

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.17.002

# PEDOT包覆 $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ 强化海水淡化电池除盐性能

徐东川, 李朝林, 王文辉

(哈尔滨工业大学<深圳> 土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 海水淡化电池兼具环保、节能和操作条件温和的优点,是一种极具应用潜力的下一代海水淡化技术。然而,海水淡化电池的发展受限于工作窗口合适、高除盐容量和循环稳定的储钠电极研发。为此,优化了海水淡化电池 $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ (NFP)新型储钠电极的合成温度,并进一步制备出PEDOT包覆的NFP(NFP@PEDOT)。实验表明,最优的煅烧温度为650℃,PEDOT包覆提高了电极的导电性,并抑制了NFP中铁离子的溶出。NFP@PEDOT展现出优异的海水淡化容量(即22.9 mAh/g)和循环稳定性,在100 mA/g下经历300次脱盐/再生循环后容量保持率仍可达80.8%。这提供了一种同时改善电极材料离子溶出和导电性的策略,有助于高性能海水淡化电池电极材料的研发。

**关键词:** 海水淡化; 海水淡化电池; 储钠电极; PEDOT; 磷酸铁钠

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)17-0007-08

## Synthesis of $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ and the Enhanced Desalinization Performance of $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ by PEDOT Coating

XU Dong-chuan, LI Chao-lin, WANG Wen-hui

(School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology <Shenzhen>, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Seawater desalination battery has been regarded as a promising technology for next generation seawater desalination due to its environmental friendliness, energy saving and mild operating conditions. However, its development is greatly limited by the viable Na-storage electrode materials with appropriate operating voltage windows, high desalination capacity and excellent cycle stability. Herein, the  $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$  (NFP) with different morphologies was prepared via solid state reaction with controlled calcination temperature, and PEDOT coating was employed to improve the performance of NFP. The experimental results demonstrated that 650 °C was the optimal calcination temperature and the NFP@PEDOT exhibited a high desalination capacity (22.9 mAh/g) and cycle stability (retained 80.8% of the desalination capacity after 300 cycles at 100 mA/g), which attributed to the improved conductivity and the inhibition of iron ion leaching from the electrode. This study provides a strategy to improve conductivity and the stability of electrode materials, which facilitates the development of high-performance desalination batteries.

基金项目: 深圳市高等院校稳定支持面上项目(GXWD20201230155427003-20200824094017001); 国家自然科学基金资助项目(52100084)

通信作者: 李朝林 E-mail: lichaoлин@hit.edu.cn; 王文辉 E-mail: wangwenhui@hit.edu.cn

**Key words:** seawater desalination; desalination battery; Na-storage electrode; PEDOT;  $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$

随着人口的快速增长、环境污染和气候变化,淡水资源短缺已成为当今最重大的全球挑战之一。海水淡化作为一种有效的淡水增量技术,受到了广泛关注<sup>[1]</sup>。目前,蒸馏、反渗透、电渗析和电容去离子等海水淡化技术得到了迅速发展。其中,热法蒸馏和反渗透技术已被广泛应用于海水淡化工程。然而,上述两种海水淡化技术的能耗均较高<sup>[2-4]</sup>。另外,热法蒸馏技术还存在换热管和蒸发设备腐蚀的问题<sup>[5]</sup>,反渗透技术则由于膜污染而需要定期维护和更换,导致其成本较高<sup>[6]</sup>。电容去离子是通过在两个电容型电极之间施加电压吸附去除钠离子和氯离子,短路或反向电压的方法可以实现电极再生及能量回收,该技术兼具节能、环保和操作简单等优势。电容材料(通常为碳材料)除盐容量低( $10 \sim 15 \text{ mg/g}$ )<sup>[7]</sup>,导致电容去离子海水淡化技术的除盐效率较低,只能对浓度低于  $25 \text{ mmol/L}$ (即低于  $1\,460 \text{ mg/L}$ )的海水实现有效淡化。另外,电容型电极普遍存在较严重的自放电,导致电容去离子海水淡化技术能源利用率较低<sup>[1,8]</sup>。

近年来,研究者提出利用除盐能力更高的法拉第电极取代除盐能力低的电容型电极,构建具有更高除盐能力和能量利用率的海水淡化电池<sup>[9]</sup>。海水淡化电池通过两个电极材料的氧化还原反应实现对钠离子和氯离子的捕获,因此高容量和稳定性优异的储钠和储氯电极材料的研发是其关键。如今,储氯电极如  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ <sup>[10]</sup>和  $\text{Bi}/\text{BiOCl}$ <sup>[11]</sup>已被广泛研究并取得不错的海水淡化性能,例如银/氮-碳<sup>[12]</sup>储氯电极的除盐容量为  $34.5 \text{ mAh/g}$ ( $1 \text{ mAh}=3.6 \text{ C}$ )。对于储钠电极材料, $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ <sup>[13]</sup>、 $\text{Na}_{0.44}\text{MnO}_2$ <sup>[14]</sup>、 $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$ <sup>[15]</sup>和  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ <sup>[16]</sup>等被应用于海水淡化电池。但目前已报道的海水淡化电池储钠电极材料普遍存在副反应多、淡化容量低、稳定性差和潜在环境污染等问题。 $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ (NFP)具有环境友好、价格低廉、元素来源丰富和理论容量高等优势<sup>[17]</sup>,适合大规模生产,是一种极具应用潜力的储钠候选材料之一。NFP作为水系钠离子电池正极,在低倍率( $10 \text{ C}$ )条件下展现了较高的比容量( $60 \text{ mAh/g}$ )和良好循环稳定性(在  $100 \text{ C}$  循环使用

$1\,000$ 次后仍能维持 $61\%$ 的比容量)<sup>[18]</sup>。然而,关于NFP在海水淡化电池中的研究甚少,其基础性能及可能存在的问题并不清晰。

本研究分别通过优化NFP的煅烧温度和使用不同质量比例的聚乙烯二氧噻吩(PEDOT)进行包覆,获得了不同PEDOT含量包覆的NFP,并考察了PEDOT质量比例变化对NFP除盐容量、循环稳定性、倍率性能和电化学阻抗的影响;分析了NFP和PEDOT包覆NFP海水淡化系统中铁离子浓度,研究PEDOT包覆对NFP铁离子溶出的抑制效果;最后评估了氯化钠浓度变化对PEDOT包覆的NFP海水淡化性能的影响,以期同时改善储钠电极材料容量和稳定性提供一种策略,并有助于高性能海水淡化电池储钠电极材料的开发。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

实验中使用去离子水配制溶液,用到的化学药品为分析纯,分别为硝酸铁九水合物、硝酸钠、磷酸二氢铵、柠檬酸、3,4-乙烯二氧噻吩(EDOT)、盐酸、过硫酸铵和乙醇等,均购自阿拉丁试剂有限公司。

### 1.2 NFP储钠电极材料制备

#### 1.2.1 NFP的制备

NFP的合成过程参考之前报道的方法并进行适当调整<sup>[18]</sup>,具体如下:将  $8.08 \text{ g}$  硝酸铁九水合物、 $2.5497 \text{ g}$  硝酸钠、 $3.4509 \text{ g}$  磷酸二氢铵依次加入装有  $50 \text{ mL}$  去离子水中的烧杯中,通过机械搅拌使其全部溶解,而后向烧杯中缓慢加入  $14.409 \text{ g}$  柠檬酸并充分搅拌。接着  $60^\circ\text{C}$  加热,待烧杯内溶液全部蒸发后将其放置在  $120^\circ\text{C}$  烘箱中彻底烘干,将烘干的凝胶研磨后放置马福炉中  $650^\circ\text{C}$  保持  $12 \text{ h}$ ,升温速率为  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ,待马福炉冷却后取出研磨,再放置马福炉中  $650^\circ\text{C}$  保持  $12 \text{ h}$ ,升温速率为  $5^\circ\text{C}/\text{min}$ ,记为 NFP- $650^\circ\text{C}$ 。按照同样方法制备样品 NFP- $450^\circ\text{C}$ 、NFP- $550^\circ\text{C}$  和 NFP- $750^\circ\text{C}$ 。

#### 1.2.2 PEDOT包覆NFP的制备

将  $150 \mu\text{L}$  的 3,4-乙烯二氧噻吩(EDOT)单体加入到装有  $40 \text{ mL}$ 、 $0.1 \text{ mol/L}$  盐酸的烧杯中搅拌  $0.5 \text{ h}$ ,而后将  $0.2 \text{ g}$  NFP- $650^\circ\text{C}$  加入到上述混合液中超

声10 min,形成均匀悬浮液。接着加入0.1 g过硫酸铵,剧烈搅拌10 h以促进EDOT聚合形成PEDOT包覆NFP-650 °C,而后用去离子水和乙醇多次洗涤沉淀物。在上述步骤中,过硫酸铵是促进3,4-乙烯二氧噻吩(EDOT)单体聚合形成聚乙烯二氧噻吩(PEDOT)的引发剂<sup>[19]</sup>。最后将沉淀物放置在烘箱中60 °C加热彻底干燥,得到样品NFP@PEDOT-2。样品NFP@PEDOT-1和NFP@PEDOT-3制备过程中加入的EDOT体积分别为100  $\mu\text{L}$ 和300  $\mu\text{L}$ ,其他制备条件与NFP@PEDOT-2一致。

### 1.3 材料表征

通过X射线衍射(XRD)确定材料的晶体结构,工作电压和电流分别为40 kV和25 mA,扫描速度和范围分别为4 (°)/min和10°~80°。材料的微观结构和EDS图谱通过冷场发射扫描电子显微镜(SEM)获得。

### 1.4 性能测试与分析方法

样品的电化学性能测试通过三电极体系在电化学工作站(CS350H)上完成,若无特殊说明,扫描速率为1 mV/s,采用1 mol/L的氯化钠溶液作为电解液。为了评估样品的海水淡化容量和稳定性,在充放电测试仪上使用三电极体系完成了电极的恒电流充电和放电测试,电压范围为-0.6~0.5 V(相对于Ag/AgCl),若无特殊说明,电流密度为100 mA/g,电解液为1 mol/L的氯化钠溶液。对于三电极体系,工作电极、对电极和参比电极分别为NFP电极、炭黑电极和银/氯化银电极。

电极材料的比容量(除盐容量)可以通过式(1)获得<sup>[20]</sup>:

$$C = \frac{I \times t}{m_{\text{active}}} \quad (1)$$

式中: $C$ 、 $I$ 、 $t$ 和 $m_{\text{active}}$ 分别是除盐容量(mAh/g)、施加电流(mA)、时间(h)和NFP质量(g)。

电极材料的库仑效率可由式(2)计算<sup>[21]</sup>:

$$\text{库仑效率} = \frac{C_{\text{id}}}{C_{\text{ic}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $C_{\text{id}}$ 和 $C_{\text{ic}}$ 分别是 $i$ 次充电和放电过程中的比容量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 NFP表征及性能分析

#### 2.1.1 NFP晶体结构及形貌

首先利用XRD衍射技术分析了所制备样品的

晶体结构,结果表明:在煅烧温度为450、550、650和750 °C下制得样品的衍射峰与NFP匹配良好,说明4种温度下都可以制备出NFP。随着煅烧温度升高,样品的衍射峰强度变化不大,意味着煅烧温度对制得样品的结晶度影响很小。

图1(a)为不同NFP样品的微观形貌结构。可以发现,随着制备温度的升高,NFP颗粒尺寸逐渐增大,且形貌由片状转化为块状,450、550、650 °C制得的NFP呈片状,750 °C煅烧获得的NFP为块状。此外,由图1(b)可知,NFP-650 °C由均匀分布的钠、铁、磷和氧元素组成。

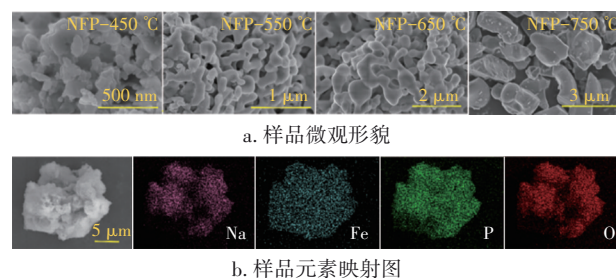


图1 不同NFP样品的微观形貌和NFP-650 °C元素映射图

Fig.1 SEM images of different NFPs and element mapping spectra of NFP-650 °C

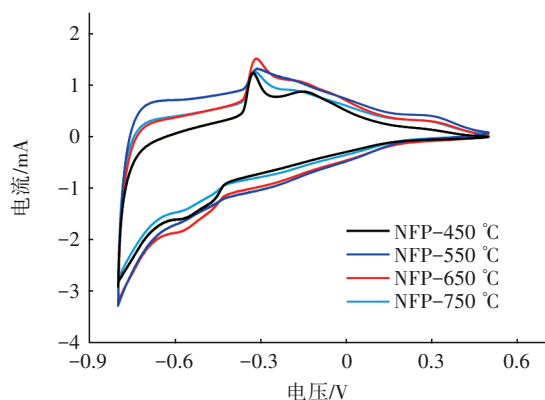
#### 2.1.2 NFP电化学与除盐性能分析

图2(a)为不同煅烧温度的NFP循环伏安曲线,可以发现样品的氧化峰和还原峰比较接近,说明制备温度对NFP的氧化还原电位影响较小。如图2(b)所示,NFP-450 °C、NFP-550 °C、NFP-650 °C和NFP-750 °C在100 mA/g电流密度下的海水淡化初始容量分别为12.5、16.2、18.3、13.7 mAh/g。假设容量均来源于脱盐过程,NFP-650 °C对应的除盐容量高达39.9 mg/g(通过NFP的海水淡化容量18.3 mAh/g乘以二者换算系数2.18 mg/mAh获得),远高于常规电容去离子的脱盐能力(即10~15 mg/g)<sup>[22]</sup>。然而,由图2(c)可知,随着钠离子嵌入和脱出循环次数的增大,4种NFP的海水淡化容量都表现出先显著下降而后逐渐平稳的趋势,但NFP-650 °C始终具有最高的海水淡化容量。NFP-650 °C在经历50个循环后的容量保持率为75.4%。由图2(d)可知,NFP具有良好的倍率性能,并且NFP-650 °C的海水淡化容量始终高于其他煅烧温度下制得的NFP,因此650 °C为NFP海水淡化性能最优的煅烧温度。

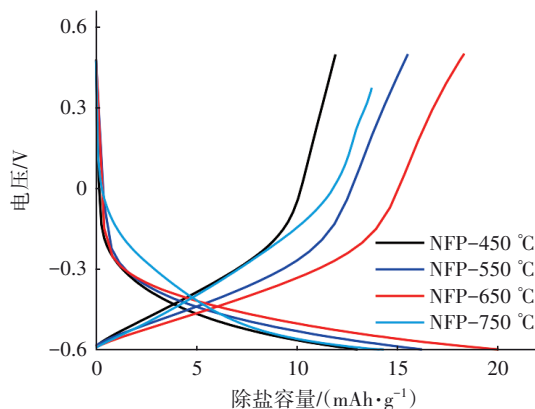
由于海水盐溶液对电极材料往往具有较强的腐蚀作用,因此为了探究NFP容量衰减的原因,以



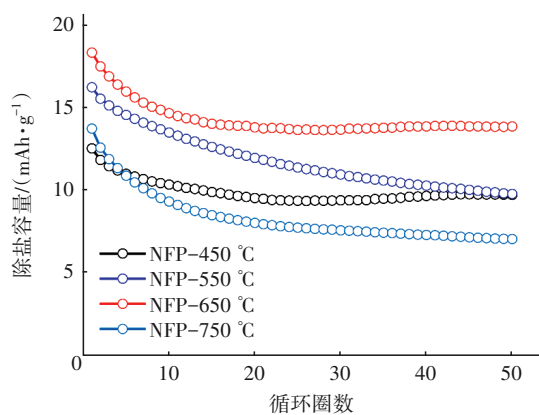
NFP-650 °C材料为例测定了海水淡化电池电解液中的铁离子浓度。结果显示,在经历50个循环后,电解液中铁离子的浓度为0.15 mg/L,说明NFP-650 °C在脱盐和盐化过程中存在铁离子溶出导致其容量衰减的现象。另外,NFP的导电性较差也是导致其稳定性较差的原因<sup>[17]</sup>。基于上述分析可知,NFP是高性能海水淡化电池理想的储钠电极材料候选者之一,然而NFP导电性差和铁离子溶出制约了其工程应用。为了解决上述问题,拟采用导电性优异的PEDOT聚合物对NFP进行包覆改性。



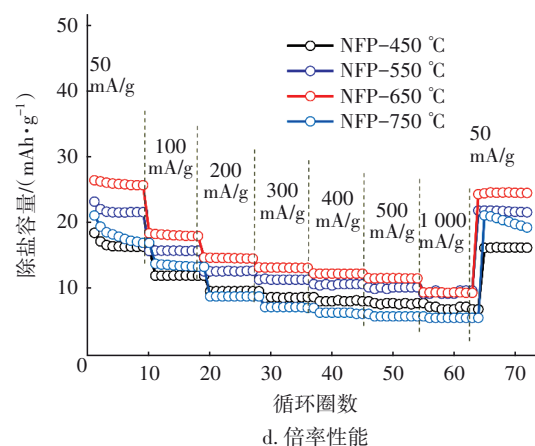
a. 循环伏安曲线



b. 初始除盐容量



c. 循环稳定性



d. 倍率性能

图2 不同NFP的电化学与海水淡化性能

Fig.2 Electrochemical and desalination performance of different NFPs

## 2.2 PEDOT 包覆 NFP 表征及性能分析

### 2.2.1 PEDOT 包覆 NFP 晶体结构及形貌

不同质量 PEDOT 包覆 NFP 的 XRD 图谱显示, PEDOT 包覆不影响 NFP 的晶体结构。由 SEM 图像 (见图3)可知, PEDOT 膜成功地包覆在了 NFP 表面, 且随着 PEDOT 比例的增加, 分散的片状 NFP-650 °C 被连接在一起形成了一个整体。

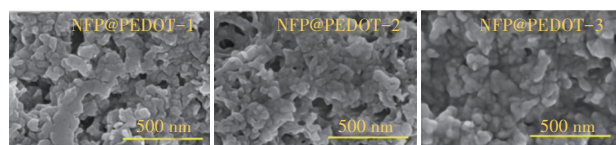
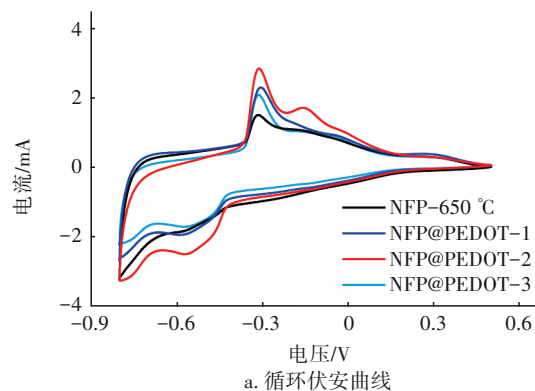


图3 PEDOT 包覆的 NFP 样品的 SEM 图像

Fig.3 SEM of PEDOT-coated NFP

### 2.2.2 PEDOT 包覆 NFP 电化学性能分析

不同 NFP 的循环伏安曲线见图4(a), 可知氧化还原电位并未发生明显变化, 说明 PEDOT 包覆不会显著改变 NFP 的氧化还原电位。此外, 还可以发现 NFP@PEDOT-2 的循环伏安电流整体上高于其他三种 NFP 样品, 说明其导电性最优。



a. 循环伏安曲线

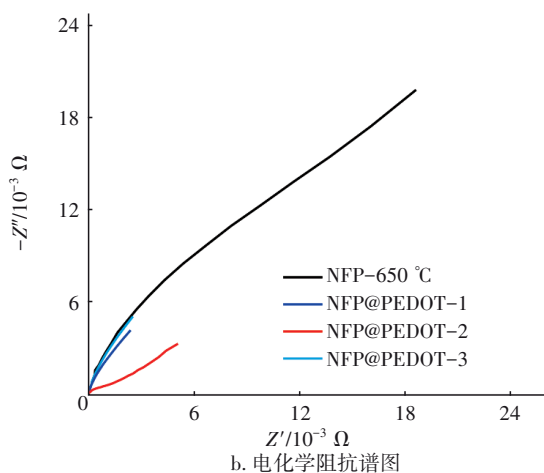


图4 PEDOT包覆的NFP的循环伏安曲线和电化学阻抗谱图  
Fig.4 Cyclic voltammetry and electrochemical impedance spectra of PEDOT-coated NFP

如图4(b)所示, PEDOT包覆NFP的电荷转移阻抗明显小于NFP-650 °C, 而且电阻随着PEDOT比例的增加先减少后增大, 其中NFP@PEDOT-2电阻最小。这说明PEDOT可以降低NFP电极的电荷传输电阻, 但过多的PEDOT包覆可能会阻碍钠离子迁移, 从而不利于电荷传输电阻的降低。

### 2.2.3 PEDOT包覆NFP除盐性能分析

PEDOT包覆NFP的海水淡化性能见图5。

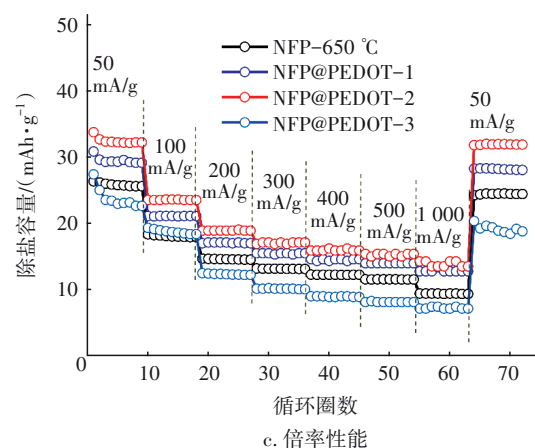
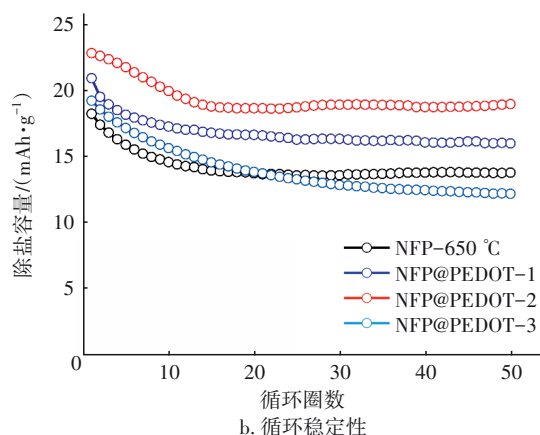
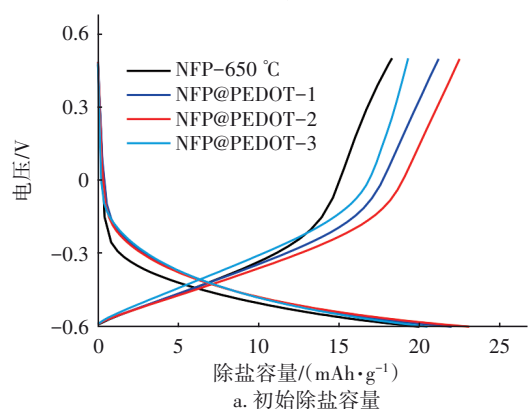


图5 PEDOT包覆的NFP的海水淡化性能

Fig.5 Desalination performance of PEDOT-coated NFP

如图5(a)所示, 对于PEDOT包覆的NFP, 其初始海水淡化容量均高于NFP-650 °C, 说明PEDOT包覆可以通过增强NFP的电荷传递性能来提高其海水淡化容量; NFP的初始海水淡化容量随着PEDOT比例的增加先提高后降低, 其中NFP@PEDOT-2具有最高的海水淡化容量(22.9 mAh/g)。此外, 由图5(b)可知, 随着海水淡化和盐化循环次数的增加, NFP@PEDOT的海水淡化容量呈先下降后趋于稳定的变化趋势, NFP@PEDOT-1和NFP@PEDOT-2的海水淡化容量始终高于NFP-650 °C, 而且以NFP@PEDOT-2尤为明显。NFP@PEDOT-2电极循环50次后的除盐容量为19.0 mAh/g, 为NFP-650 °C电极(13.8 mAh/g)的1.4倍。此外, PEDOT包覆对NFP库仑效率影响不大, 随着充放电循环次数的增多, 库仑效率也未发生明显变化。由图5(c)可知, 适量PEDOT包覆也能较好地提高NFP电极的倍率性能。在不同电流密度下, NFP@PEDOT-2的除盐容量始终远高于NFP-650 °C的除盐容量。

根据钠离子电池的报道可知<sup>[18]</sup>, NFP中的钠离子嵌入和脱出是通过 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 之间的相互转化实现的, 因此抑制NFP中铁离子溶出对于维持海水淡化除盐容量稳定至关重要。为了分析NFP-650 °C和NFP@PEDOT-2电极在充电和放电过程中铁离子溶出情况, 使用邻菲罗啉分光光度法<sup>[23]</sup>测试了裸露NFP和有包覆层保护的NFP@PEDOT-2电极完成不同海水淡化和盐化循环后溶液中的铁离子浓度, 结果如图6所示。随着海水淡化和盐化循环次数的增多, NFP-650 °C和NFP@PEDOT-2电极所在盐水中铁离子的浓度都逐渐提高, 说明充电和放电过程均

存在铁离子溶出问题。但是,相比于对应循环次数的NFP@PEDOT-2电极,NFP-650℃电极所在盐水中铁离子浓度始终较高,说明PEDOT能有效抑制NFP中铁离子在海水淡化和盐化过程中的溶出。

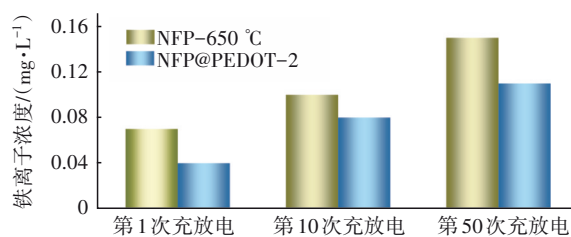


图6 NFP-650℃和NFP@PEDOT-2电极充放电过程中铁离子浓度变化

Fig.6 Concentration of Fe ion of NFP-650℃ and NFP@PEDOT-2 during charge and discharge process

### 2.3 NaCl 浓度影响及长循环稳定性分析

图7展示了氯化钠浓度对基于NFP@PEDOT-2电极的海水淡化电池海水淡化容量的影响。可以看出,在氯化钠浓度为0.3、0.5、0.7和1.0 mol/L时初始海水淡化容量分别为20.0、21.5、22.0、22.9 mAh/g,说明NFP@PEDOT-2可以对不同浓度的海水实现脱盐淡化。

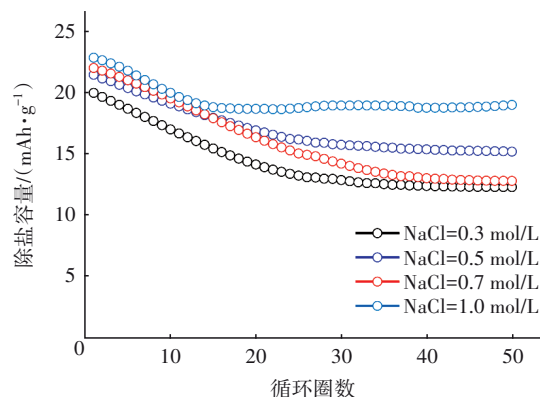


图7 电流密度为100 mA/g时氯化钠浓度对NFP@PEDOT-2除盐容量的影响

Fig.7 Effect of NaCl concentration on specific capacity of NFP@PEDOT-2 at 100 mA/g

另一方面,随着盐浓度降低,海水淡化容量呈现逐渐下降的趋势,说明电解质的电导率降低不利于NFP@PEDOT-2海水淡化电极除盐性能的发挥,因而将该电极用于反渗透浓盐水的处理将能发挥更大的潜力。在未来的研究中可以考虑开展反渗透海水淡化-电池去离子海水淡化的组合工艺研究,提高出水比率的同时降低能耗。此外,进一步

评估了海水淡化电池的长循环稳定性:NFP@PEDOT-2电极经历300次淡化和盐化循环后,海水淡化容量保持率仍高达80.8%,库仑效率稳定且高达96.2%,展现了较好的应用潜力。

### 2.4 海水淡化过程分析

为了分析磷酸铁钠电极材料的海水淡化/盐化过程,测试了NFP@PEDOT-2电极在充放电过程中的盐水电导率演变行为,结果如图8所示。

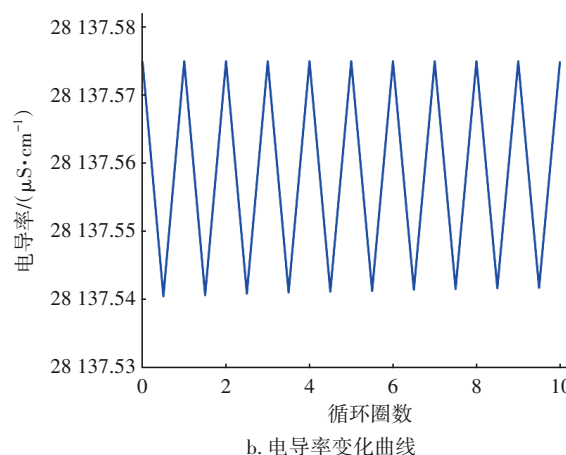
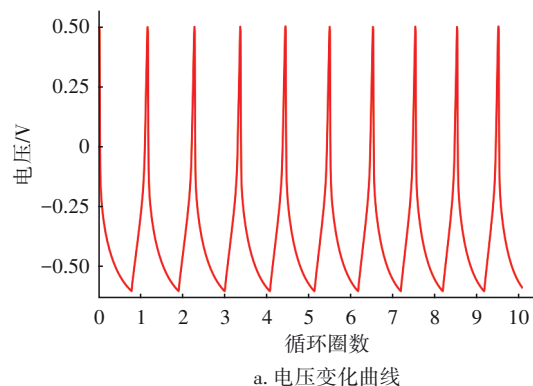


图8 NFP@PEDOT-2充放电过程电压和电导率变化

Fig.8 Voltage and conductivity change of NFP@PEDOT-2 during charge and discharge process

放电过程中电解质电导率逐渐下降,说明钠离子嵌入NFP@PEDOT-2电极材料,证实体系能实现对盐的有效去除。随着充电过程的进行,电解质电导率逐渐升高,意味着有钠离子从NFP@PEDOT-2电极材料中脱出进入本体盐溶液。因此,基于磷酸铁钠电池放电过程本体盐溶液中的钠离子嵌入电极材料,充电过程伴随钠离子从电极材料的脱出进入本体盐溶液,从而实现海水的淡化和盐化。

综上,本研究提出了PEDOT包覆NFP提高海水淡化容量和稳定性的可能机理(见图9)。基于NFP

的海水淡化电池在淡化和盐化过程中经历以下过程:本体溶液中的 $\text{Na}^+$ 扩散到电极附近并嵌入NFP,同时伴随着 $\text{Fe}^{3+}$ 被还原为 $\text{Fe}^{2+}$ ,从而实现海水淡化; $\text{Na}^+$ 从NFP电极脱出并进入本体溶液进而实现盐化过程,同时 $\text{Fe}^{2+}$ 被氧化为 $\text{Fe}^{3+}$ 。适量的PEDOT包覆片状NFP,一方面可以提高NFP的导电性,从而促进NFP中 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 之间的转化程度,提升海水淡化容量;另一方面可以抑制NFP中铁离子的溶出,提高NFP在海水淡化中的循环稳定性。

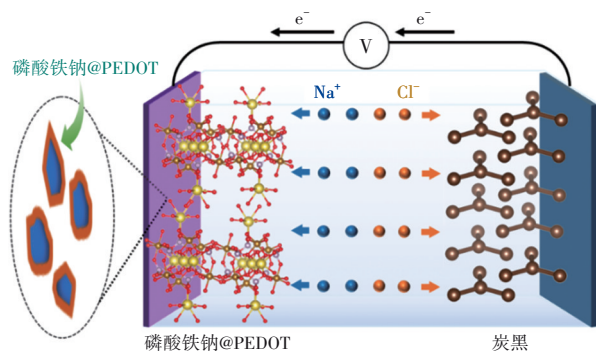


图9 PEDOT包覆磷酸铁钠提高除盐容量和循环稳定性的机理

Fig.9 Mechanism of PEDOT-coated NFP enhancing specific capacity and cycle performance

### 3 结论

① 采用高温固相法合成NFP,最优的煅烧温度为 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,NFP@PEDOT展现出优异的海水淡化容量(即 $22.9\text{ mAh/g}$ )和循环稳定性(在 $100\text{ mA/g}$ 下经历300次脱盐/再生循环后的容量保持率为80.8%)。

② PEDOT包覆NFP改善海水淡化性能的原因可以归结为PEDOT包覆一方面可以提高NFP的电荷转移能力,另一方面可以抑制NFP中铁离子的溶出。这为同时提高储钠电极材料除盐容量和稳定性提供了一种策略,有助于开发海水淡化性能优异的储钠电极材料。

### 参考文献:

[1] 郝晓地,王邦彦,曹达启,等. 海水淡化工程全球大规模应用发展趋势[J]. 中国给水排水,2022,38(10):18-24.  
HAO Xiaodi, WANG Bangyan, CAO Daqi, *et al.* Global trend of desalination towards large-scale engineering application [J]. China Water &

Wastewater, 2022, 38(10):18-24(in Chinese).

- [2] ZHOU Y, TOL R S J. Evaluating the costs of desalination and water transport [J]. Water Resources Research, 2005, 41(3):3003-3012.
- [3] VEERAPANENI S, LONG B, FREEMAN S, *et al.* Reducing energy consumption for seawater desalination [J]. Journal of American Water Works Association, 2007, 99(6):95-101.
- [4] 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.
- [5] NTAVOU E, KOSMADAKIS G, MANOLAKOS D, *et al.* Experimental evaluation of a multi-skid reverse osmosis unit operating at fluctuating power input [J]. Desalination, 2016, 398:77-86.
- [6] RALUY G, SERRA L, UCHE J. Life cycle assessment of MSF, MED and RO desalination technologies [J]. Energy, 2006, 31(13):2361-2372.
- [7] YU F, WANG L, WANG Y, *et al.* Faradaic reactions in capacitive deionization for desalination and ion separation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(27):15999-16027.
- [8] 王祺,房阔,贺聪慧,等. 流动电极电容去离子技术综述:研究进展与未来挑战[J]. 化工学报,2022,73(3):975-989.  
WANG Qi, FANG Kuo, HE Conghui, *et al.* Recent development and future challenges of flow-electrode capacitive deionization [J]. CIESC Journal, 2022, 73(3):975-989(in Chinese).
- [9] XIONG Y C, YU F, MA J. Research progress in chlorine ion removal electrodes for desalination by capacitive deionization [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2022, 38(5):2006037.
- [10] 祝明月. 海水淡化电池银/碳储氯电极的制备与性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.  
ZHU Mingyue. Preparation and Performance of Silver/Carbon Chlorine Storage Electrode for Desalination Batteries [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020(in Chinese).
- [11] NAM D H, CHOI K S. Bismuth as a new chloride-storage electrode enabling the construction of a practical high capacity desalination battery [J]. Journal of the American Chemical Society, 2017, 139(32):11055-11063.



- [12] HE Y J, HUANG L, ZHAO Y X, *et al.* A new synthesized highly-stable Ag/N-carbon electrode for enhanced desalination by capacitive deionization [J]. *Environmental Science: Nano*, 2020, 7:3007–3019.
- [13] TANG X, LIU H, SU D W, *et al.* Hierarchical sodium-rich Prussian blue hollow nanospheres as high-performance cathode for sodium-ion batteries [J]. *Nano Research*, 2018, 11(8):3979–3990.
- [14] CHEN F, HUANG Y X, GUO L, *et al.* A dual-ion electrochemistry deionization system based on AgCl- $\text{Na}_{0.44}\text{MnO}_2$  electrodes [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(28): 10101–10108.
- [15] HUANG Y X, CHEN F M, GUO L, *et al.* Low energy consumption dual-ion electrochemical deionization system using  $\text{NaTi}_2(\text{PO}_4)_3$ -AgNPs electrodes [J]. *Desalination*, 2019, 451:241–247.
- [16] ZHU C B, SONG K P, VAN AKEN P A, *et al.* Carbon-coated  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  embedded in porous carbon matrix: an ultrafast Na-storage cathode with the potential of outperforming Li cathodes [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(4):2175–2180.
- [17] WANG S Y, GAO N B, WANG G, *et al.* Three-dimensional hierarchical  $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3/\text{C}$  with superior and fast sodium uptake for efficient hybrid capacitive deionization [J]. *Desalination*, 2021, 520:115341.
- [18] QIU S, WU X Y, WANG M Y, *et al.* NASICON-type  $\text{Na}_3\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$  as a low-cost and high-rate anode material for aqueous sodium-ion batteries [J]. *Nano Energy*, 2019, 64:103941.
- [19] ZHUANG A, PAN Q C, QIAN Y, *et al.* Transparent conductive silk film with a PEDOT-OH nano layer as an electroactive cell interface [J]. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2021, 7(3):1202–1215.
- [20] SRIMUK P, HUSMANN S, PRESSER V. Low voltage operation of a silver/silver chloride battery with high desalination capacity in seawater [J]. *RSC Advances*, 2019, 9(26):14849–14858.
- [21] YOON H, LEE J, KIM S, *et al.* Hybrid capacitive deionization with Ag coated carbon composite electrode [J]. *Desalination*, 2017, 422:42–48.
- [22] CHEN F M, HUANG Y X, GUO L, *et al.* Dual-ions electrochemical deionization: a desalination generator [J]. *Energy & Environmental Science*, 2017, 10(10): 2081–2089.
- [23] QIANG Z M, CHANG J H, HUANG C P. Electrochemical regeneration of  $\text{Fe}^{2+}$  in Fenton oxidation processes [J]. *Water Research*, 2003, 37(6): 1308–1319.

作者简介:徐东川(1980—),男,山东武城人,博士研究生,主要从事海水淡化电池研究。

E-mail:15161777@qq.com

收稿日期:2022-07-10

修回日期:2022-07-26

(编辑:李德强)

像保护眼睛一样保护生态环境,  
像对待生命一样对待生态环境