

自支撑Fe-ZIF8/CNF复合电极用于柔性水系锌碘电池

用天淇, 李新宇*, 杨迎强, 王 恒

桂林理工大学物理与电子信息工程学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年4月10日; 录用日期: 2026年5月20日; 发布日期: 2026年5月28日

摘 要

水系锌碘电池面临多碘化物的穿梭、活性物质溶解以及传统刚性电极的机械柔韧性差等问题, 导致容量快速衰减限制了在可穿戴设备中的应用。本文通过静电纺丝技术构建了柔性自支撑纳米复合材料(Fe-ZIF8@CNF), 该设计结合了纳米反应器的限域和催化优势, 以及自支撑框架的机械耐久性和优化的离子/电子传输特性, 有效降低了集流体界面阻抗。使Fe-ZIF8@CNF电极展现出优异的循环稳定性(软包电池10 C下实现600次循环)和出色的比容量(在5 C下提供193.94 mAh·g⁻¹)。这项作为开发高性能柔性水系储能电极提供了可拓展的新路径。

关键词

水系锌碘电池, 纳米反应器, 自支撑, 静电纺丝

Self-Supported Fe-ZIF8/CNF Composite Electrode for Flexible Aqueous Zinc-Iodine Batteries

Tianqi Yong, Xinyu Li*, Yingqiang Yang, Heng Wang

College of Physics and Electronic Information Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: April 10, 2026; accepted: May 20, 2026; published: May 28, 2026

*通讯作者。

文章引用: 用天淇, 李新宇, 杨迎强, 王恒. 自支撑 Fe-ZIF8/CNF 复合电极用于柔性水系锌碘电池[J]. 物理化学进展, 2026, 15(2): 139-147. DOI: 10.12677/japc.2026.152015

Abstract

Aqueous zinc-iodine batteries suffer from severe issues including polyiodide shuttle effect, active material dissolution, and poor mechanical flexibility of conventional rigid electrodes, which lead to rapid capacity decay and greatly restrict their practical applications in wearable devices. In this work, a flexible self-supported nanocomposite (Fe-ZIF8@CNF) was fabricated via electrospinning technology. This design integrates the confinement and electrocatalytic advantages of nanoreactors with the mechanical durability and optimized ion/electron transport properties of the self-supported framework, thereby effectively reducing the interfacial impedance of the current collector. Consequently, the Fe-ZIF8@CNF electrode delivers outstanding cycling stability (600 cycles at 10 C in soft-pack batteries) and superior specific capacity (193.94 mAh·g⁻¹ at 5 C). This work offers a scalable and innovative strategy for the development of high-performance flexible electrodes toward aqueous energy storage systems.

Keywords

Aqueous Zinc-Iodine Battery, Nanoreactor, Self-Supported, Electrospinning

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

水系锌碘电池因其高理论容量、安全性和低成本而被视为下一代储能技术的有力候选者[1][2]。然而,传统刚性电极在面对弯曲、拉伸等机械变形时往往无法保持结构稳定,易导致性能衰减[3][4]。与此同时,该体系还存在多碘离子穿梭效应和活性物质溶解等问题[5][6],造成容量快速衰减与循环寿命缩短[7][8]。基于此亟需开发兼具结构稳定性与电化学稳定性的先进电极材料,从而实现高效的柔性储能性能。

在锌碘电池正极的性能提升方面,已有研究多采用高比表面积碳材料以增强物理吸附能力[9]、通过异质原子掺杂调节电子结构促进碘氧化还原反应[10],或将碳主体与极性化合物复合以增强对多碘阴离子的化学锚定[11]。这些策略在一定程度上提高了活性物质的利用率,并在一定程度上抑制了穿梭效应,但往往难以同时兼顾强限域能力与高效催化反应,且依赖于表面作用可能导致界面传输受限。纳米反应器的设计为改善上述不足提供了新的结构化思路[12][13]。通过在纳米尺度构建具有有限域空间和可调孔径的腔体结构,可以在一定程度上约束碘及多碘阴离子的分布与迁移,从而减弱其向负极扩散的倾向,同时减少穿梭效应带来的不利影响[14]。此外,纳米反应器结构的内壁或孔道表面可引入催化活性组分,为碘氧化还原反应提供反应位点,有助于降低反应能垒并改善动力学过程[15]。

尽管纳米反应器能够在吸附和催化方面能够优化碘正极性能,传统粉末状活性材料在实际组装中往往需要依赖金属集流体和粘结剂,这带来了额外的界面阻抗并降低了活性物质的利用率,同时限制了柔性储能器件的应用[16]-[18]。柔性自支撑电极无需额外集流体,通过自身导电骨架即可形成连续的电子传导网络,有效降低界面阻抗。其多孔纤维网络为离子提供高速传输通道,使反应物能够快速到达活性位点,从而提升反应速率[19]。更重要的是,柔性自支撑结构在多次形变如弯曲、折叠下仍能保持结构完整和性能稳定,适用于可穿戴及便携储能应用。

为此,我们研究开发了一种柔性自支撑纳米复合电极(Fe-ZIF8/CNF),用于高性能水系锌碘电池。该

设计通过静电纺丝技术将 Fe-ZIF8 纳米反应器嵌入可碳纤维前驱物中, 经高温碳化形成稳定的导电网络, 实现无集流体支撑的柔性结构。这种集成策略将纳米反应器的限域和催化优势与柔性自支撑框架的机械耐久性和传输优化相结合, 提供高比表面积的多孔结构以增强活性位点吸附和多碘离子催化, 可抑制穿梭效应并限制活性物质溶解。该组合设计不仅提高了锌碘电池的电化学稳定性和机械适应性, 还为柔性储能应用的电极优化提供了可扩展的框架。

2. 实验与表征

2.1. Fe-ZIF8 的合成

3.94 g 2-甲基咪唑溶解于 300 mL 甲醇中, 搅拌均匀后加入 3.39 g 六水合硝酸锌 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 得到溶液 A。100 mg 九水合硝酸铁 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 共同溶解于 300 mL 甲醇中, 搅拌至完全溶解, 得到溶液 B。将溶液 A 与溶液 B 混合搅拌 12 h, 使用乙醇洗涤四次后转至真空烘箱 60°C 烘干 24 h。

2.2. Fe-ZIF8/CNF 的制备

将 0.8 g Fe-ZIF8 与 1 g PAN 溶于 10 mL DMF 溶液中, 将所得的溶液转移至温度 50°C 的油浴锅中搅拌 12 h, 获得均匀粘稠的纺丝液。使用 19 号针头进行静电纺丝, 得到的纤维转移至管试炉中在 Ar 气氛下, 以 5°C min^{-1} 的速率缓慢升温至 800°C , 保温 2 h 后得到 Fe-ZIF8/CNF。

2.3. I_2 @Fe-ZIF8/CNF 的制备

将碳化后的 Fe-ZIF8/CNF 通过浸泡碘溶液, 烘干后制备出自支撑电极片 I_2 @Fe-ZIF8/CNF。

2.4. 材料的结构表征及其电化学测试

阴极材料通过使用 TESCAN MIRA LMS FESEM (扫描电子显微镜(SEM))、JEOL JEM-2100F (透射电子显微镜(TEM))和 X 射线光电子能谱(XPS)对形貌结构和元素成分进行了表征。使用 X 射线衍射仪(XRD, Japanese MiniFlex-600 型)等表征技术进行鉴别分析。使用 SDT Q600 热重分析仪在气氛中进行热重分析(TGA), 加热速率为 $10^\circ\text{C min}^{-1}$ 。使用 Micromeritics ASAP 2460 仪器在液氮温度(77 K)下记录吸附/解吸数据。使用 BET 方程计算比表面积。以复合材料为阴极、锌箔为阳极、2 M ZnSO_4 为电解质、玻璃纤维膜为隔膜, 在 2025 型的纽扣电池中进行叠层组装, 用于电化学测试。循环伏安法(CV)测试(0.6~1.6 V)和电化学阻抗谱(EIS)测试(0.1~100 kHz, 振幅为 10 mV)在电化学工作站(CHI 760E)上进行。在电池测试系统(Neware Technology)上进行了 GITT 测试、恒流充电和放电测试。GITT 测试使用 100 mAg^{-1} 的脉冲电流和 5 分钟的弛豫时间用于确定锌离子扩散系数。

3. 结果与讨论

3.1. 结构表征

图 1(a)展示了作为前驱体的 Fe-ZIF8 纳米晶体的扫描电子显微镜(SEM)图像。图中可见, 所合成的 Fe-ZIF8 呈现出规则的菱形十二面体形貌, 粒径均一, 尺寸约为 50~80 nm。图 1(b)是最终产物 Fe-ZIF-8/CNF 的 SEM 图像, 清晰地显示了由纳米纤维相互交织构成的三维多孔网络结构, 形成了自支撑的柔性骨架。为了进一步揭示其内部的精细结构, 我们通过透射电子显微镜(TEM)对单根复合纳米纤维进行了观察(图 1(c))。结果显示 Fe-ZIF8 纳米反应器被有效镶嵌于碳纳米纤维基体内部, 证实功能单元与连续导电载体之间形成了稳定的分级复合结构。如图 1(d)~(j)所示, 能量色散 X 射线光谱(EDS)揭示了 C、N、O、Fe 元素在整个结构中的共存和均匀分布, 表明成功制备了 Fe-ZIF8/CNF 复合材料。

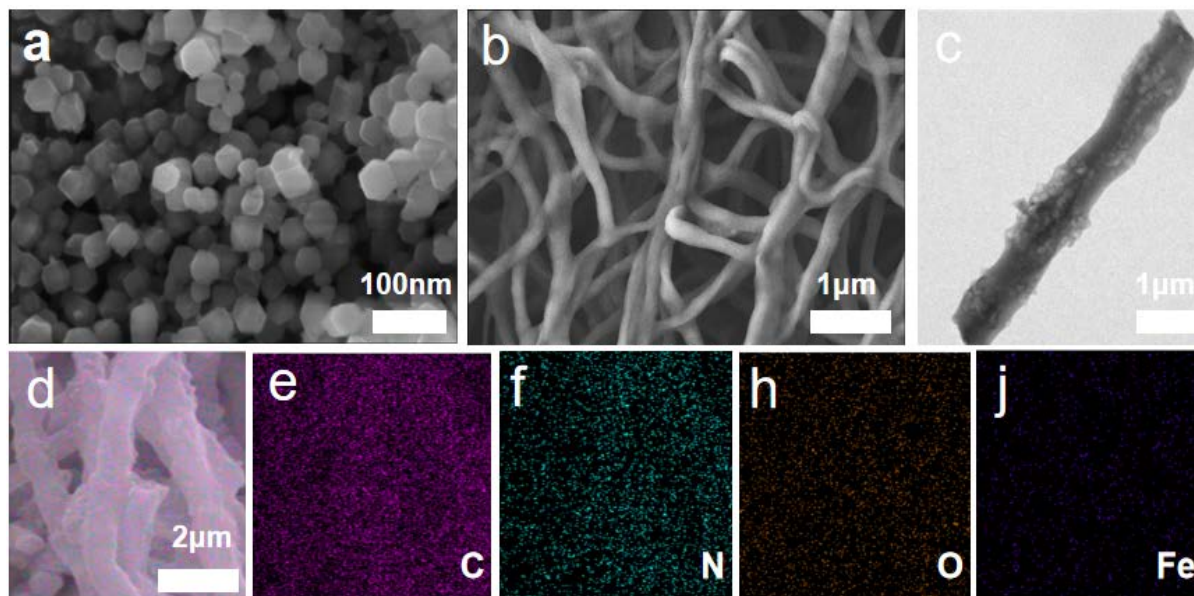


Figure 1. (a) SEM image of Fe-ZIF8; (b) SEM image of carbonized Fe-ZIF8/CNF; (c) TEM image of Fe-ZIF8/CNF; (d)~(j) EDS elemental mapping images of C, N, O and Fe elements in Fe-ZIF8/CNF

图 1. (a) Fe-ZIF8 的 SEM 图像; (b) Fe-ZIF8/CNF 碳化后的 SEM 图; (c) Fe-ZIF8/CNF 的 TEM 图像; (d)~(j) Fe-ZIF8/CNF 中 C、N、O 和 Fe 元素的能量色散 X 射线光谱元素分布图像

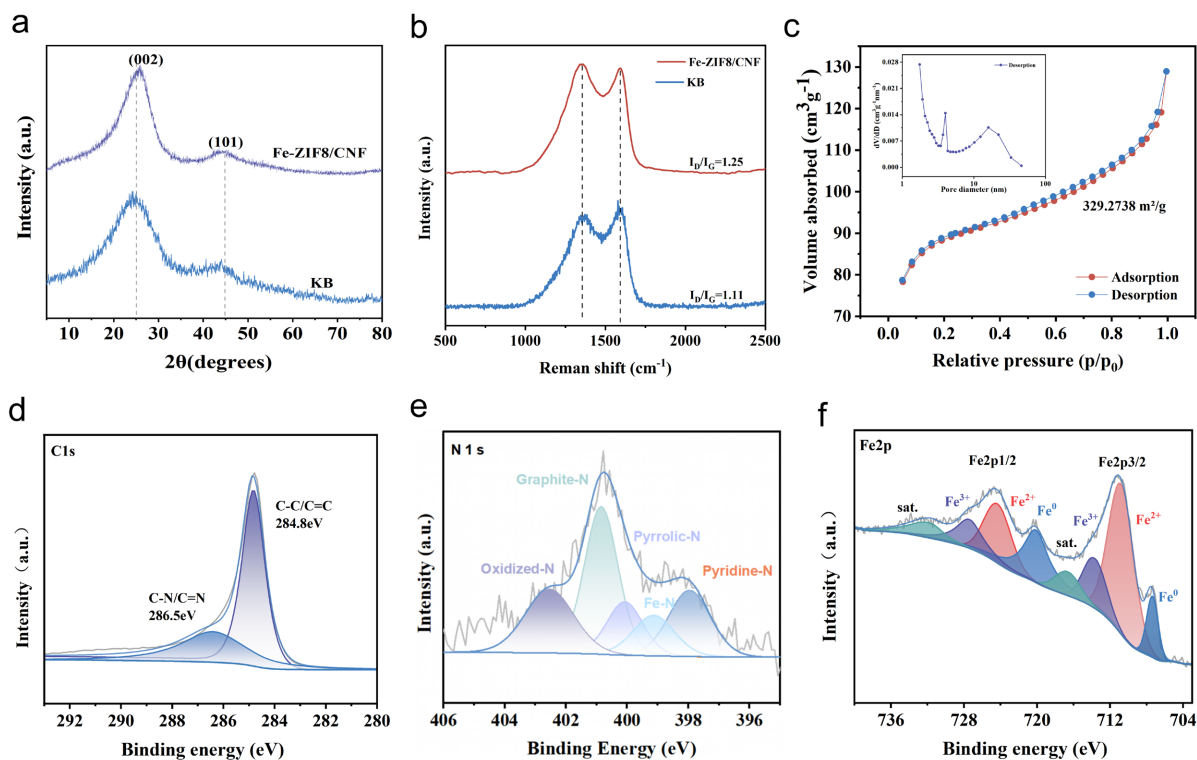


Figure 2. Characterization and analysis of the chemical state and coordination structure of Fe-ZIF8/CNF: (a) XRD pattern; (b) Raman spectrum; (c) N₂ adsorption/desorption isotherms of Fe-ZIF8/CNF; high-resolution XPS spectra of Fe-ZIF8/CNF for (d) C 1s, (e) N 1s and (f) Fe 2p

图 2. Fe-ZIF8/CNF 的化学状态及配位结构表征和分析: (a) XRD 图谱; (b) 拉曼光谱; (c) Fe-ZIF8/CNF 的 N₂ 吸附/脱附等温线; Fe-ZIF8/CNF 的高分辨率 (d) C1s、(e) N1s 和 (f) Fe2p XPS 光谱

图 2(a)为 Fe-ZIF8/CNF 与对比样 KB (科琴黑)的 X 射线衍射(XRD)图谱。二者均在约 25°和 44°处呈现出两个宽化的衍射峰,分别对应于石墨碳的(002)和(101)晶面,表明材料主体为非晶态或低结晶度的碳结构[20]。重要的是,在 Fe-ZIF8/CNF 的图谱中未观察到与 ZIF8 晶体或金属铁相关的尖锐衍射峰,这证实了 MOF 前驱体在高温热解过程中已完全转化为碳基骨架,且铁物种在碳基体中呈现出高度分散的状态[21]。图 2(b)拉曼光谱用于评估材料的石墨化程度和缺陷密度。两个样品均显示了位于 1350 cm^{-1} 的 D 带(源于结构缺陷和无序碳)和 1580 cm^{-1} 的 G 带(源于 sp^2 杂化碳的振动)。通过计算 D 带与 G 带的强度比 (ID/IG),这表明,Fe-ZIF8 的引入和热解在碳纤维中诱导了更丰富的结构缺陷,这些缺陷位点有望作为电化学反应的活性中心,增强对多碘化物的吸附与催化。图 2(c)显示,Fe-ZIF8/CNF 呈现出典型的 IV 型等温线和 H3 型滞后环,具不规则介孔结构,其比表面积高达 329.27 m^2/g 。孔径分布曲线(插图)进一步证实了材料内部分布着丰富的介孔。这种高比表面积和分级孔道结构为电解液的充分浸润、离子的快速传输以及碘物种的物理限域提供了理想的结构基础。XPS 揭示了 Fe-ZIF8/CNF 材料的界面化学状态。C 1s 光谱(图 2(d))显示有 C-C/C=C (284.8 eV)和 C-N/C=N (286.5 eV)两个主峰,证实 N 元素已掺杂到碳骨架中。N 1s 光谱(图 2(e))可以拟合为吡啶-N、吡咯-N、石墨-N、氧化-N 以及 Fe-N 等多种成键构型[22]。其中,Fe-N 键的出现为 Fe-N_x 催化位点的形成提供了直接证据。Fe2p 光谱(图 2(f))显示了 Fe²⁺、Fe³⁺以及少量 Fe⁰ 共存的多价态特征,并伴有相应的卫星峰。这种多价态铁物种,特别是与 N 配位形成的 Fe-N_x 结构,被认为是高效催化碘氧化还原反应的关键活性中心[23],起到促进电荷转移、降低反应能垒及中间体吸附活化的调控作用。

3.2. 电化学性能测试

为了进一步探索电极内 Zn²⁺的扩散特性及氧化还原动力学,在 2~10 $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 的不同扫描速率下对 I₂@Fe-ZIF8/CNF、I₂@KB 电极进行 CV 测试(图 3(a),图 3(d)),相较于 I₂@KB 参比电极,I₂@Fe-ZIF8/CNF 电极的氧化还原峰形更为对称,且峰电位差随扫速增加而扩大的幅度显著减小。这一现象在 CV 等高线图(图 3(b),图 3(e))中得到更直观的印证,直接反映了其内部镶嵌的 Fe-ZIF8 纳米反应器对 I⁻/I₂ 转化反应的优异电催化活性,从而有效降低了反应极化。基于峰电流(i)与扫速(v)的幂律关系 $i = av^b$ 进行拟合,由图 3(c)可得 I₂@Fe-ZIF8/CNF 的氧化峰(Peak A)与还原峰(Peak B)的 b 值分别为 0.752 和 0.641,均介于 0.5 (扩散控制)与 1.0 (电容控制)之间,说明其电荷存储由扩散过程与赝电容过程协同贡献[24]。相比之下,I₂@KB 的 b 值(图 3(f))分别为 0.698 和 0.566,整体更接近扩散控制,表明其动力学更易受体相扩散限制。

进一步地,利用 $i = k_1v^{1/2} + k_2v$ 关系式分离不同扫速下的电容贡献与扩散贡献对电容贡献率(图 3(g),图 3(h))。在 10 $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高扫速下,I₂@Fe-ZIF8/CNF 电极的电容贡献率高达 73.37%,这归因于 Fe-ZIF8/CNF 的分级多孔导电网络所带来的高可接触比表面积,以及 Fe-N_x 等极性、活性位点对碘物种的有效锚定与快速反应界面构建,从而降低传质路径与界面反应能垒。此外,通过 GITT 测试(图 3(i))表明 I₂@Fe-ZIF8/CNF 的锌离子扩散系数处在 10⁻¹⁰至 10⁻¹¹ $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内,这证明了其由连续碳纤维构成的三维多孔网络,为离子迁移构筑了畅通无阻的“高速公路”,保障了即使在高倍率下,活性位点也能得到快速的离子供应。

为了全面探究 I₂@Fe-ZIF8/CNF 复合阴极的电化学性能,进行了一系列电化学测试。首先,电化学阻抗谱(EIS)(图 4(a))揭示了电荷转移动力学,I₂@Fe-ZIF8/CNF 的电荷转移电阻较低,这归因于其内部镶嵌的 Fe-ZIF8 纳米反应器对碘氧化还原反应的优异电催化活性,三维导电网络进一步加速了电极内电荷的转移。这种动力学优势直接体现在其卓越的倍率性能上。如图 4(b)所示,在 2C 至 10C 的变倍率测试中,I₂@Fe-ZIF8/CNF 电极在所有电流密度下均展现出远高于 I₂@KB 电极的可逆容量。即便在 10C 的高倍率下,其容量仍能维持在 155.8 mAh g^{-1} ,并且当电流密度恢复至 2C 时,容量几乎完全恢复,显示出优异的

速率响应和结构稳定性。其在不同倍率下的恒电流充放电曲线(图 4(c))进一步证实了这一点, 曲线展现出平坦且对称的充放电平台。此外, TGA 结果(图 4(d))表明 $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ 具有高达 61.21%的碘有效负载说明该自支撑宿主能够在保证结构完整性的前提下实现高活性物质装载, 为高面积容量输出提供了物质基础。自放电对比(图 4(e), 图 4(f))揭示静置 48 h 后 $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ 具有更高容量保持率与更小电压衰减, $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ 保持率为 87.11%, 而 $I_2@KB$ 电极的容量保持率仅为 16.39%, 结果证明 Fe-ZIF8 纳米反应器通过极性位点强吸附与限域空间内的快速转化协同降低活性物质流失率。

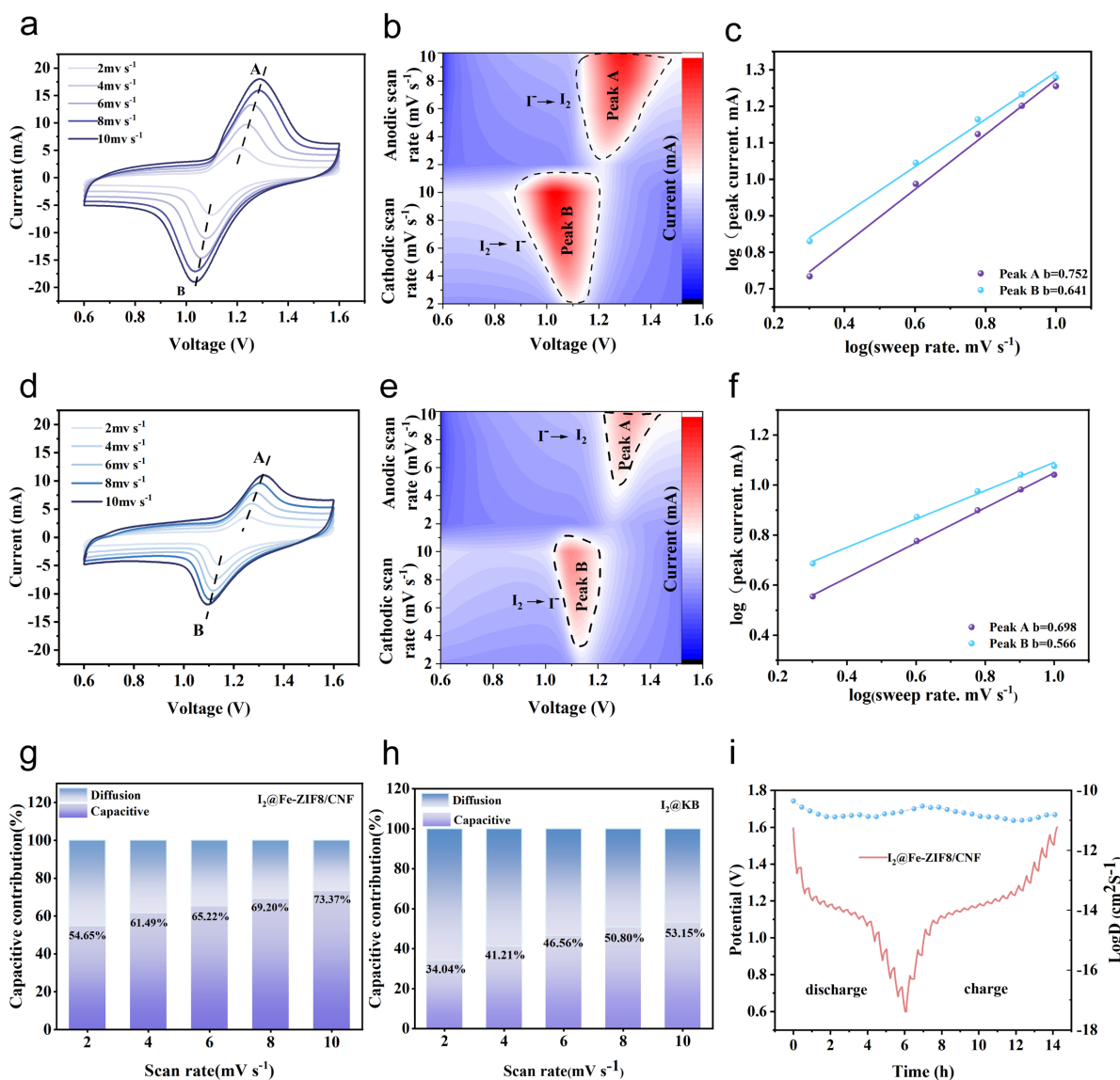


Figure 3. (a) (b) CV curves and high-line diagrams of the $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ electrode at different scan rates; (c) linear fitting plot between peak current and the square root of scan rate for the $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ electrode; (d) (e) CV curves and contour plots of the $I_2@KB$ electrode at different scan rates; (f) linear fitting plot between peak current and the square root of scan rate for the $I_2@KB$ electrode; (g) (h) percentage of capacitive contribution to the total capacity at various scan rates; (i) GITT curves and zinc ion diffusion coefficient

图 3. (a) (b) $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ 电极在不同扫描速率下的 CV 曲线图、高线图; (c) $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ 电极峰值电流与扫描速率平方根的线性拟合图; (d) (e) $I_2@KB$ 电极在不同扫描速率下的 CV 曲线图、等高线图; (f) $I_2@KB$ 电极峰值电流与扫描速率平方根的线性拟合图; (g) (h) 在不同扫描速率下的电容贡献占总容量的百分比; (i) GITT 图

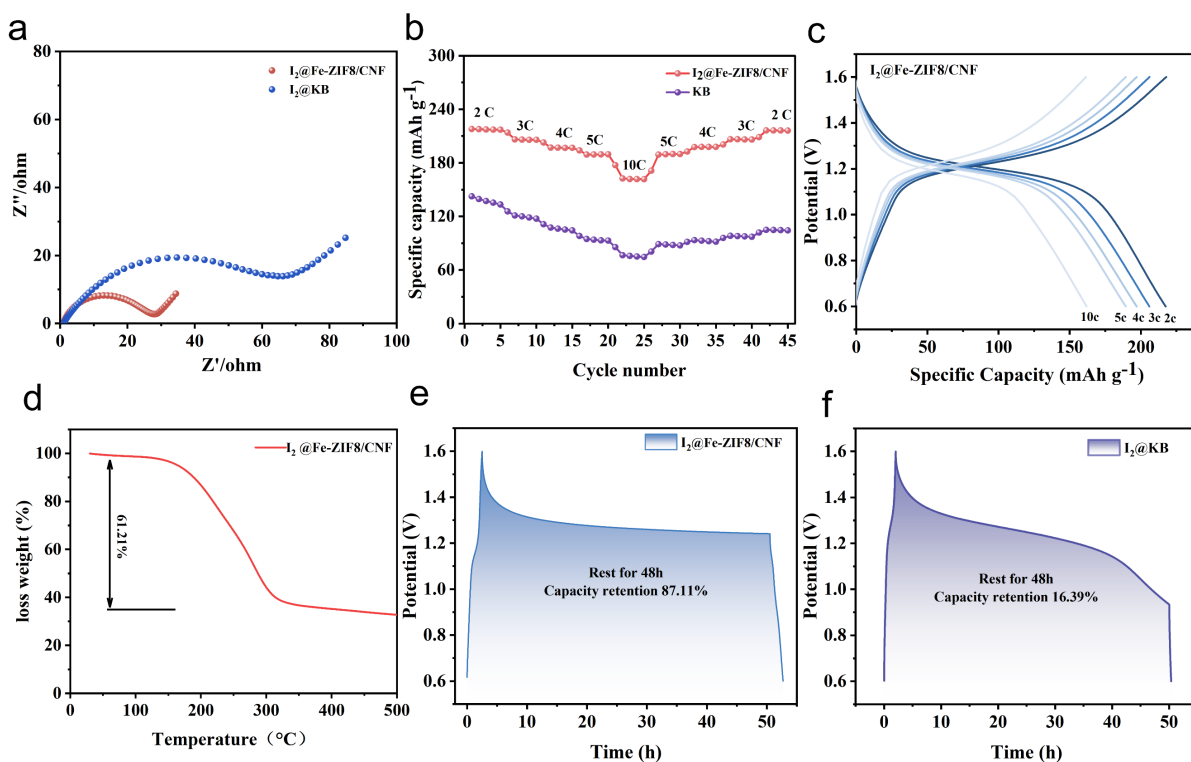


Figure 4. (a) EIS plots of $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ and $I_2@KB$; (b) rate performance curves of $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ and $I_2@KB$. (c) Charge/discharge profiles of $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ at various current rates; (d) TG curve of $I_2@Fe-ZIF8/CNF$; (e) (f) Self-discharge profiles of $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ and $I_2@KB$ after 48 h of standing

图 4. (a) $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ 、 $I_2@KB$ 阻抗图; (b) $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ 、 $I_2@KB$ 倍率图。 (c) 不同倍率下 $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ 充电/放电曲线; (d) $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ 热重图; (e) (f) $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ 、 $I_2@KB$ 搁置 48 h 自放电测试曲线图

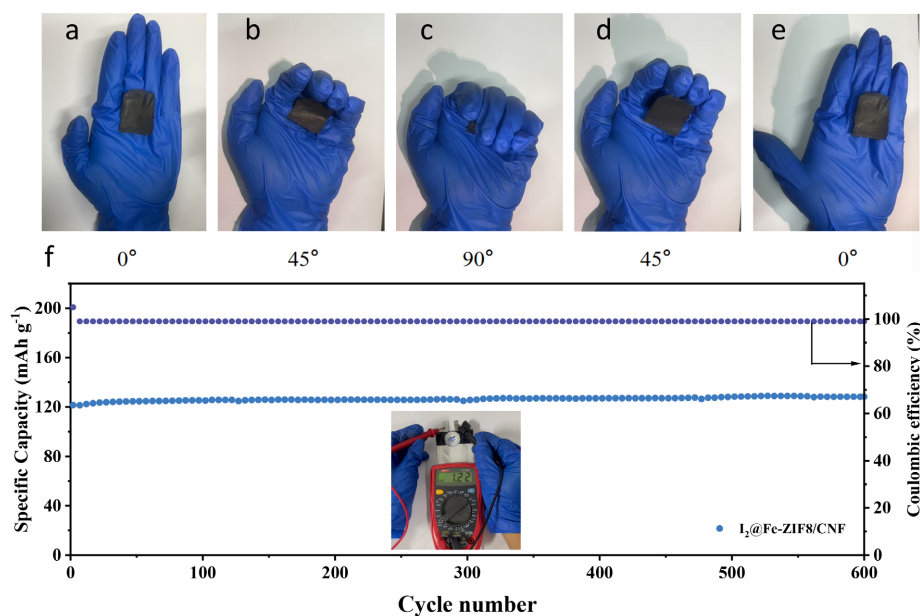


Figure 5. (a)~(e) Digital photographs of the electrode during bending and rebounding under handheld conditions; (f) Long-term cycling performance of the $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ soft-pack battery at 10 C (Inset: voltage profile of the soft-pack battery)

图 5. (a)~(e) 为电极在手持条件下的弯折/回弹过程照片; (f) $I_2@Fe-ZIF8/CNF$ 软包电池在 10 C 下的长循环性能(插图: 软包电池电压图)

图 5(a)~(e)直观地展示了该自支撑电极薄膜优异的机械柔韧性。如图所示,该电极可以经受从平展(0°)到弯曲(45°)乃至扭曲(90°)等一系列的机械形变,并在外力撤除后完全恢复至初始形态,其表面未见电极裂纹或结构破损。这种卓越的机械耐受性,源于其由连续碳纳米纤维相互交织构成的三维网络结构,该结构赋予了电极整体的弹性和结构完整性,是实现柔性储能的物理基础。此外,基于该电极组装了柔性软包电池,活性物质面积负载量为 $2.0\sim 3.2\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$,厚度约为 $45\text{ }\mu\text{m}$,并对其进行了循环性能测试。如图 5(f)所示,该柔性器件展现出杰出的循环稳定性,在 600 次循环过程中,其比容量稳定维持在约 $125\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$,且库仑效率始终保持在接近 100%。表明该自支撑电极在连续充放电过程中具有高度可逆的电化学反应与较低的副反应贡献。插图所示使用该自支撑电极组装的柔性软包电池工作状态下,稳定输出 1.22 V 的开路电压。展现该一体化自支撑电极同时具备优异的机械耐受性与循环可靠性,为柔性、可穿戴或抗形变应用场景下的锌碘储能提供了结构与电化学依据。

4. 结论

本研究设计并制备了一种集成 Fe-ZIF8 衍生纳米反应器的自支撑碳纳米纤维柔性电极(Fe-ZIF8/CNF)。该电极的结构旨在同时应对水系锌碘电池所面临的电化学不稳定性与机械柔韧性不足的问题。实验结果表明,该电极内部的 Fe-ZIF8 衍生纳米反应器通过物理吸附与催化转化,有效地固定了可溶性多碘化物,显著抑制了穿梭效应。同时,材料内丰富的 Fe- N_x 位点降低了电荷转移电阻,而连续的碳纤维网络为电子和离子提供了高效的传输路径,共同改善了碘的氧化还原反应动力学。此外,该电极的自支撑特性使其无需使用粘剂和金属集流体,并表现出良好的机械柔韧性,能够在弯曲等形变条件下保持结构完整。因此,所制备的 $\text{I}_2\text{@Fe-ZIF8/CNF}$ 电极表现出优异的循环稳定性与良好的倍率能力,实现软包电池在 10 C 倍率下循环 600 次后库仑效率仍接近 100%。本工作所提出的将功能性纳米反应器与导电自支撑骨架相结合的电极设计方法,为开发兼具长循环寿命和机械柔韧性的水系储能设备提供了一种有效的技术途径。

参考文献

- [1] Dong, C., Wu, H., Yang, T., Sun, Z., Wang, R., Ji, H., *et al.* (2026) Multifunctional Molecular Engineering Enables Simultaneously Dendrite-Free and Corrosion-Resistant Zinc-Halogen Batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, **65**, e17407. <https://doi.org/10.1002/anie.202517407>
- [2] Liu, R., Wang, D., Gao, Z., Yang, D., Li, Y., Long, X., *et al.* (2026) Low-Self-Discharge Nanoconfined Hydrogel Electrolyte for Stable High-Energy-Density Aqueous Zinc-Iodine Batteries. *ACS Nano*, **20**, 5217-5227. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c20669>
- [3] Luo, P., Chen, R., Liu, Q., Li, X., Yu, H., Zhao, Y., *et al.* (2026) Highly Flexible and Structurally Stable Oriented Conductive Framework for Deformation-Tolerant Zn-Ion Batteries. *Advanced Functional Materials*, **35**, Article ID: 2506742. <https://doi.org/10.1002/adfm.202506742>
- [4] Long, Z., Fan, C., Yan, Z., Zhang, R., Qiao, H., Wang, K., *et al.* (2026) Anti-Detachment Interface Enabled Ultra-Flexible Quinone-Rich Polydopamine/Carbonized Silk Textile for Reversible Sodium Storage. *Chemical Engineering Journal*, **511**, Article 161961. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161961>
- [5] Wen, H., Yin, B., Wen, H., Sun, Y., Li, J., Li, H., *et al.* (2025) Synergistic Strategy of Targeted Capture and Potential Responsive Release for High-Performance Zinc-Iodine Batteries. *Advanced Materials*, **38**, e16182. <https://doi.org/10.1002/adma.202516182>
- [6] Xu, J., Zhu, Y., Gui, Q., Zhao, P., Mao, L. and Luo, T. (2025) Conquering Shuttle Effect and Dendrites Synergistically: A Zwitterionic Bacterial Cellulose Hydrogel Electrolyte for Ultralong-Lifespan Zn-I₂ Batteries. *Small*, **21**, e07140. <https://doi.org/10.1002/smll.202507140>
- [7] Di, H., An, Y., Yang, J., Luan, D. and Lou, X.W. (2025) Fluorine Modified Zeolitic Imidazolate Framework Enables Long-Life Zn-I₂ Batteries by Suppression of Polyiodide Shuttle. *Angewandte Chemie*, **137**, e202513312. <https://doi.org/10.1002/ange.202513312>
- [8] Hu, W., Zhu, J., Ni, J. and Li, L. (2025) Rich Polar Groups and Extensive Charge Distribution in Functional Binders Enable Long Cycle Life Zn/I₂ Batteries. *Advanced Functional Materials*, **35**, e10761.

- <https://doi.org/10.1002/adfm.202510761>
- [9] Gao, Y., Chen, C., Zhang, J., Chen, M., Shan, L., Luo, Q., *et al.* (2026) Integrated Confinement-Chemisorption-Catalysis Cathode for Highly Stable Zinc-Iodine Batteries. *Nano Materials Science*, **8**, 175-182. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2025.08.002>
- [10] Li, F., Sun, S., Ma, L., Zhang, W., Zhou, M., Fu, Y., *et al.* (2025) Iron-Regulated D-Band Center in Fe-V₂O₅-n/rGO Heterostructures Enables Ultralong-Cycling Zinc-Iodine Batteries via Optimal Iodine Adsorption-Desorption Dynamics. *Advanced Functional Materials*, **36**, e12876. <https://doi.org/10.1002/adfm.202512876>
- [11] Li, J., Ni, G., Cheng, Z., He, J., Cao, F., Zhu, F., *et al.* (2025) Synergistic Structural, Chemical, and Catalytic Modulation of Carbon Host for High-Performance Aqueous Zinc-Iodine Batteries. *Electrochimica Acta*, **540**, Article 147258. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.147258>
- [12] Zhu, L., Guan, X., Fu, Y., Zhang, Z., Li, Y., Mai, Q., *et al.* (2024) Integrated Trap-Adsorption-Catalysis Nanoreactor for Shuttle-Free Aqueous Zinc-Iodide Batteries (Adv. Funct. Mater. 48/2024). *Advanced Functional Materials*, **34**, Article ID: 2409099. <https://doi.org/10.1002/adfm.202470286>
- [13] Chen, X., Li, J., Xiang, L., Liu, K., Pan, Y., Li, X., *et al.* (2025) Spatial-Confined and Bifunctional Nanoreactors toward Dendrite-Free Anode and Shuttle-Suppressed Cathode in Zinc-Iodine Batteries. *Advanced Energy Materials*, **16**, e04798. <https://doi.org/10.1002/aenm.202504798>
- [14] Liu, S., Zhang, J., Gao, Y., Liu, B., Luo, Y., Fang, K., *et al.* (2025) Iodine Species Anchored and Converted by CoO/Co Heterostructure in Confined Micro-Mesoporous Carbon Nanoreactors for High-Performance Zinc-Iodine Batteries. *Chemical Engineering Journal*, **526**, Article ID: 171429. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.171429>
- [15] Wei, L., Peng, J., Zhao, G., Yu, D. and Chen, C. (2025) Trap-Catalysis-Enhanced Metal-Nitrogen-Carbon Nanoreactors: A Universal Strategy for Accelerating Redox Kinetics in Aqueous Zn-I₂ Batteries. *Chemical Engineering Journal*, **522**, Article ID: 166895. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.166895>
- [16] Li, H., Wu, H., Liu, F., Ding, K., Wu, C., Zhang, Y., *et al.* (2024) A Novel Binder-Free Cathode Catalyst Cu@NCNF/CP with Three-Dimensional Self-Supporting Structure for Li-CO₂ Battery. *Electrochimica Acta*, **478**, Article ID: 143752. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143752>
- [17] Gao, F., Cheng, S., Huang, G., Zhang, Z., Wang, Z., Zhou, Y., *et al.* (2025) Mono-Dispersed Ultra-Long Single-Walled Carbon Nanotubes Enable the Tough, Binder-Free, and Self-Supporting Tin₂O₇ Thick Electrode for High-Rate Li-Ion Battery. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **17**, 41923-41935. <https://doi.org/10.1021/acsami.5c06097>
- [18] Cai, Y., Chen, M., Cheng, L., Hu, Z., Guo, S., Yuan, Y., *et al.* (2025) Multidimensional, Superflexible, and Binder-Free CNT-rGO/Si Buckypaper as Anodes for Lithium-Ion Batteries and Electrochemical Performance. *ACS Applied Energy Materials*, **7**, 9194-9206. <https://doi.org/10.1021/acsaeam.4c01408>
- [19] Wan, Q., Zhao, J., Liu, Y., Li, L., Yan, J., Tan, Q., *et al.* (2025) Amorphous Fep@porous Carbon Nanofibers with Sterically Conductive Networks for Stable Potassium-Ion Storage. *Nanoscale*, **17**, 10371-10379. <https://doi.org/10.1039/d5nr00116a>
- [20] Zhang, Q., Jiang, H., Liu, S., Wang, Q., Wang, J., Zhou, Z., *et al.* (2024) Redox-Targeting Catalyst Developing New Reaction Path for High-Power Zinc-Bromine Flow Batteries. *Journal of Power Sources*, **601**, Article 234286. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234286>
- [21] Liang, R., Wang, J., Zhai, Y., Ren, S., Liu, J., Jin, Y., *et al.* (2025) Synthesis of Fe-N-C Single-Atom Catalysts with a Facile Salt-Templated Strategy for Efficient and Stable Oxygen Reduction Reaction. *ACS Applied Energy Materials*, **8**, 15911-15921. <https://doi.org/10.1021/acsaeam.5c02447>
- [22] Xu, Y., Ma, Y., Chen, X., Wu, K., Wang, K., Shen, Y., *et al.* (2024) Regulating Reactive Oxygen Intermediates of Fe-N-C SAzyme via Second-Shell Coordination for Selective Aerobic Oxidation Reactions. *Angewandte Chemie*, **136**, e202408935. <https://doi.org/10.1002/ange.202408935>
- [23] Wang, Y., Jin, X., Xiong, J., Zhu, Q., Li, Q., Wang, R., *et al.* (2024) Ultrastable Electrolytic Zn-I₂ Batteries Based on Nanocarbon Wrapped by Highly Efficient Single-Atom Fe-NC Iodine Catalysts. *Advanced Materials*, **36**, Article ID: 2404093. <https://doi.org/10.1002/adma.202404093>
- [24] Zhang, Y., Gu, Y., Wang, Y., Ye, H., Li, X., Qu, S., *et al.* (2025) Protective CaSO₄-Rich Interphase in Dual-Intercalated Vanadium-Based Cathodes for Zinc-Ion Battery Performance Enhancement. *Small*, **22**, e11424. <https://doi.org/10.1002/smll.202511424>