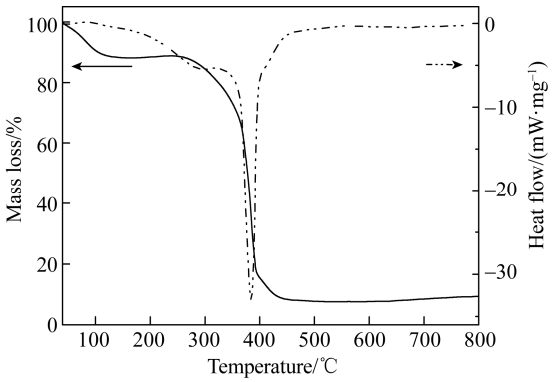
对褐煤原样进行 C、H、N、S 元素分析，结果表明：褐煤中主要成分是 C (66.160%，质量分数，下同)，还有少量 H (4.289%)、N (0.780%)和 S (0.096%)。对褐煤原样进行综合热分析，如图 2a 所示，热解质量损失可分为 3 个阶段：第 1 阶段在 250 ℃之前，该阶段质量下降较为平缓且质量损失速率较小，对应吸附水和结合水的失去；第 2 阶段在 250~400 ℃，该阶段是褐煤的主要质量损失过程，对应褐煤的分解和挥发成分的析出，在 390 ℃时，质量下降速率达到最大值；第 3 阶段在 400~800 ℃，该阶段的质量损失速率逐渐降低，剩余约 7%的质

量为原褐煤中残余的氧化物。

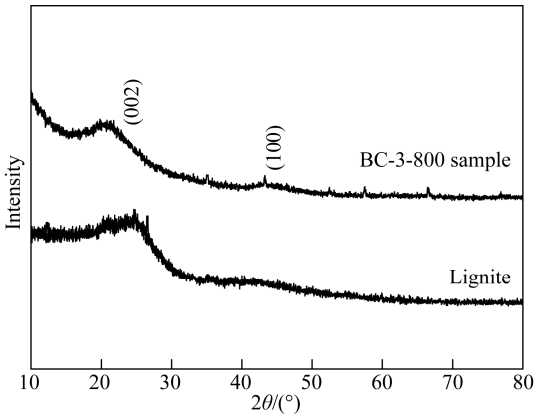
对褐煤原样与样品 BC-3-800 进行 XRD 测试。由图 2b 可见，褐煤原样在 2θ=26°和 44°附近的峰，对应于石墨结构的(002)和(100)晶面的衍射峰，说明褐煤中存在不规整的石墨微晶碳。

2.2 多孔碳物相分析

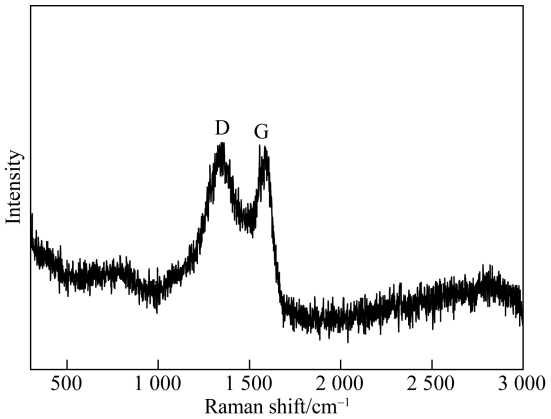
由图 2b 可见，与褐煤原样相比，样品 BC-3-800 对应于(002)晶面的峰向低角度方向移动，说明经过活化和高温热处理后，其具有有序的石墨结构，且层间距大。图 2c 为所制备的多孔碳样品 BC-3-800 的 Raman 光谱，在 1 340 cm^{-1} 和 1 590 cm^{-1} 出现 2 个特征衍射峰，分别对应于碳的 D 峰和 G 峰[15]，且 I_D/I_G 的比值约等于 1，说明经过高温热处理后，得到的多孔碳具有较高的石墨化程度。



(a) TG–DSC curve of lignite



(b) XRD patterns of BC-3-800 sample and lignite



(c) Raman spectrum of BC-3-800 sample

图 2　样品的热重–差热(TG–DSC)曲线、XRD 谱和 Raman 光谱

Fig. 2　Thermogravity–differential thermal analysis (TG-DSC) curves, XRD patterns and Raman spectrum of samples

2.3 孔结构分析

2.3.1　碱煤比对纳米多孔碳孔结构的影响　　图 3a 为不同碱煤比制备的多孔碳样品的 N_2 吸脱附等温线。根据国际纯粹与应用化学协会(IUPAC)分类，该等温线具有 I 型吸附曲线特征[16]。在 p/p_0<0.1 区域趋于饱和，且在平台区曲线平坦，呈现出典型的微孔特征。从图 3b 可以看出，孔径分布集中在 0.5~4.0 nm 之间，说明多孔碳材料是具有大量微孔和介孔。结合表 1 分析可知，在相同的热处理温度下(800 ℃)，随着碱煤比的增大，样品的比表面积、介孔孔容逐渐增大。当 X=3 时，样品 BC-3-800 的比表面积高达 3 135 m^2/g，且介孔孔容达 0.63 cm^3/g，微孔孔容达 0.68 cm^3/g，这说明 KOH 用量的增加有利于煤基碳结构中介孔的生成，进而显著提升了纳米多孔碳的比表面积和孔容。当 X 大于 3 时，样品 BC-4-800 的比表面积和介孔孔容均明显下降，表明过量 KOH 不利于介孔的形成。因此，碱煤比对多孔碳的比表面积和孔结构影响显著。

2.3.2　热处理温度对纳米多孔碳孔结构的影响

如图 4a 所示，所有样品的等温线均属于 I 型曲线，表明其具有微孔结构特征。由图 4b 可见，孔径分布集中在 0.5~4.0 nm 之间，且有大量介孔存在。结合表 1 进一步分析发现，当热处理温度从 750 ℃升高至 800 ℃时，多孔碳的比表面积显著增大。升高热处理温度可以使更多的碳原子处于活化状态，使得 KOH 活化反应易于进行，进而形成了大量微孔，比表面积也随之增大。当热处理温度超过金属钾的沸点(762 ℃)时，钾蒸汽会进入煤样的空隙中与碳反应，生成一些新的孔隙，使得比表面积进一步提高。所以 800 ℃热处理的样品比表面积相较于 750 ℃样品有明显提高[17]。继续升高热处理温度，虽然微孔段吸附量有所增加，但介孔孔容下降，多孔碳的比表面积基本保持不变，反映出进一步升高温度不利于改善样品的孔结构参数。

2.4 电化学性能分析

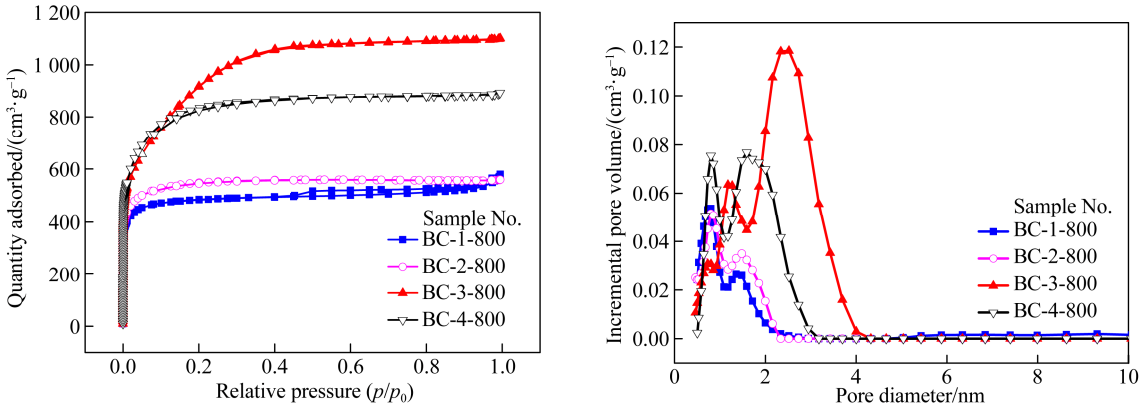
为研究纳米多孔碳的电化学性能，将样品 BC-3-800 制作成电极，以 3 mol/L KOH 溶液为电解液，玻璃纤维为隔膜，组装成对称扣式超级电容器。

表 1 纳米多孔碳的比表面积、孔结构数据和离子吸附量

Table 1 Specific surface area, pore structure and electrosorption capacity of nanoporous carbons

Sample No.	Specific surface area/ ($m^2 \cdot g^{-1}$)	Micropore volume/($cm^3 \cdot g^{-1}$)	Mesopore volume/($cm^3 \cdot g^{-1}$)	Average pore diameter/nm	Electrosorption capacity/ ($mg \cdot g^{-1}$)
BC-1-800	1 805	0.64	0.24	1.96	7.3
BC-2-800	2 031	0.69	0.37	1.70	10.1
BC-3-800	3 135	0.68	0.63	2.17	12.5
BC-4-800	2 777	0.83	0.54	1.98	10.7
BC-3-750	2 512	0.16	0.56	2.09	11.0
BC-3-850	3 167	1.05	0.59	1.89	11.2

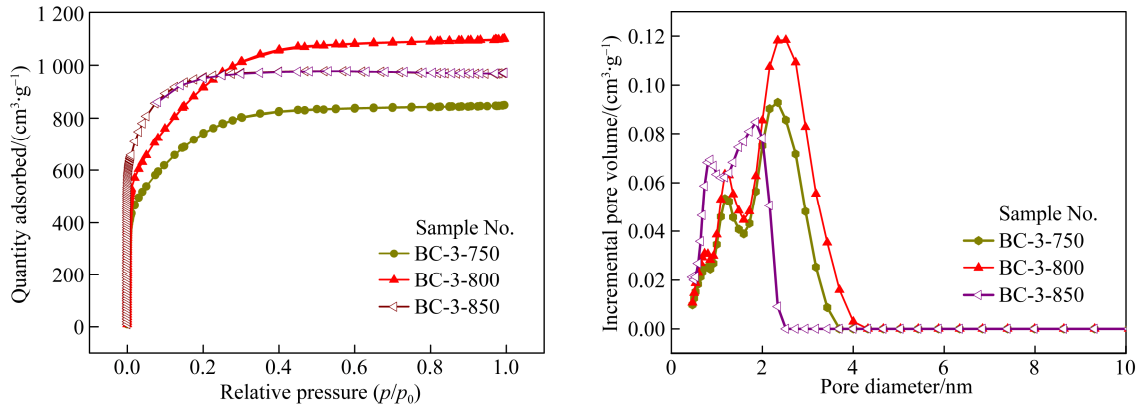
The electrosorption capacity is tested at 1.2 V.



(a) N_2 adsorption and desorption isotherms (b) Pore size distributions

图 3 不同 KOH 与褐煤之比制备的多孔碳的 N_2 吸脱附等温曲线和孔径分布曲线

Fig. 3 N_2 adsorption and desorption isotherms and pore size distributions of nanoporous carbons prepared with different ratio of KOH and lignite



(a) N_2 adsorption and desorption isotherms (b) Pore size distributions

图 4 不同温度制备的多孔碳的 N_2 吸脱附等温曲线和孔径分布曲线

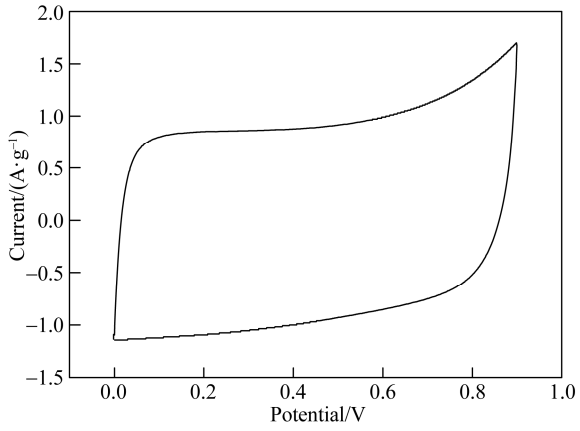
Fig. 4 N_2 adsorption and desorption isotherms and pore size distributions of nanoporous carbons prepared at different temperatures

图 5a 是扫描速率为 10 mV/s 时电容器的循环伏安(CV)曲线。曲线类似矩形，反映出良好的双电层电容行为，说明该材料的储能方式主要是静电吸附。图 5b 是电容器在 0.2 A/g 电流密度下的恒电流充放电(GCD)曲线，在 0~0.9 V 的电压范围内，电压与时间呈现出良好的线性关系，且充放电曲线构成的图形为等腰三角形，说明该材料具有良好的电容特性。计算比电容量为 267 F/g。在 1 A/g 电流密度下循环 1 000 次，该材料的比电容仍保持在 95%以上(图 5c)，说明其具有良好的电化学循环稳定性，是性能优良的电极材料。

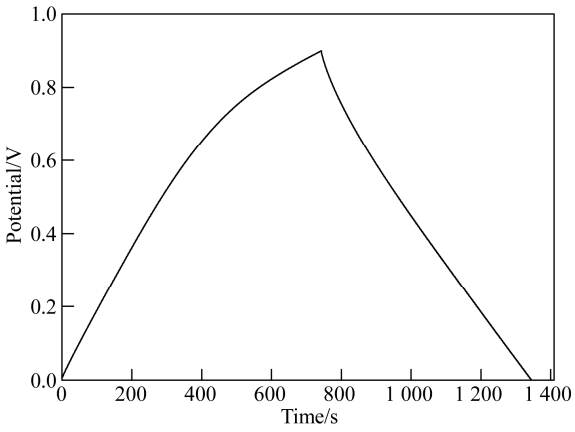
2.5 脱盐性能分析

以 150 mg/L 的氯化钠溶液作为电解液，将制备好的电极组装成模拟对称电容器测试其电容脱盐性

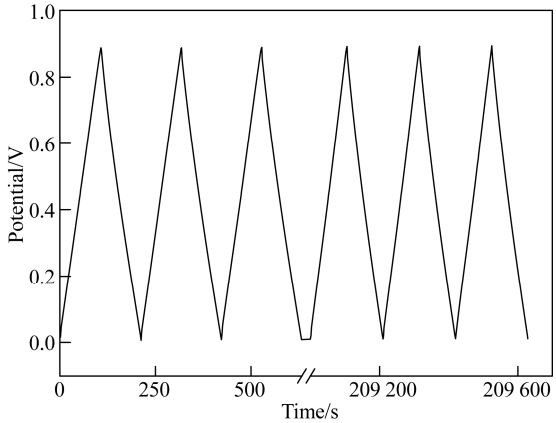
能。图 6a 是纳米多孔碳在 1.2 V 的输入电压下的脱盐性能。在反应初期，溶液的吸附量明显上升，表明溶液中离子被电极吸附，随着时间推移(10~20 min 后)，吸附量上升变缓，最终趋于稳定，说明吸附量达到最大值。



(a) CV curve



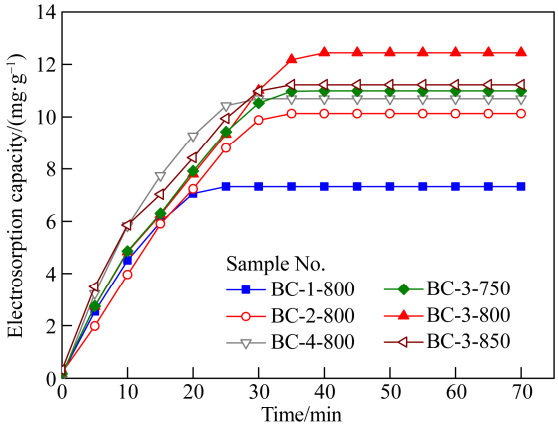
(b) GCD curve



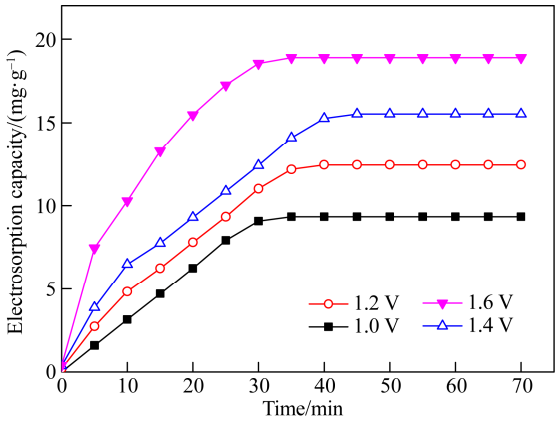
(c) GCD curves of the first three cycles and the last three cycles

图 5　样品 BC-3-800 的 CV 曲线、恒电流充放电曲线、首 3 圈和最后 3 圈的充放电曲线

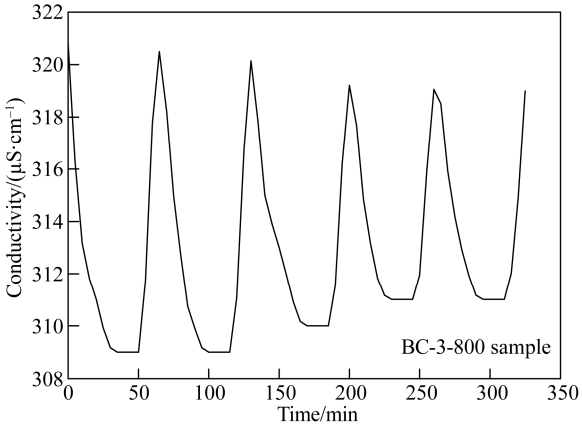
Fig. 5　Cyclic voltammetry (CV), galvanostatic charge–discharge (GCD) curve, the first three cycles and the last three cycles of BC-3-800 sample



(a) Electrosorption capacity



(b) Electrosorption capacity of BC-3-800 sample



(c) Adsorption/desorption cycles at 1.6 V

图 6　不同条件下制备的多孔碳的电吸附量、样品 BC-3-800 在不同电压条件下的电吸附量和在 1.6 V 的吸脱附循环图

Fig. 6　Electrosorption capacity of nanoporous carbons prepared at different conditions and BC-3-800 sample at different applied voltages and adsorption–desorption cycles of BC-3-800 sample at 1.6 V

结合表 1 分析，当 X=3，T=800 时，离子吸附量最大，可达 12.5 mg/g。在纳米多孔碳中，丰富的孔道可以形成双电层以存储电荷，但部分微孔由于

孔隙过小，电解液离子难以进入，导致部分的微孔是无效的，而介孔尺寸较大，为电解液的快速扩散提供通道，促进离子在碳孔道中移动[18]，显著提升离子吸附量。

综上所述，比表面积与孔径分布是影响电吸附量的重要因素，即比表面积越大，可提供的离子的吸附位点就越多，孔径尺寸适中，有利于离子的扩散和迁移，从而提高电吸附量。样品 BC-3-800 的比表面积高，孔容大，且孔径在 2~4 nm 的介孔多，所以该样品的脱盐性能最佳。

图 6b 为样品 BC-3-800 在不同电压条件下的脱盐性能。由图 6 可见，随着输入电压的增大，电吸附量上升速率和变化值也随之增大。这是由于电压的增大，两个电极板之间的静电引力增大，导致溶液中离子更倾向于向两侧移动，从而使得电吸附量增大。当电压为 1.6 V 时，吸附量达 18.9 mg/g。与文献[12–13,19–20]报道的材料体系相比，具有成本低、性能优的特点，如表 2 所示。图 6c 是在 1.6 V 电压下对样品 BC-3-800 进行的吸脱附循环测试。在吸附达到平衡后，将电压反接，可以发现电导率快速的升高，表明该材料有较好的脱附性能。在进行 5 次吸脱附循环后，其电吸脱附量仍可达 14 mg/g，表明该材料具有良好的吸脱附性能。

表 2 CDI 碳电极材料的制备方法与性能比较

Table 2 Comparison of preparation methods and properties of capacitive deionization (CDI) carbon electrode materials

Carbon material	Material	Preparation methods	NaCl solution concentration	Applied voltage/V	Electrosorption capacity/(mg·g^{-1})	Reference
Mesoporous carbon	2-methylimidazole, $Zn(NO_3)_2·6H_2O$	Carbonization at 1 000 ℃ in Ar+4%H_2	250 mg/L	1.2	4.8	[19]
Carbon aerogels	Resorcinol, formaldehyde, tetraethyl orthosilicate	Sol–gel condensation and carbonization at 900 ℃ in N_2	500 mg/L	1.4	10.5	[12]
Microporous carbon	Date stone	Carbonization at 900 ℃ in CO_2	10 mol/L	1.2	17.8	[20]
3D graphene	Graphene oxide	Microwave treatment and H_2O_2 hydrothermal method	500 mg/L	1.4	21.6	[13]
Nanoporous carbon	Lignite	KOH activation and carbonization in N_2	150 mg/L	1.6	18.9	This work

3 结论

采用褐煤为原材料，通过 KOH 活化和高温热处理制备得到纳米多孔碳材料。通过改变碱煤比与热处理温度得到结构优良的纳米多孔碳，其比表面积可达 3 135 m^2/g，且具有微孔和介孔。将该纳米多孔碳组装成扣式超级电容器，比电容可达 267 F/g，且 1 000 次循环后比电容保持在 95%以上，循环稳定性好。当输入电压为 1.6 V 时，该材料的电吸附量可达 18.9 mg/g，5 次循环后离子吸脱附仍有 14 mg/g，脱盐稳定性良好。

参考文献:

[1] TIAN S, ZHANG Z, ZHANG X, et al. Capacitive deionization using commercial activated carbon fiber decorated with polyaniline[J]. J Colloid Interf Sci, 2019, 537: 247–255.

[2] LIU Y, NIE C, LIU X, et al. Review on carbon-based composite materials for capacitive deionization[J]. RSC Adv, 2015, 5(20): 15205–15225.

[3] LIU N L, SUN S H, HOU C H. Studying the electrosorption performance of activated carbon electrodes in batch-mode and single-pass capacitive deionization[J]. Sep Purif Technol, 2019, 215: 403–409.

[4] FENG C, CHEN Y A, YU C P, et al. Highly porous activated carbon with multi-channeled structure derived from loofa sponge as a capacitive electrode material for the deionization of brackish water[J]. Chemosphere, 2018, 208: 285–293.

[5] CHEN W, YANG X, HUANG J, et al. Iron oxide containing graphene/carbon nanotube based carbon aerogel as an efficient E-Fenton cathode for the degradation of methyl blue[J]. Electrochim Acta, 2016, 200: 75–83.

[6] AVRAHAM E, NOKED M, BOUHADANA Y, et al. Limitations of charge efficiency in capacitive deionization processes III: The behavior of surface oxidized activated carbon electrodes[J]. Electrochim Acta, 2010, 56(1): 441–447.

[7] DONG Q, WANG G, WU T, et al. Enhancing capacitive deionization performance of electrospun activated carbon nanofibers by coupling with carbon nanotubes[J]. J Colloid Interf Sci, 2015, 446: 373–378.

[8] MA C Y, HUANG S C, CHOU P H, et al. Application of a multiwalled carbon nanotube-chitosan composite as an electrode in the electrosorption process for water purification[J]. Chemosphere, 2016, 146: 113–120.

[9] CHO Y, YOO C Y, LEE S W, et al. Flow-electrode capacitive deionization with highly enhanced salt removal performance utilizing high-aspect ratio functionalized carbon nanotubes[J]. Water Res, 2019, 151: 252–259.

[10] LI Y, QI J, LI J, et al. Nitrogen-doped hollow mesoporous carbon spheres for efficient water desalination by capacitive deionization[J]. ACS Sust Chem Eng, 2017, 5(8): 6635–6644.

[11] LIU P, YAN T, SHI L, et al. Graphene-based materials for capacitive

deionization[J]. J Mater Chem A, 2017, 5(27): 13907–13943.
[12] KUMAR R, GUPTA S S, KATIYAR S, et al. Carbon aerogels through organo-inorganic co-assembly and their application in water desalination by capacitive deionization[J]. Carbon, 2016, 99: 375–383.
[13] DIANBUDIYANTO W, LIU S H. Outstanding performance of capacitive deionization by a hierarchically porous 3D architectural graphene[J]. Desalination, 2019, 468: 114069.
[14] ZHAO J, JIANG Y, FAN H, et al. Porous 3D few-layer graphene-like carbon for ultrahigh-power supercapacitors with well-defined structure-performance relationship[J]. Adv Mater, 2017, 29(11): 1604569.
[15] CHEN W, XIA C, ALSHAREEF H N. Graphene based integrated tandem supercapacitors fabricated directly on separators[J]. Nano Energy, 2015, 15: 1–8.
[16] YANG X, LI C, FU R. Nitrogen-enriched carbon with extremely high mesoporosity and tunable mesopore size for high-performance supercapacitors[J]. J Power Sources, 2016, 319: 66–72.
[17] 贺姗. 胜利褐煤基活性炭的制备及在双电层电容器中的应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
HE Shan. Preparation of activated carbon from Shenli lignite and their application in electric double layer capacitor (in Chinese, dissertation). Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2017.
[18] RUFFORD T E, HULICOVA-JURCAKOVA D, KHOSLA K, et al. Microstructure and electrochemical double-layer capacitance of carbon electrodes prepared by zinc chloride activation of sugar cane bagasse[J]. J Power Sources, 2010, 195(3): 912–918.
[19] GAO T, LI H, ZHOU F, et al. Mesoporous carbon derived from ZIF-8 for high efficient electrosorption[J]. Desalination, 2019, 451: 133–138.
[20] REZMA S, ASSAKER I B, CHTOUROU R, et al. Microporous activated carbon electrode derived from date stone without use of binder for capacitive deionization application[J]. Mater Res Bull, 2019, 111: 222–229.

※　※　※　※　※　※　※　※　※　※　※



赵春霞，武汉理工大学材料科学与工程学院教授。先后主持和参与国家自然科学基金、国家自然科学基金国际合作、国家重点研发计划项目及其他科研课题 14 项。在国内外学术刊物上发表 SCI 收录学术论文 45 篇。主要研究方向为新型多孔功能材料的制备、结构调控及物化特性研究，面向能源和环境应用的关键材料。



杨勇，武汉理工大学材料工程硕士研究生，研究方向为新型廉价电极材料及其在电容脱盐方面的应用。所在课题组研究项目包括：微纳孔结构钼氧化物/碳复合电极材料的制备与储能研究、新型多孔碳基纳米结构超级电容器电极材料的构筑与输运、纳米氧化物改性有序多孔碳及其储能研究等。