

# 废弃 D001 树脂衍生多孔炭材料及其在电容去离子脱盐中的应用

曹 蕾<sup>1,3,4,5</sup>, 李 云<sup>2</sup>, 蒋永伟<sup>1,3,4,5</sup>, 甘 玲<sup>1,3,4,5</sup>, 周田恬<sup>2</sup>,  
张心怡<sup>2</sup>, 宋海欧<sup>2</sup>, 葛夏菁<sup>1,3,4,5</sup>, 栗文明<sup>1,3,4,5</sup>, 周君薇<sup>5</sup>

(1.江苏省环境工程技术有限公司,江苏 南京 210036)

(2.南京师范大学环境学院,江苏 南京 210023)

(3.江苏省工业园区规范化建设及智慧化管控工程研究中心,江苏 南京 210036)

(4.江苏省重点行业减污降碳协同控制工程研究中心,江苏 南京 210036)

(5.江苏省环保集团有限公司,江苏 南京 210036)

[摘要] 电容去离子技术(CDI)作为一种新型的电化学除盐技术,具有能耗低、环境友好、无二次污染等优点.以 D001 树脂作为碳源,KOH 作为活化剂,通过化学活化法制备 D001 树脂衍生多孔炭.研究表明,活化温度对 D001 树脂衍生多孔炭的形貌结构、电化学和脱盐特性有显著影响. D001-800 具有较大的比表面积( $3\,328.25\text{ m}^2/\text{g}$ )、良好的分级结构,在  $100\text{ mg/L}$  的 NaCl 溶液及  $1.6\text{ V}$  的操作电压下,该电极的盐吸附量为  $11.08\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . 这项研究为废弃 D001 树脂的资源化利用提供了路径.

[关键词] 电容去离子,D001 树脂,衍生多孔炭,脱盐

[中图分类号]TQ127.11 [文献标志码]A [文章编号]1001-4616(2025)01-0119-08

## Waste D001 Resin-Derived Porous Carbon Material and Its Application in Capacitive Deionization Desalination

Cao Lei<sup>1,3,4,5</sup>, Li Yun<sup>2</sup>, Jiang Yongwei<sup>1,3,4,5</sup>, Gan Ling<sup>1,3,4,5</sup>, Zhou Tiantian<sup>2</sup>, Zhang Xinyi<sup>2</sup>,  
Song Haiou<sup>2</sup>, Ge Xiajing<sup>1,3,4,5</sup>, Li Wenming<sup>1,3,4,5</sup>, Zhou Junwei<sup>5</sup>

(1.Jiangsu Provincial Environmental Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing 210036, China)

(2.School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(3.Jiangsu Province Engineering Research Center of Standardized Construction and Intelligent Management of Industrial Parks, Nanjing 210036, China)

(4.Jiangsu Province Engineering Research Center of Synergistic Control of Pollution and Carbon Emissions in Key Industries, Nanjing 210036, China)

(5.Jiangsu Provincial Environmental Protection Group Co., Ltd., Nanjing 210036, China)

**Abstract:** Capacitive deionization (CDI) is a novel technology for the desalination of brackish water, which has the advantages of low energy consumption, environment-friendly and no secondary pollution. D001 resin-derived porous carbon was prepared by KOH activation using D001 resin as carbon precursor. The results showed that the activation temperature had a significant effect on the morphology, structure, electrochemical and desalination behavior of D001 resin-derived porous carbon. D001-800 possessed a large specific surface area ( $3\,328.25\text{ m}^2/\text{g}$ ) and hierarchical pore structure. In the CDI tests, the highest electrosorption capacity of  $11.08\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  was achieved by D001-800 in a  $100\text{ mg/L}$  NaCl solution at  $1.6\text{ V}$ . This study can provide a path for the sustainable utilization of waste D001 resin.

**Key words:** capacitive deionization, D001 resin, derived porous carbon, desalination

水资源短缺是全球日益关注的问题之一<sup>[1-3]</sup>. 全球水资源中海水占比约为 97.5%,但由于海水中盐度较高,不适合直接饮用,在《海水淡化利用发展行动计划(2021—2025 年)》中,明确指出推进海水淡化规

收稿日期:2023-10-16.

基金项目:江苏省重点研发社会发展面上项目(BE2021720)、江苏省环保集团科研项目(JSEP-TZ-2021-1001-RE).

通讯作者:宋海欧,博士,教授,博士生导师,研究方向:毒害污染物的去除与资源化. E-mail: songhaiou2011@126.com; 甘玲,硕士,研究方向:水中毒害污染物的去除. E-mail: ganlinggl@163.com

模化利用是重要任务<sup>[4-5]</sup>. 传统反渗透、电渗析、膜蒸馏等能源密集型水处理工艺存在能耗高、成本高、操作复杂及二次污染等问题,不断开发经济、高效、新型脱盐技术成为研究焦点<sup>[6]</sup>.

电容去离子技术(capacitive deionization, CDI)具有能耗低、成本低、无二次污染的特点,是一种具有前景的咸水处理技术<sup>[7-8]</sup>. CDI 是基于双电层原理,完成脱盐并实现电极再生<sup>[9]</sup>. 电极材料的特性与电吸附性能紧密相关<sup>[10]</sup>. 碳材料是开发和制造电吸附电极的首选材料<sup>[11-12]</sup>,早期由不可再生的石油和煤炭衍生而成,合成过程通常需要恶劣和能源密集型条件,造成环境污染<sup>[12]</sup>. 离子交换树脂属于交联聚合物材料,常用于水处理领域<sup>[13-14]</sup>,吸附饱和后,再生性能较差,不适宜继续使用<sup>[15]</sup>. 离子交换树脂碳含量高,具有丰富的孔隙结构,将废弃的离子交换树脂作为碳前驱体制成活性炭材料,可为其持续利用提供路径<sup>[16-17]</sup>. 如,He 等<sup>[18]</sup>将微孔和大孔两类阳离子交换树脂作为前驱体制备活性炭球,所得活性炭球表现出优异的 CO<sub>2</sub> 吸附性能;Shi 等<sup>[19]</sup>将废弃的离子交换树脂制备成活性炭,并将其应用于去除水体中的多环芳烃.

本文以 D001 树脂作为碳前体,通过 KOH 活化,研究不同活化温度对材料性能的影响,并通过一系列物化表征对材料性能进行测试,探究其在电吸附中的脱盐性能.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

D001 树脂购自心悦华美实验室用品企业店, KOH、NaOH、NaCl 购自国药集团化学试剂有限公司,无水乙醇购自南京化学试剂股份有限公司. 所用试剂均为分析纯,未经过二次处理.

### 1.2 材料制备

#### 1.2.1 D001-*x* 制备

先用索氏提取器乙醇加热回流清洗 D001 树脂 10 h,洗脱完 D001 树脂用去离子水加热将乙醇洗净,再分别用 5% 的盐酸、5% 的 NaOH、5% 的盐酸、去离子水清洗,至悬浮液中性;将 D001 树脂滤出,在 80 °C 下鼓风干燥过夜;将材料以 5 °C/min 的升温速率、450 °C 时在管式炉中炭化 1 h;炭化完的树脂与 KOH 按照 1:3 的比例混合,以 5 °C/min 的升温速率活化 1 h;活化结束得到的材料用 1 mol/L 盐酸清洗过夜,去离子水清洗溶液至中性. 材料命名为 D001-*x* (*x* 表示活化温度).

#### 1.2.2 电极制备

称取一定质量的活性材料和聚四氟乙烯(PTFE)粘结剂,两者质量比为 1:1. 加入少量的乙醇将两者充分混合,混合物自然风干至成型,压制在石墨纸上,压制好的电极片在 80 °C 烘干过夜.

### 1.3 测试与表征

通过扫描电子显微镜(SEM)观察样品的表面形貌;利用比表面积及孔隙度分析仪分析材料的比表面积和孔隙;利用 X 射线衍射(XRD)和激光拉曼光谱仪分析材料的石墨晶面和石墨化程度;利用 X 射线光电子能谱(XPS)分析元素种类.

使用电化学工作站(Biologic SP-150)测定电化学性能,包括循环伏安法(CV)、恒流充放电(GCD)和电化学阻抗谱(EIS)测量. 这些测试是在 0.5 mol/L NaCl 电解质中使用传统的三电极电池进行的,其中制备的材料、Pt 和饱和甘汞电极分别用作工作电极、对电极和参比电极.

材料比电容计算公式如下:

$$C_{cv} = \frac{\int IdV}{2mv\Delta V},$$

式中,  $C_{cv}$  是比电容(F/g),  $\int IdV$  是 CV 曲线积分的面积,  $m$  是活性材料的质量(g),  $v$  是扫描速率(mV/s),  $\Delta V$  是电压窗口(V).

为了进一步探究 D001-*x* 活性炭材料的比电容和倍率性能,在 0.5 A/g 的电流密度下进行了恒流充放电(GCD)测试. 利用恒流充放电的公式计算材料比电容,公式如下:

$$C_{GCD} = \frac{I_D \Delta t}{2m\Delta V},$$

式中,  $C_{GCD}$  是比电容(F/g),  $I_D$  是放电电流(A),  $\Delta t$  是放电时间(s).

EIS 可用于评估电极的电导率,在 0.01~100 kHz 的频率范围内进行测量。

电吸附脱盐测试系统,主要配件包括 CDI 模块、直流电源、在线电导率测试仪、蠕动泵、水管。在脱盐实验中,以一定的流速将 100 mL NaCl 溶液泵入 CDI 模块中,并在吸附过程中通过直流电源施加恒定电压。为了观察溶液的实时电导率,使用在线电导率仪记录溶液每 2 min 的电导率。

用电吸附脱盐量(salt adsorption capacity, SAC,  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )和电吸附脱盐速率(salt adsorption rate, SAR,  $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$ )来评价其脱盐性能的优劣。公式如下:

$$\text{SAC} = \frac{(C_0 - C_t)V}{m},$$

$$\text{SAR} = \frac{\text{SAC}}{t},$$

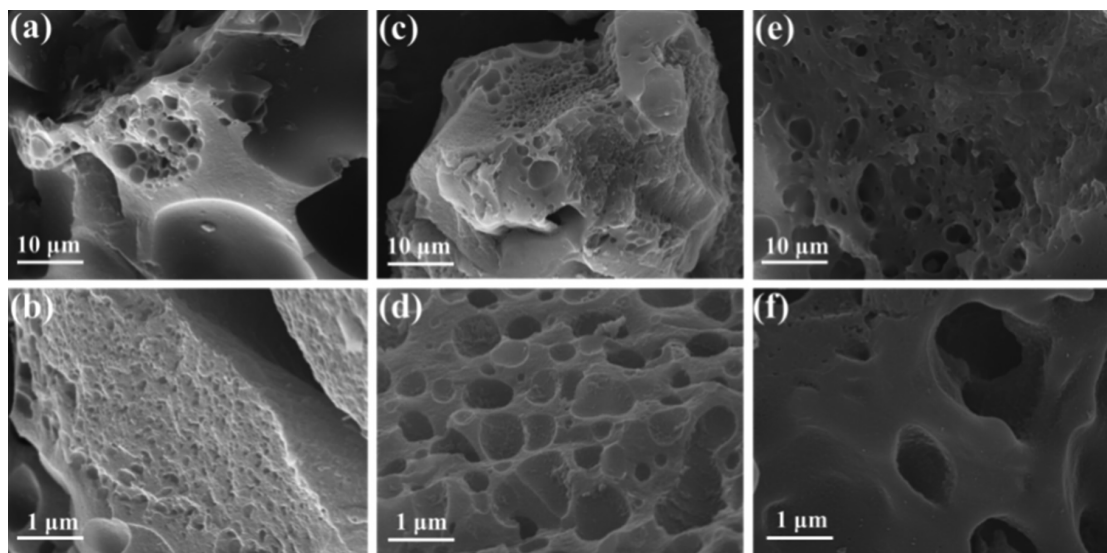
式中,  $C_0$  是原始 NaCl 浓度,  $C_t$  是平衡的 NaCl 浓度,  $V$  是进料溶液的总体积 (mL),  $m$  是活化物质的总质量 (g),  $t$  是吸附过程的时间。

## 2 结果与讨论

### 2.1 形貌与结构分析

#### 2.1.1 电极表面形貌

通过扫描电子显微镜观察电极材料的表面形貌。由图 1 可以看出,活化后 3 种材料均显示明显的孔隙结构,这主要是由于炭化物在高温下与 KOH 发生一系列的化学反应,产生了大量的气体 ( $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$  等),从而扩充了 D001- $x$  的孔隙。D001- $x$  的形貌结构特征有利于电吸附过程中电荷的转移和积累,从而增强电容去离子性能。

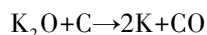
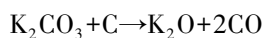
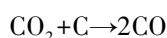
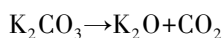
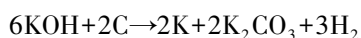


(a)、(b) D001-700; (c)、(d) D001-800; (e)、(f) D001-900

图 1 D001- $x$  的 SEM 图像

Fig. 1 SEM image of D001- $x$

D001- $x$  采用 KOH 作为活化剂,随着活化温度从 700 °C 上升至 900 °C,材料表面的孔隙更为丰富,同时孔隙间相互贯穿<sup>[20]</sup>。KOH 的活化机理如下<sup>[21]</sup>:



D001 树脂与 KOH 反应会生成  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,当温度升高到 700 °C 时,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  会分解生成  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$ 。通过

这一系列的反应可知,在活化过程中,碳会在  $K_2O$  的催化作用下消耗部分生成气体,并且二者还会反应生成  $K$  单质和  $CO$ . 消耗的碳和气体膨胀使碳材料产生大量的孔隙<sup>[22]</sup>. 在高温下,金属单质还会以蒸汽形式进入材料内部穿插,撑开碳原子层之间的空隙,进一步发挥活化作用,产生新孔隙结构. 但温度过高时, D001 树脂衍生多孔炭的孔隙会被破坏.

2.1.2 比表面积与孔径分析

图 2(a)为 D001- $x$  的氮气吸脱附曲线,3 种材料都显示出 IV 型吸附-解吸等温线. 在低压区,氮气的吸附量显著增加,说明材料存在大量微孔;在高压区有明显的滞后回线,说明存在介孔吸附行为<sup>[23]</sup>. 根据 BJH 孔径分布曲线(图 2(b)), D001- $x$  在 1~3 nm 范围内显示出高强度峰,在 3~100 nm 仍有一定的分布,表明材料具备分级多孔结构<sup>[24]</sup>.

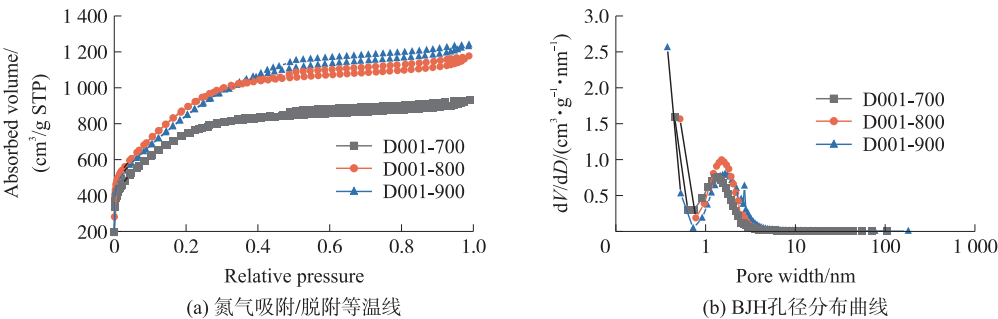


图 2 D001- $x$  的氮气吸附/脱附等温线和 BJH 孔径分布曲线

Fig. 2 Nitrogen adsorption/desorption isotherm and BJH pore size distribution curves of D001- $x$

表 1 总结了 D001- $x$  的比表面积和孔体积. D001-800 的比表面积最大,为  $3\,328.25\text{ m}^2/\text{g}$ . 温度达到  $900\text{ }^\circ\text{C}$  时,材料平均孔径增加,主要是高温下活化剂与碳材料之间反应更为剧烈导致的结果. D001-900 比表面积相对减小,说明过渡刻蚀导致材料孔隙的坍塌. D001-800 最大的比表面积可以提供更多的离子位点,分级的孔径分布有利于离子的迁移<sup>[25]</sup>.

表 1 D001- $x$  电极的比表面积和孔结构参数

Table 1 Specific surface area and pore structure parameters of D001- $x$  electrode

Samples	$S_{\text{BET}}/(\text{m}^2/\text{g})$	$V_{\text{total}}/(\text{cm}^3/\text{g})$	$d/\text{nm}$
D001-700	2 753.87	1.44	2.09
D001-800	3 328.25	1.82	2.19
D001-900	3 123.69	1.92	2.46

2.1.3 拉曼和 XRD 分析

利用 XRD 分析了 D001- $x$  的晶体结构,如图 3(a)所示,2 个明显的衍射峰分别位于  $\sim 26^\circ$  和  $\sim 43^\circ$ ,分别对应于石墨晶格的(002)和(100)平面,表明所有样品都具有明显的无定形特征<sup>[26]</sup>. 随着温度的升高,2 个衍射峰越发尖锐,说明结晶度越好. 在  $1\,350$  和  $1\,580\text{ cm}^{-1}$  处观察到的 2 个不同的峰,分别对应炭材料的 D 波段和 G 波段. D 波段与无序的碳质结构有关,而 G 波段与有序的石墨结构有关. Raman 曲线(图 3(b))表明,随着活化温度的升高,材料演变成有序的石墨结构<sup>[27]</sup>.

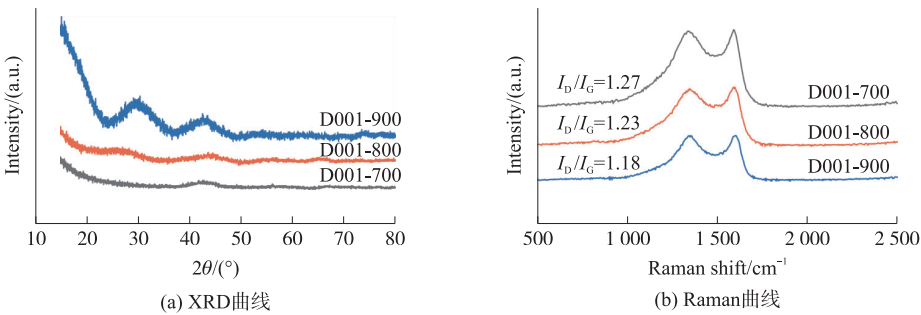


图 3 D001- $x$  的 XRD 和 Raman 曲线

Fig. 3 XRD and Raman curves of D001- $x$

2.1.4 XPS 分析

利用 XPS 分析了材料的元素组成,如图 4 所示. D001- $x$  均含有  $C$ 、 $N$ 、 $O$  3 种元素,都可以分解为 4 个特征峰. D001-800 的  $C\,1s$  在  $284.8$ 、 $285.9$ 、 $288.6$ 、 $290.8\text{ eV}$  处出现了 4 个不同的峰,按照结合能由低到高,



分别对应 C—C/C—H、C—O、C=O 和 O=C—O。D001-800 的 N 1s 光谱分为 4 个不同的峰,分别位于 398.8、400.1、401.0 和 402.2 eV,分别对应吡啶氮(Pyridinic-N)、吡咯氮(Pyrrolic-N)、石墨氮(Graphitic-N)和氧化氮(Oxidized-N)<sup>[28]</sup>。D001-800 的 O 1s 光谱分为 3 个不同的峰,分别位于 531.9、533.1 和 535.3 eV,分别对应—C=O、C—OH/C—O—C 和—COOH 基团的特征峰。在 D001-800 材料中,较多含氧基团的存在可以提供良好的亲水性,进而使离子更好地吸附在材料表面,改善材料的电吸附性能<sup>[29]</sup>。

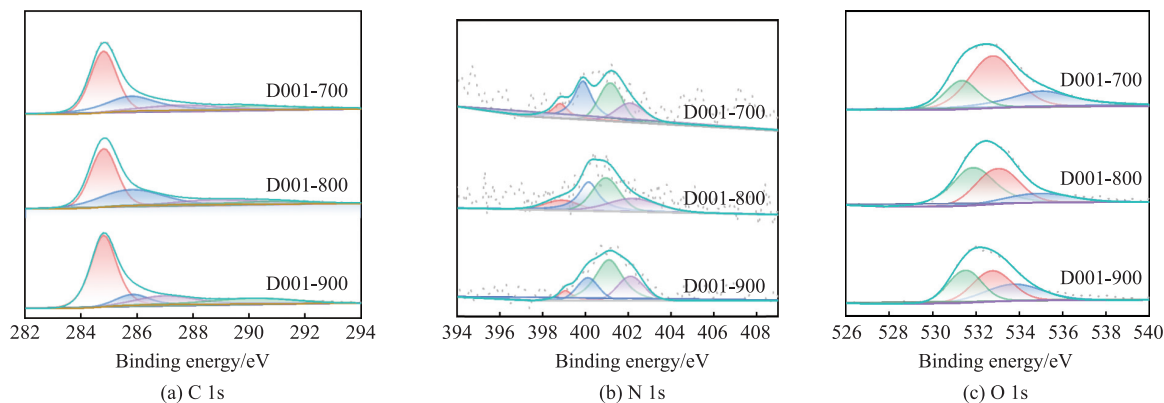


图 4 D001-x 的高分辨率 XPS 图谱

Fig. 4 High-resolution XPS spectra of D001-x

## 2.2 电化学分析

利用 CV、GCD 和 EIS 进一步评价了 D001-x 电极的电化学性能,如图 5 所示。3 种材料的 CV 曲线在 -0.4~0.6 V 的电位窗口中均显示准矩形形状,没有氧化还原峰,表明所有材料的电化学电容主要由电化学双层电容行为决定<sup>[30]</sup>。D001-800 的 CV 积分面积最大,经过计算,D001-800 的比电容为 143.2 F/g,大于 D001-700(101.3 F/g)和 D001-900(118.9 F/g)。在 GCD 曲线中,D001-800 显示出对称三角形,其放电时间最长,进一步验证了 D001-800 具有最大的比电容<sup>[31]</sup>。GCD 曲线的转折点有轻微的电位下降(IR drop),IR 值与离子扩散过程、活化材料的内阻和孔道中离子迁移率的欧姆电阻有关<sup>[32]</sup>。D001-800 的 IR 值最小,说明在低频区表现出最大的曲线斜率,其离子扩散阻力最低<sup>[33]</sup>。经过 ZView 拟合,得出 3 种材料的电荷转移电阻  $R_{ct}$ ,如表 2 所示。D001-800 的电荷转移电阻为 2.76  $\Omega$ ,相对较小的电阻有助于其出色的电容性能。

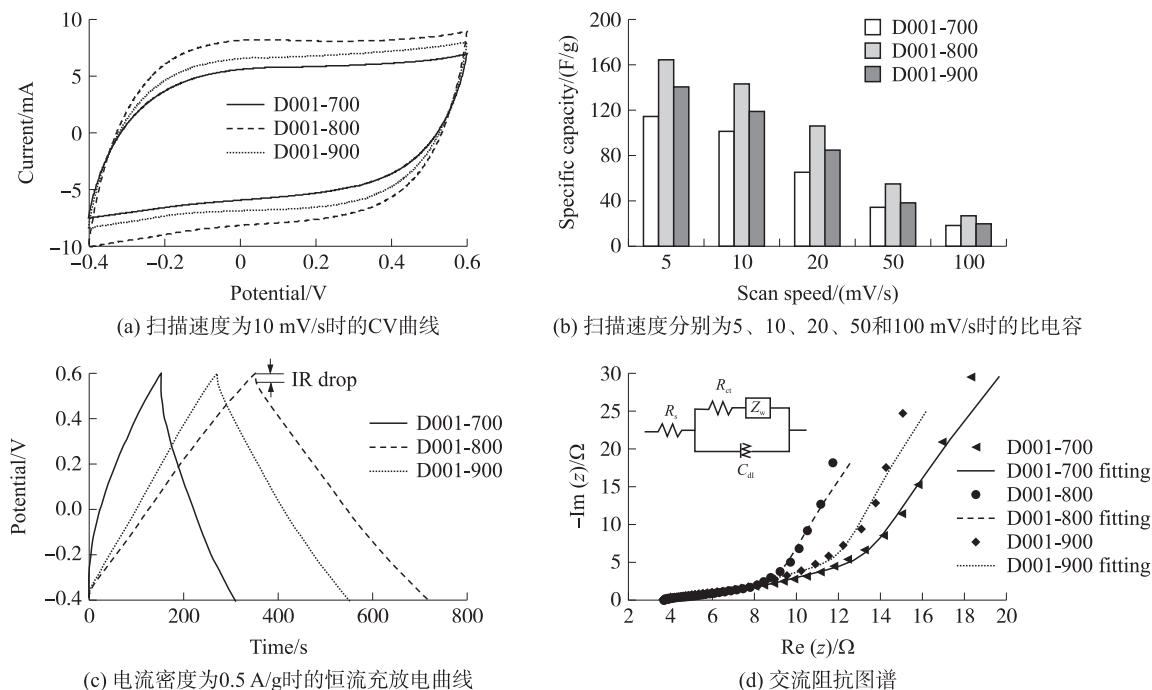


图 5 D001-x 的电化学表征曲线

Fig. 5 Electrochemical characterization curve of D001-x

表 2 D001-x 的电化学性能

Table 2 Electrochemical performance of D001-x

Sample	D001-700	D001-800	D001-900	Sample	D001-700	D001-800	D001-900
$C_{\text{cv}}/(F/g)$	101.34	143.18	118.89	$R_s/\Omega$	3.74	3.63	3.59
$R_{\text{ct}}/\Omega$	4.80	2.76	3.46	IR drop/V	0.18	0.14	0.16

注:扫描速度为 10 mV/s,电流密度为 0.5 A/g.

2.3 脱盐性能测试

在体积为 100 mL、浓度为 100 mg/L 的 NaCl 溶液中,控制电压为 1.6 V,流速为 14 mL/min,使用对称电极测试 D001-x 的 CDI 性能(图 6). 在 12 min 时,电极吸附达到饱和. D001-800 吸附量最大,达到 11.08 mg·g<sup>-1</sup>,同时其具有最快的吸附速率. D001-800 最优的脱盐性能归因于其较大的表面积、分级的孔隙结构以及良好的电化学行为.

2.3.1 电压影响

为了探究 D001-800 的 CDI 性能,进一步研究了不同工作参数(如外加电压和初始 NaCl 浓度)的影响. 图 7(a)为在 100 mg/L NaCl 溶液中施加不同电压获得的 D001-800 的吸附曲线. 当施加电压为 0.8、1.2 和 1.6 V 时,最终 SAC 值分别为 2.27、5.97 和 11.08 mg·g<sup>-1</sup>,因为在较高电压下更强的静电力会增加电吸附能力<sup>[34]</sup>. 此外,还通过建立 SAC 和 SAR 之间的关系来评估 CDI 特性,从而获得了 Ragone 曲线. 通常,曲线位置越在右上方区域,意味着材料的 CDI 性能越好<sup>[35]</sup>. 图 7(b)中,D001-800 在施加 1.6 V 的电压时,曲线位于该区域的右上角,表明它具有最高的 SAC 和最快的 SAR,其中 SAR 达到 1.123 mg·g<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>.

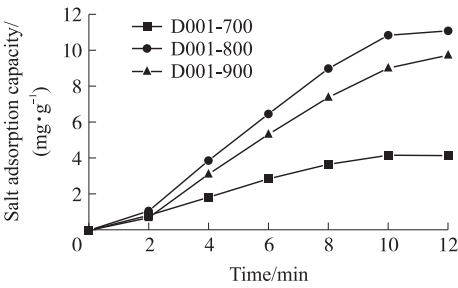


图 6 D001-x 的脱盐量随时间变化曲线

Fig. 6 D001-x desalination curve with time

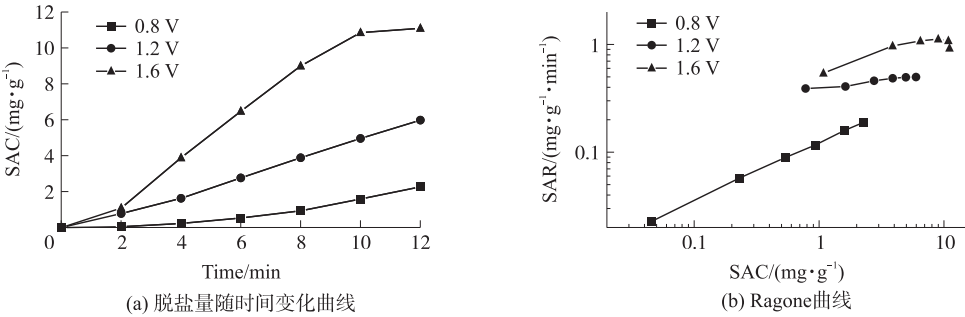


图 7 D001-800 在不同电压下的脱盐量随时间变化曲线和 Ragone 曲线

Fig. 7 Desalination curve with time and Ragone curve at different voltages for D001-800

2.3.2 溶液浓度影响

图 8(a)为 D001-800 在 1.6 V 电压下在不同初始浓度的 NaCl 溶液中的吸附曲线. 在浓度为 25、50、100、150 和 200 mg/L NaCl 溶液中,在 12 min 时 SAC 值分别为 1.89、2.96、11.08、11.73 和 10.93 mg·g<sup>-1</sup>. Ragone 曲线(图 8(b))显示,随着 NaCl 浓度的增加,曲线向右上边界移动,但是当浓度增加到 200 mg/L 时,脱盐量反而降低,说明电极在该浓度下达到饱和状态.

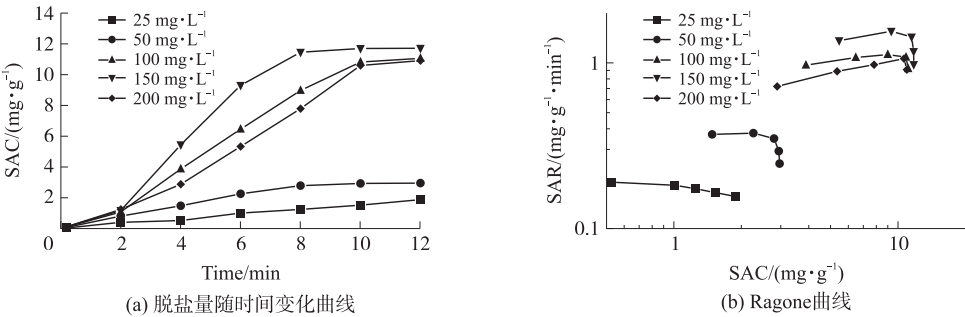


图 8 D001-800 在不同浓度下的脱盐量随时间变化曲线和 Ragone 曲线

Fig. 8 Desalination curve with time and Ragone curve at different concentrations for D001-800

### 3 结论

以 D001 树脂为前驱体,成功制备了 D001 树脂衍生多孔炭. 活化温度对所制备的碳材料的性能有显著影响,KOH 作为活化剂与碳材料在高温下刻蚀形成大量孔隙. 其中,D001-800 具有较高的比表面积 ( $3\,328.25\text{ m}^2/\text{g}$ ),孔隙结构丰富,不仅提供了更多的活性位点,而且加速了离子扩散. D001-800 在  $1.6\text{ V}$  的  $100\text{ mg/L NaCl}$  溶液中脱盐量达到  $11.08\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . 该材料作为一种电吸附电极材料,有望在电容去离子脱盐中得到应用.

#### [参考文献]

- [1] SCANLON B R,FAKHREDDINE S,RATEB A,et al. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future[J]. Nature reviews earth & environment,2023,4(2):87–101.
- [2] KATTEL G R. State of future water regimes in the world's river basins:balancing the water between society and nature[J]. Critical reviews in environmental science and technology,2019,49(12):1107–1133.
- [3] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science,2006,313(5790):1068–1072.
- [4] EKE J, YUSUF A,GIWA A,et al. The global status of desalination:an assessment of current desalination technologies,plants and capacity[J]. Desalination,2020,495:114633.
- [5] IHSANULLAH I,ATIEH M A,SAJID M,et al. Desalination and environment:a critical analysis of impacts,mitigation strategies, and greener desalination technologies[J]. Science of the total environment,2021,780:146585.
- [6] AHMED F E, KHALIL A, HILAL N. Emerging desalination technologies: current status, challenges and future trends[J]. Desalination,2021,517:115183.
- [7] XING W, LIANG J, TANG W, et al. Versatile applications of capacitive deionization (CDI)-based technologies [J]. Desalination,2020,482:114390.
- [8] ZHAO R,PORADA S,BIESHEUVEL P M,et al. Energy consumption in membrane capacitive deionization for different water recoveries and flow rates,and comparison with reverse osmosis[J]. Desalination,2013,330:35–41.
- [9] SUSS M E,PORADA S,SUN X,et al. Water desalination via capacitive deionization:what is it and what can we expect from it? [J]. Energy & environmental science,2015,8(8):2296–2319.
- [10] PORADA S, ZHAO R, WAL A J V, et al. Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization[J]. Progress in materials science,2013,58(8):1388–1442.
- [11] OREN Y. Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment: past, present and future (a review) [J]. Desalination,2008,228:10–29.
- [12] WANG Y,ZHANG M,SHEN X,et al. Biomass-derived carbon materials:controllable preparation and versatile applications[J]. Small,2021,17(40):e2008079.
- [13] PARVAZINIA M,GARCIA S,MAROTO-VALER M. CO<sub>2</sub> capture by ion exchange resins as amine functionalised adsorbents[J]. Chemical engineering journal,2018,331:335–342.
- [14] RENGARAJ S,JOO C K,KIM Y,et al. Kinetics of removal of chromium from water and electronic process wastewater by ion exchange resins:1200H,1500H and IRN97H[J]. Journal of hazardous materials,2003,102(2):257–275.
- [15] HAN S,ZANG Y,GAO Y,et al. Co-monomer polymer anion exchange resin for removing Cr(VI) contaminants:adsorption kinetics,mechanism and performance[J]. Science of the total environment,2020,709:136002.
- [16] 安丽花,张会涛,王德周,等. 不同离子交换树脂制备球形活性炭[J]. 山西化工,2023,43(6):12–14.
- [17] 史宸菲. 树脂基磁性活性炭的制备及其对水源水中典型污染物的去除研究[D]. 南京:南京大学,2014.
- [18] HE P,HAW K G,YAN S,et al. Carbon beads with a well-defined pore structure derived from ion-exchange resin beads[J]. Journal of materials chemistry A,2019,7(31):18285–18294.
- [19] SHI Q,LI A,ZHU Z,et al. Adsorption of naphthalene onto a high-surface-area carbon from waste ion exchange resin[J]. Journal of environmental sciences,2013,25(1):188–194.
- [20] SILVA A P,ARGONDIZO A,JUCHEN P T,et al. Ultrafast capacitive deionization using rice husk activated carbon electrodes[J]. Separation and purification technology,2021,271:118872.
- [21] WU J,WANG T,LIU Y,et al. Norfloxacin adsorption and subsequent degradation on ball-milling tailored N-doped biochar[J].

- Chemosphere, 2022, 302:135264.
- [22] LILLO-RODENAS M A, CAZORLA-AMOROS D, LINARES-SOLANO A. Understanding chemical reactions between carbons and NaOH and KOH: an insight into the chemical activation mechanism[J]. Carbon, 2003, 41:267–275.
- [23] ZHANG H, WANG C, ZHANG W, et al. Nitrogen, phosphorus co-doped eave-like hierarchical porous carbon for efficient capacitive deionization[J]. Journal of materials chemistry A, 2021, 9(21):12807–12817.
- [24] ZHANG P, LI J, CHAN-PARK M B. Hierarchical porous carbon for high-performance capacitive desalination of brackish water[J]. ACS sustainable chemistry & engineering, 2020, 8(25):9291–9300.
- [25] WEI X, LI X, LV C, et al. Hierarchically yolk-shell porous carbon sphere as an electrode material for high-performance capacitive deionization[J]. Electrochimica acta, 2020, 354:136590.
- [26] MOHAMED S K, ABUELHAMD M, ALLAM N K, et al. Eco-friendly facile synthesis of glucose-derived microporous carbon spheres electrodes with enhanced performance for water capacitive deionization[J]. Desalination, 2020, 477:114278.
- [27] LI L, ZHANG L, XU Z, et al. Hierarchically porous carbons fabricated by dual pore-forming approach for the oxygen reduction reaction[J]. Carbon, 2022, 189:634–641.
- [28] 周宜蓓. 生物质纳米碳基材料的构建及电容性能研究[D]. 成都:四川师范大学, 2019.
- [29] 许可. 利用秸秆制备多孔碳电极电化学吸附水中的盐离子[D]. 哈尔滨:黑龙江大学, 2020.
- [30] XIE K, YU J, ZHANG X, et al. Capacitive desalination of a low concentration aqueous sodium chloride solution based on a  $\text{SnO}_2$  and polystyrene co-functionalized graphene oxide electrodes[J]. Chemical engineering journal, 2021, 414:128747.
- [31] JAIN A, GHOSH M, KRAJEWSKI M, et al. Biomass-derived activated carbon material from native European deciduous trees as an inexpensive and sustainable energy material for supercapacitor application[J]. Journal of energy storage, 2021, 34:102178.
- [32] CUONG D V, WU P C, LIU N L, et al. Hierarchical porous carbon derived from activated biochar as an eco-friendly electrode for the electrosorption of inorganic ions[J]. Separation and purification technology, 2020, 242:116813.
- [33] HUO S, NI W, SONG X, et al. Insight from the synergistic effect of dopant and defect interplay in carbons for high-performance capacitive deionization[J]. Separation and purification technology, 2022, 281:119807.
- [34] HU X, MIN X, LI X, et al.  $\text{Co}@\text{Co}_3\text{O}_4$  encapsulated in nitrogen-doped carbon nanotubes for capacitive desalination: effects of nano-confinement and cobalt speciation[J]. Journal of colloid and interface science, 2022, 616:389–400.
- [35] LI Y, QI J, LI J, et al. Nitrogen-doped hollow mesoporous carbon spheres for efficient water desalination by capacitive deionization[J]. ACS sustainable chemistry & engineering, 2017, 5(8):6635–6644.

[责任编辑:丁 蓉]