

氮掺杂碳的制备及其在电容去离子性能的研究

刘曼玲, 杨娟*

武汉工程大学化学与环境工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年4月2日; 录用日期: 2026年5月1日; 发布日期: 2026年5月12日

摘要

以三聚氰胺-甲醛树脂微球为前驱体, 通过高温热解制备了氮掺杂多孔碳(NC)电极材料, 并系统研究了其微观结构、电化学性能及CDI脱盐性能。采用扫描电子显微镜、透射电子显微镜、X射线衍射等手段对NC的形貌和结构进行了表征。将NC制备的电极在1 M NaCl溶液中进行电化学测试, 在1 mV·s⁻¹时, 其比电容达到113.8 F·g⁻¹; 在1 A·g⁻¹电流密度下比电容达154.9 F·g⁻¹, 具有良好的倍率性能。在500 mg·L⁻¹ NaCl溶液中、1.0 V工作电压下, NC电极的盐吸附容量达到21.48 mg·g⁻¹, 并展现出优异的循环稳定性(37次循环后的容量保持率为84.2%)。本研究为开发低成本、高性能的碳基CDI电极材料提供了新思路。

关键词

三聚氰胺-甲醛树脂, 碳材料, 电容去离子, 电化学

Study on Preparation of Nitrogen-Doped Carbon and Its Performance in Capacitive Deionization

Manling Liu, Juan Yang*

School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: April 2, 2026; accepted: May 1, 2026; published: May 12, 2026

Abstract

Nitrogen-doped porous carbon (NC) electrode materials were prepared by high-temperature pyrolysis using melamine-formaldehyde resin microspheres as precursors. The microstructure, electrochemical properties, and capacitive deionization (CDI) desalination performance of NC were

*通讯作者。

systematically investigated. The morphology and structure of NC were characterized by scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM), and X-ray diffraction (XRD). Electrochemical tests were conducted on the NC electrodes in 1 M NaCl solution. A specific capacitance of $113.8 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ was achieved at a scan rate of $1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$, and a specific capacitance of $154.9 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ was obtained at a current density of $1 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$, indicating good rate capability. When tested in $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl solution at an operating voltage of 1.0 V, the NC electrode exhibited a salt adsorption capacity of $21.48 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and excellent cycling stability, with a capacity retention of 84.2% after 37 cycles. This study provides a new approach for developing low-cost, high-performance carbon-based electrode materials for CDI.

Keywords

Melamine-Formaldehyde Resin, Carbon Materials, Capacitive Deionization, Electrochemistry

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当今世界上仍有 22 亿人无法获得清洁饮用水[1]。面对如此严峻的形势,海水淡化和废水处理技术受到越来越多的关注,例如传统的反渗透和电渗析[2]。电容去离子(Capacitive Deionization, CDI)作为一种新兴的电化学水处理技术,因其能耗低、操作简便、无二次污染等优势,在低浓度盐水淡化领域展现出巨大的应用潜力[3][4]。该技术通过在电极两侧施加电压形成电场,驱动溶液中的离子向相反电荷的电极迁移,并通过静电作用吸附于电极/溶液界面,形成电双层(Electrical Double Layers, EDLs),从而实现离子的去除,获得淡水[5]-[7]。

电极材料是决定 CDI 脱盐性能的核心因素。传统的碳材料如活性炭、碳纳米管、石墨烯等因其高比表面积、良好的导电性和化学稳定性而被广泛研究[8][9]。然而,未经修饰的碳材料往往存在亲水性差、比电容有限、电荷效率低等问题,限制了其脱盐容量的进一步提升[10]。杂原子掺杂,尤其是氮掺杂,被认为是改善碳材料电化学性能的有效策略[11]。氮原子的引入可以在碳骨架中产生结构缺陷和活性位点,提高材料的导电性、润湿性和赝电容贡献,从而增强离子吸附能力[12]。

三聚氰胺-甲醛树脂(MF)球是一种富含氮元素的聚合物前驱体,通过高温热解可直接转化为氮掺杂碳材料,且其球形形貌可在热解过程中得到一定程度的保留[13][14]。该方法操作简单、成本低廉,且可通过调节热解条件调控碳材料的孔结构和氮掺杂水平。基于此,本文以自制的 MF 球为前驱体,在惰性气氛下高温热解制备了氮掺杂多孔碳(NC),系统研究了其形貌、结构、电化学性能及 CDI 脱盐性能,并探讨了其脱盐机理。

2. 实验部分

2.1. 材料制备

2.1.1. 三聚氰胺-甲醛树脂微球(MF)的合成

采用缩聚反应制备 MF 微球。将 2.5 g 三聚氰胺加入到 10 mL 甲醛溶液和 200 mL 去离子水的混合溶剂中,在 80°C 油浴中搅拌 15 min 形成均匀的预聚体溶液。随后滴加 0.25 mL 甲酸作为催化剂,继续在 80°C 下搅拌 40 min,使树脂完全交联。反应结束后,离心收集白色固体产物,用去离子水洗涤数次,在

60°C下真空干燥过夜, 得到 MF 微球。

2.1.2. 氮掺杂多孔碳(NC)的制备

将上述 MF 微球置于陶瓷舟中, 在管式炉中于 N₂ 气氛下以 5°C·min⁻¹ 的升温速率加热至 800°C, 保温 2 h, 自然冷却至室温, 得到黑色粉末状氮掺杂多孔碳, 记为 NC。

2.2. 材料表征

采用多种物理表征技术, 对电极材料的晶体结构、微观形貌及表面化学状态进行系统分析, 包括利用 X 射线衍射仪(XRD)分析材料的晶体结构与物相组成, 扫描范围为 5°~90°; 利用场发射扫描电镜(SEM)观察材料微观形貌; 通过透射电子显微镜(TEM)进一步分析材料的内部结构。

2.3. 电化学性能测试

将制备的 NC、导电炭黑和聚偏二氟乙烯(PVDF)按照 8:1:1 的质量比在研钵中研磨充分, 接着滴加少量 N-甲基吡咯烷酮(NMP)后继续研磨得到黑色浆料。随后, 将黑色浆料均匀涂覆在石墨纸基底(1×2 cm, 涂覆面积为 1×1 cm)上, 并在真空干燥箱中 60°C 干燥 12 h。

以涂覆有活性物质的导电碳纸作为工作电极, Ag/AgCl 电极作为参比电极, 铂片电极作为对电极, 1 M NaCl 水溶液为电解液, 采用三电极体系进行循环伏安法(CV)、恒电流充放电法(GCD)等测试。

比电容计算

由 CV 曲线计算的电极的比电容(C_s , F·g⁻¹)如下式(1):

$$C_s = \frac{\int IdV}{2mv\Delta V} \quad (1)$$

公式中, C_s 代表比电容(F·g⁻¹), I 代表响应电流(A), m 代表活性材料的质量(g), v 和 ΔV 分别代表扫描速率(V·s⁻¹)和电压窗口(V)。

由 GCD 曲线计算的电极的比电容(C_v , F·g⁻¹)如下式(2):

$$C_v = \frac{I\Delta t}{m} \quad (2)$$

公式中, I 代表响应电流(A), Δt 代表放电时间(s), m 代表活性材料的质量(g)。

2.4. CDI 脱盐性能测试

脱盐测试采用双电极体系, 以所制备的活性材料和活性炭构成正负电极, 在循环操作模式下, 将 30 mL 浓度为 500 mg·L⁻¹ 的 NaCl 溶液以 10 mL·min⁻¹ 的流速泵入脱盐单元。施加设定电压后, 在密闭环境中通过电导率仪实时监测溶液电导率的变化。通过建立电导率与 NaCl 浓度的校准曲线(见图 1), 将实测电导率换算为溶液浓度, 进而计算盐吸附容量与容量保持率。

2.4.1. 脱盐测试电极的制备

脱盐测试中电极的制备方法与电化学测试中的方法一致。不同的是, 脱盐测试中的电极基底为钛板, 尺寸为 40×40 mm。

2.4.2. 脱盐实验的相关计算

(1) 盐吸附容量(Salt adsorption capacity, SAC)通过如下公式计算:

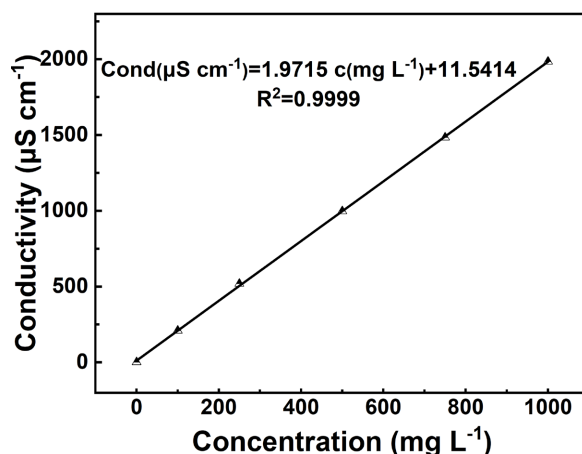


Figure 1. Calibration curve of conductivity variation with NaCl concentration
图 1. 电导率与 NaCl 浓度变化的校准曲线

$$\text{SAC}(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{m} \quad (3)$$

公式中, C_0 和 C_t 代表初始和平衡状态下 NaCl 溶液的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), m 代表活性电极材料的总质量(g), V 代表 NaCl 溶液的体积(L)。

(2) 循环稳定性

在电极材料的性能评价体系中, 循环稳定性是决定其能否满足实际应用要求的关键因素。本研究采用容量保持率(Capacity retention, CR)作为核心指标, 系统评估了各电极材料的循环稳定性能。容量保持率(CR)的计算基于脱盐循环过程中的容量数据, 其定义为:

$$\text{CR} = \left(\frac{\text{SAC}_n}{\text{SAC}_1} \right) \times 100\% \quad (4)$$

其中, SAC_n 代表第 n 次循环测得的脱盐容量, SAC_1 代表第一次循环(初始)的脱盐容量。通常以特定循环次数(如 37 次)后的 CR 值作为材料循环稳定性优劣的直接比较依据。

3. 结果与讨论

3.1. 形貌与结构特征

采用 SEM、TEM 对所制备的 MF 和 NC 的形貌进行表征。由图 2 所示, MF 球具有规则的球形结构, 直径在 300~500 nm 左右, 表面较为粗糙。MF 球在惰性气氛中热解后得到的 NC 仍然能较好的保持球形的结构, 表面较 MF 球光滑, 这一结果与先前文献报道一致[13], 其结构演变可能是由于在 $1^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的慢速升温速率下, MFs 热解产生的小分子气体(如 NH_3 、 CO_2 、 CH_3OH)能够在刚性骨架完全坍塌之前从颗粒内部向外扩散, 从而减小了可能破坏球形形貌的局部压力。

对 NC 进行了 XRD 表征, 由图 3 可见, 在 26.5° 处存在宽的衍射峰, 对应于碳的(002)晶面, 这表明 MF 球已经完全碳化。

3.2. 电化学性能

电化学性能是评估 CDI 电极材料性能好坏的指标之一。为了深入理解 NC 在电化学反应过程中的

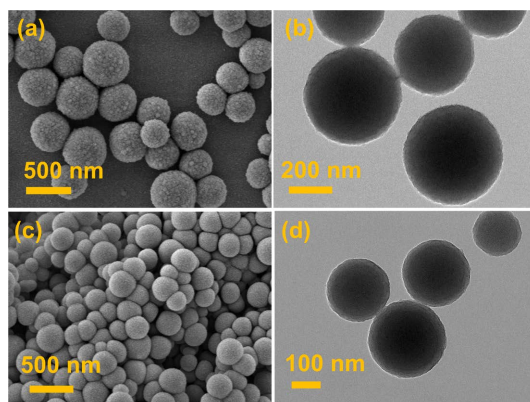


Figure 2. SEM and TEM images of MF (a), (b) and NC (c), (d)
图 2. (a), (b) MF 和(c), (d) NC 的 SEM 和 TEM 图

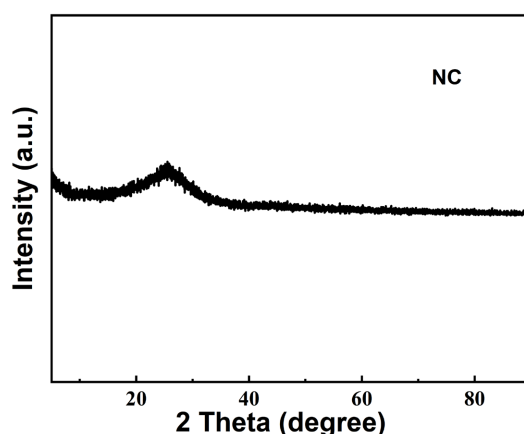


Figure 3. XRD pattern of NC
图 3. NC 的 XRD 图谱

电化学行为, 在 $-0.6\sim 0.8$ V (相对于 Ag/AgCl)的电位窗口下, 采用三电极体系, 并以 1 M NaCl 溶液作为电解质溶液, 对所有材料进行 CV 测试。图 4(a)是 NC 电极在不同扫描速率下的 CV 曲线。所有曲线均呈现近似矩形形状, 且无明显氧化还原峰, 表明 NC 电极的电荷存储机制以双电层电容为主。随着扫描速率从 $1\text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加至 $50\text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$, 曲线仍保持良好的矩形形状, 说明电极具有良好的倍率性能和电化学可逆性。根据公式(1)计算得到的不同扫描速率下的比电容(图 4(b))。在 $1\text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 比电容达到 $113.8\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$; 当扫描速率升至 $50\text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 时比电容为 $28.57\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ 。比电容均随扫描速率升高而降低, 这是由于在高扫描速率下离子扩散时间受限, 难以充分进入电极材料内部, 导致活性位点利用不充分; 而在低扫描速率下, 离子可充分扩散, 比电容相应增大。

同时, 在三电极体系中, 以 1 M NaCl 溶液作为电解质溶液, 对 NC 进行 GCD 测试。由(图 4(c))所示, NC 电极在 $1, 2, 5, 8, 10\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 的电流密度下的所有曲线均呈现对称的三角形形状, 充放电平台不明显, 进一步证实了双电层电容主导的电荷存储机制。在不同电流密度下, GCD 曲线的对称性良好, 说明电极具有良好的电化学可逆性。由 GCD 曲线根据公式(2)计算的比电容如图 4(d)所示, 在 $1\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 电流密度下比电容达 $154.9\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ 。随着电流密度从 $1\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升至 $10\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$, 充放电时间逐渐减少, 这是由于在较低电流密度下离子扩散更为充分, 更有利于离子在电极表面的积累, 从而获得更高的比电容。

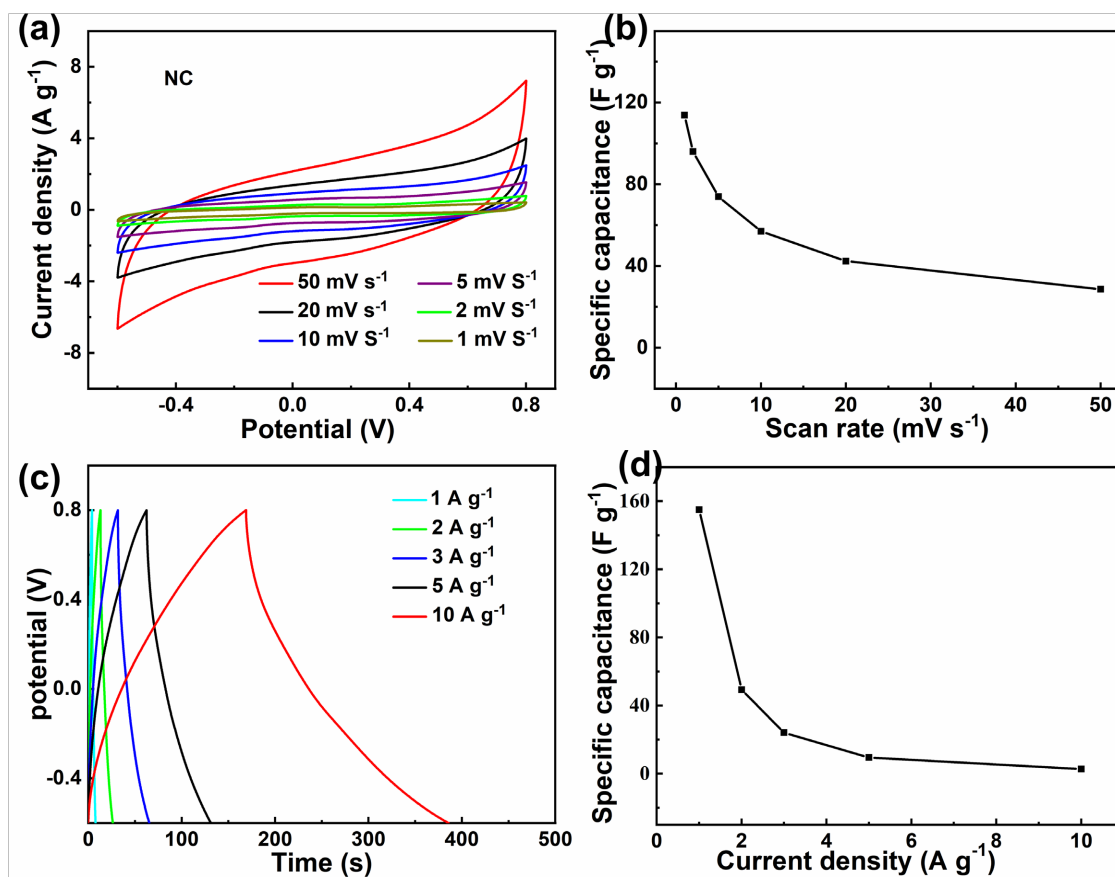


Figure 4. (a) CV curves at different scan rates; (b) specific capacitance at different scan rates; (c) galvanostatic charge-discharge curves and (d) specific capacitance at different current densities of NC

图 4. NC 电极 (a) 在不同扫描速率下的 CV 曲线电极; (b) 不同扫描速率下的比电容; (c) 恒电流充放电曲线; (d) 不同电流密度下的比电容

3.3. CDI 脱盐性能

为评估所制备的复合材料的实际 CDI 性能, 在 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 溶液中对材料的脱盐性能进行了系统测试。使用 NC 作为阴极, AC 作为阳极, 采用单通道循环脱盐装置, 工作电压为 0.6 V 至 1.4 V , 记录溶液电导率随时间的变化, 并根据公式(3)计算 SAC。图 5(a)展示了 NC//AC 系统的在不同工作电压下的脱盐性能。施加电压后, 溶液电导率迅速下降, 表明 Na^+ 和 Cl^- 分别被 NC 阴极和 AC 阳极捕获。约 30 min 后, 电导率趋于稳定, 达到吸附平衡。图 5(b)展示了不同电压下 NC//AC 系统的 SAC, 随着工作电压从 0.6 V 升高至 1.4 V , SAC 从 $12.27 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 逐渐增加至 $27.61 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (1.2 V) 和 $36.81 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (1.4 V)。这是因为较高的电压增强了电场驱动力, 促进了离子的迁移和吸附。

稳定性是评估 CDI 系统实际适用性的重要指标之一。NC 电极在 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaCl 溶液中以 1.0 V 的恒定电压进行了 37 次循环测试(图 6)。该电极表现出极佳的稳定性, 37 次循环后的容量衰减仅为 15.8% , 平均衰减率为每圈 0.43% , 表明其具有良好的循环稳定性。优异的稳定性归因于 NC 的无定形碳结构在充放电过程中的体积变化较小, 且引入氮的掺杂增强了材料的结构稳定性。

不同氮掺杂碳基电极材料在 CDI 应用中的性能对比如表 1 所示, 所有材料均在相近的工作电压(多为 1.2 V , 少数为 1.4 V 或 1.6 V)和初始 NaCl 溶液浓度(大多为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)下测试。本研究制备的 MF 衍生碳(NC)在 1.2 V 、 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下盐吸附容量为 $27.61 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 高于多数对比材料, 例如空心碳纳米球

(HCNS, 23.01 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)、互联空心碳球(IHCSs, 20.43 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)、蚕茧衍生碳(NC, 18.5 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)以及氮掺杂多孔碳管复合物(PCT1.75-N, 16.7 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)等。循环稳定性方面, HCNBs 在 50 次循环后保持 95.4%, NP-EHPC 在 150 次循环后保持 74%, 本研究 MF 衍生 NC 复合材料在 37 次循环后保持 84.2%, 属于中等水平。综上所述, 本工作所开发的 MF 衍生碳在较高盐吸附容量与良好的循环稳定性之间取得了较好的平衡。

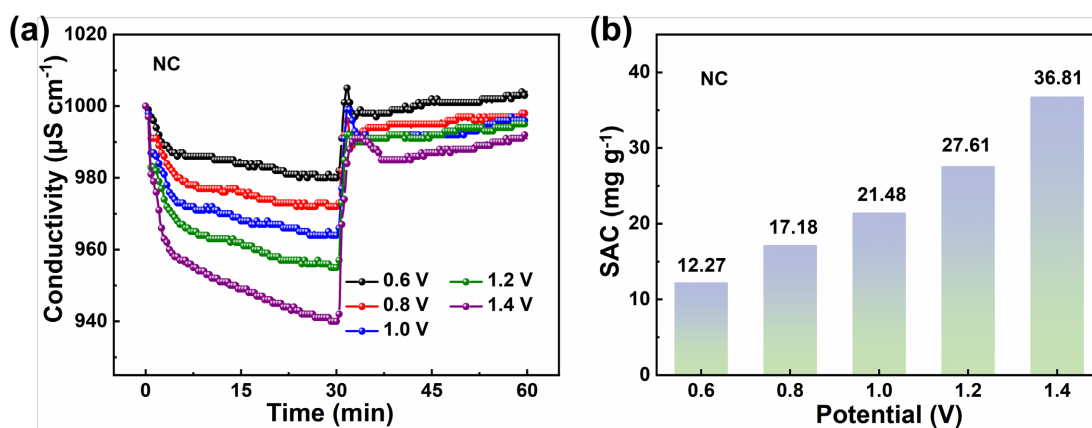


Figure 5. (a) Conductivity variation profiles of the NC//AC CDI device under different operating voltages; (b) Salt adsorption capacity of NC

图 5. (a) 在不同工作电压下, NC//AC 的 CDI 装置中的电导率变化图; (b) NC 的盐吸附容量

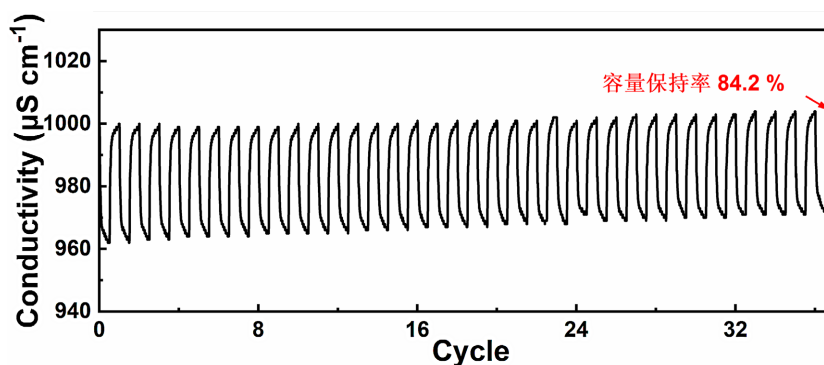


Figure 6. Desalting long cycle test of NC

图 6. NC 的脱盐性能长循环测试

Table 1. Comparison of desalination performance with nitrogen-doped carbon electrode materials reported in the literature

表 1. 与文献报道的氮掺杂碳电极材料脱盐性能对比

电极材料	电压(V)	初始 NaCl 溶液浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	盐吸附容量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	循环稳定性	参考文献
Hollow carbon nanospheres (HCNS)	1.2	584.4	23.01	15 cycle (100%)	[15]
Interconnected hollow carbon spheres (IHCSs)	1.2	500	20.43	25 cycle (97.17%)	[16]
Iron-nitrogen-doped carbon nanoparticles (3D-FeNC tubes)	1.2	293	8	200 cycle (68.7%)	[17]
Silk cocoon-derived carbon (NC)	1.2	500	18.5	20 cycle (86%)	[18]
Zeolite Socony Mobil-5 (ZSM-5) template-derived carbon (HCNBs)	1.4	500	32.3	50 cycle (95.4%)	[19]

续表

Nitrogen-doped highly ordered mesoporous carbon (NOMC)	1.6	250	26.2	20 cycle (100%)	[20]
N, P co-doped eave-like hierarchical porous carbon (NP-EHPC)	1.2	500	24.14	150 cycle (74%)	[21]
N-doped derived hierarchically porous carbon material (NPC/CNT-RG)	1.2	500	28.99	10 cycle (91.9%)	[22]
3D-ordered honeycomb-like nitrogen-doped micro-mesoporous carbon (3D HPC)	1.2	500	21.45	20 cycle (89%)	[23]
Nitrogen-doped porous carbon tubes composite (PCT1.75-N)	1.2	500	16.7	100 cycle (92.5%)	[24]
Nitrogen-doped activated carbon (NAC)	1.2	468	24.7	100 cycle (40%)	[25]
N-dope graphene freestanding porous membrane electrode (F-N-GPM)	1.88	100	21.8	10 cycle (95%)	[26]
NC	1.2	500	27.61	37 cycle (84.2%)	This work

4. 结论

综上所述, 本研究成功制备了 NC 球, 并研究了其在电容去离子方面的性能。通过简单水热法制备了 MF 球, 再通过高温热解制备了氮掺杂多孔碳(NC)。NC 呈现球形形貌, 具有多孔结构, 丰富的孔隙结构为其提供了快速的离子扩散通道。XRD 表明, 所制备的 NC 具有非晶态碳的结构。实验结果显示, NC 电极在 $1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫速下的比电容为 $113.8 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$, 在 $1 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 电流密度下仍保持 $154.9 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$, 具有良好的倍率性能和电化学可逆性。在 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 溶液中、 1.2 V 工作电压下, NC 电极的盐吸附容量达 $27.61 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 经 37 次循环后容量保持率为 84.2%, 表现出优异的脱盐性能和循环稳定性。本研究为开发低成本、高性能的碳基 CDI 电极材料提供了新思路。未来的研究可以从以下方面展开: 将 NC 与法拉第材料进行复合, 进一步提升材料的脱盐性能。

参考文献

- [1] Salehi, M. (2022) Global Water Shortage and Potable Water Safety; Today's Concern and Tomorrow's Crisis. *Environment International*, **158**, Article ID: 106936. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106936>
- [2] Huang, Q., Sheng, L., Wu, T., Huang, L., Yan, J., Li, M., et al. (2025) Research Progress on the Application of Carbon-Based Composites in Capacitive Deionization Technology. *Desalination*, **593**, Article ID: 118197. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.118197>
- [3] Sun, K., Tebyetekerwa, M., Wang, C., Wang, X., Zhang, X. and Zhao, X.S. (2023) Electrocapacitive Deionization: Mechanisms, Electrodes, and Cell Designs. *Advanced Functional Materials*, **33**, Article ID: 2213578. <https://doi.org/10.1002/adfm.202213578>
- [4] Yang, L., Li, Y., Guo, L., Ma, P., Leong, Z.Y., Wang, J., et al. (2024) Economical-effective Purification of Brackish Water through an Integrated Capacitive Desalination & Boron Adsorption System. *Desalination*, **572**, Article ID: 117152. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117152>
- [5] Hong Dan, N., Trung, L.D. and Le Luu, T. (2025) Ultrahigh Desalination Performance Derived from Pseudocapacitance Materials for the Hybrid Capacitive Deionization: A Comprehensive Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **13**, Article ID: 118851. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.118851>
- [6] Chen, J., Zuo, K., Liang, J., Wang, G., Lin, L. and Li, X. (2025) High-Efficiency Capacitive Deionization: Freestanding Carbon Electrodes Derived from Fungal Hyphae with *In-Situ* Oriented MOF Growth. *Green Energy & Environment*, **10**, 2156-2166. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2025.09.009>
- [7] Sufiani, O., Tanaka, H., Teshima, K., Machunda, R.L. and Jande, Y.A.C. (2024) Capacitive Deionization: Capacitor and Battery Materials, Applications and Future Prospects. *Desalination*, **587**, Article ID: 117923.

- <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117923>
- [8] Wang, Z., Yan, T., Fang, J., Shi, L. and Zhang, D. (2016) Nitrogen-Doped Porous Carbon Derived from a Bimetallic Metal-Organic Framework as Highly Efficient Electrodes for Flow-Through Deionization Capacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, **4**, 10858-10868. <https://doi.org/10.1039/c6ta02420c>
- [9] Ding, M., Shi, W., Guo, L., Leong, Z.Y., Baji, A. and Yang, H.Y. (2017) Bimetallic Metal-Organic Framework Derived Porous Carbon Nanostructures for High Performance Membrane Capacitive Desalination. *Journal of Materials Chemistry A*, **5**, 6113-6121. <https://doi.org/10.1039/c7ta00339k>
- [10] Gao, M., Yang, Z., Liang, W., Ao, T. and Chen, W. (2023) Recent Advanced Freestanding Pseudocapacitive Electrodes for Efficient Capacitive Deionization. *Separation and Purification Technology*, **324**, Article ID: 124577. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124577>
- [11] Hao, Z., Sun, X., Chen, J., Zhou, X. and Zhang, Y. (2023) Recent Progress and Challenges in Faradic Capacitive Desalination: From Mechanism to Performance. *Small*, **19**, Article ID: 2300253. <https://doi.org/10.1002/sml.202300253>
- [12] Chen, C., Liu, A., Fei, C., Hui, B., Li, Y., Guan, D., *et al.* (2023) High-Performance Nitrogen-Doped Porous Carbon Electrode Materials for Capacitive Deionization of Industrial Salt-Contaminated Wastewater. *Desalination*, **565**, Article ID: 116863. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116863>
- [13] Ma, C., Wang, Z., Hu, Z., Wang, Y., Zhao, Y. and Shi, J. (2020) Preparation of Submicron Monodisperse Melamine Resin Microspheres and Nitrogen-Doped Carbon Microspheres Derived from Them. *New Carbon Materials*, **35**, 269-285. [https://doi.org/10.1016/s1872-5805\(20\)60489-9](https://doi.org/10.1016/s1872-5805(20)60489-9)
- [14] Li, Y., Chen, N., Li, Z., Shao, H. and Qu, L. (2020) Frontiers of Carbon Materials as Capacitive Deionization Electrodes. *Dalton Transactions*, **49**, 5006-5014. <https://doi.org/10.1039/d0dt00684j>
- [15] Tang, Y., Ding, J., Zhou, W., Cao, S., Yang, F., Sun, Y., *et al.* (2023) Design of Uniform Hollow Carbon Nanoarchitectures: Different Capacitive Deionization between the Hollow Shell Thickness and Cavity Size. *Advanced Science*, **10**, Article ID: 2206960. <https://doi.org/10.1002/adv.202206960>
- [16] Zhang, H., Hu, J., Liu, Y., Lin, C., Zhang, X. and Zhang, Y. (2023) Nitrogen-Doped Carbon Nanospheres for Capacitive Deionization. *ACS Applied Nano Materials*, **6**, 22956-22967. <https://doi.org/10.1021/acsanm.3c04289>
- [17] Xu, X., Tang, J., Kaneti, Y.V., Tan, H., Chen, T., Pan, L., *et al.* (2020) Unprecedented Capacitive Deionization Performance of Interconnected Iron-Nitrogen-Doped Carbon Tubes in Oxygenated Saline Water. *Materials Horizons*, **7**, 1404-1412. <https://doi.org/10.1039/c9mh01829h>
- [18] Kong, W., Ge, X., Zhang, M., Mi, M., Kong, D. and Feng, Y. (2022) Nitrogen-Doped Hierarchical Porous Carbon Obtained from Silk Cocoon for Capacitive Deionization. *Diamond and Related Materials*, **129**, Article ID: 109388. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109388>
- [19] Li, K., Zhu, S., Zhao, S., Gong, M., Zhao, X., Liang, J., *et al.* (2024) Synthesis of Nitrogen-Doped Carbon Nanoboxes with Pore Structure Derived from Zeolite and Their Excellent Performance in Capacitive Deionization. *Journal of Materials Chemistry A*, **12**, 899-910. <https://doi.org/10.1039/d3ta06096a>
- [20] Tian, S., Wu, J., Zhang, X., (Ken) Ostrikov, K. and Zhang, Z. (2020) Capacitive Deionization with Nitrogen-Doped Highly Ordered Mesoporous Carbon Electrodes. *Chemical Engineering Journal*, **380**, Article ID: 122514. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122514>
- [21] Zhang, H., Wang, C., Zhang, W., Zhang, M., Qi, J., Qian, J., *et al.* (2021) Nitrogen, Phosphorus Co-Doped Eave-Like Hierarchical Porous Carbon for Efficient Capacitive Deionization. *Journal of Materials Chemistry A*, **9**, 12807-12817. <https://doi.org/10.1039/d0ta10797b>
- [22] Liu, S., Wang, Q., Li, B., Zhou, Y., Gong, T. and Li, J. (2023) Preparation of Nitrogen-Doped Hierarchical Porous Carbon Electrodes for High Performance Capacitive Deionization. *Ionics*, **29**, 2935-2945. <https://doi.org/10.1007/s11581-023-05051-6>
- [23] Song, X., Fang, D., Huo, S. and Li, K. (2021) 3D-Ordered Honeycomb-Like Nitrogen-Doped Micro-Mesoporous Carbon for Brackish Water Desalination Using Capacitive Deionization. *Environmental Science: Nano*, **8**, 2191-2203. <https://doi.org/10.1039/d1en00276g>
- [24] Zhao, Y., Luo, G., Zhang, L., Gao, L., Zhang, D. and Fan, Z. (2020) Nitrogen-Doped Porous Carbon Tubes Composites Derived from Metal-Organic Framework for Highly Efficient Capacitive Deionization. *Electrochimica Acta*, **331**, Article ID: 135420. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135420>
- [25] Hsu, C., Tu, Y., Yang, Y., Wang, J. and Hu, C. (2020) Improved Performance and Long-Term Stability of Activated Carbon Doped with Nitrogen for Capacitive Deionization. *Desalination*, **481**, Article ID: 114362. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114362>
- [26] Zhang, G., Li, W., Chen, Z., Long, J. and Xu, C. (2022) Freestanding N-Doped Graphene Membrane Electrode with Interconnected Porous Architecture for Efficient Capacitive Deionization. *Carbon*, **187**, 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.10.081>