

电感耦合等离子体处理 $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ 电极及其电化学性能研究

储建军^{1,2}, 梁吉轲², 李可可², 孟旭², 杨永博^{1,2}, 方世东^{2*}

(1. 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽合肥 230601;
2. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031)

摘要: 通过水热法在泡沫镍上合成了 $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ 电极材料, 在 1 A/g 的电流密度下, 其比电容为 $1\ 112\text{ F/g}$ 。为提高 $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ 电极的电化学性能, 采用电感耦合等离子体进行表面处理。结果显示, 处理后的 $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ 微观形态由光滑的片状结构变为粗糙的蜂窝状球形, 在 1 A/g 的电流密度下, 比电容为 $1\ 842\text{ F/g}$, 提升了 66%。

关键词: 电极; 电感耦合等离子体; 表面改性; 双金属氢氧化物

中图分类号: TB321; TM53

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2025)05-0223-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.05.037

Inductively coupled plasma-modified $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ electrode and its electrochemical performance

CHU Jian-jun^{1,2}, LIANG Ji-ke², LI Ke-ke², MENG Xu², YANG Yong-bo^{1,2}, FANG Shi-dong^{2*}

(1. Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ electrode material is synthesized on nickel foam via hydrothermal method. The specific capacitance of the electrode material is $1\ 112\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at a current density of $1\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$. In order to improve the electrochemical performance of $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ electrode, its surface is treated by inductively coupled plasma. The results show that the microstructure of the treated $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ changes from a smooth flake structure to a rough honeycomb sphere, and the specific capacitance reaches $1\ 842\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at a current density of $1\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$, which represents an increase of 66%.

Key words: electrode; inductively coupled plasma; surface modification; bimetallic hydroxides

在可再生能源技术快速发展的同时,对高效、稳定的能量储存和转换系统的需求日益增长^[1-2]。作为一种介于传统电容器与电池之间的储能装置,超级电容器因其功率密度大、循环寿命长、充放电速度快等特点而广受关注^[3-4],电极材料作为超级电容器性能的决定性因素,其开发和优化一直是研究的热点^[5-7]。

层状双氢氧化物(LDHs)因为具有比表面积大、成本低、组分可调以及能量密度高等优势,是一种很有前途的超级电容器电极材料^[8-10]。然而,LDHs作为电极材料,在实际应用中仍面临一些问题,如:理论比容量存在上限,难以实现大幅度突破;电化学反应进程中伴随的晶粒体积变化,导致材料循环稳定性下降;电荷转移率不理想等^[11-12]。

电感耦合等离子体(ICP)是一种在高频电磁场作用下产生的等离子体状态^[13]。ICP的产生机制

依赖于高频电磁场通过感应线圈时,对内部填充气体(如氩气、氮气等)产生的电离效应。当线圈中的高频电流产生交变磁场时,气体分子在交变磁场作用下剧烈碰撞并电离,形成富含电子、离子和激发态原子的等离子体区域。得益于其高效的电磁耦合方式,ICP空间均匀性好,这有助于提高等离子体处理的均一性^[14]。ICP技术作为一种先进的材料表面处理技术,通过在低气压下产生高能量的等离子体,能够对材料表面进行有效的激活和改性。ICP技术的应用可以显著改善材料的表面能、化学组成和微观结构,从而提高电极材料的电化学性能^[15]。

本文通过水热法制备 $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ 电极材料,然后采用氮气 ICP 对其进行表面特性的优化,以提高其电化学活性和稳定性,进而提升超级电容器的整体性能。并通过对其进行物理表征和电化学性能测试,探究等离子体处理电极材料的可行性。

收稿日期:2024-08-26;修回日期:2025-03-06

作者简介:储建军(1999-),男,硕士生,研究方向为低温等离子体应用,jiianchu@163.com;方世东(1975-),男,副研究员,研究方向为低温等离子体应用、等离子体炬研制、热等离子体裂解煤制乙炔,通讯联系人,fangsd@ipp.ac.cn。

1 材料与试剂

1.1 实验材料

除盐酸(ACS级,37%)外,其余化学品均为分析级,所有化学品均无需进一步提纯。泡沫镍由东莞科路得创新科技有限公司提供;盐酸、六水合硝酸镍、六水合硝酸锌、尿素、氟化铵、氢氧化钾由阿拉丁化学试剂有限公司生产。

1.2 实验设备

ICP装置;利用Zeiss G500型SEM扫描电镜对材料表面形貌进行表征;利用Ultima IV型X射线衍射仪分析材料的组成;Thermo Scientific TM K-Alpha TM+型X射线光电子能谱仪用于表面元素组成和化学态的分析;用ASAP 2460型BET分析材料晶粒的大小、分布及材料的孔结构;电化学测试在上海辰华CHI760E型电化学工作站上完成。

2 实验方法

2.1 $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ 制备

采用水热法直接在泡沫镍基底上生长 $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ 。泡沫镍的处理如下:先浸入3 mol/L盐酸中超声清洗30 min,然后在无水乙醇中超声清洗15 min,最后在超纯水中超声清洗15 min,放于干燥箱中60℃干燥6 h。配制3 mmol六水合硝酸镍、6 mmol六水合硝酸锌、9 mmol氟化铵、12 mmol尿素的混合溶液70 mL,搅拌30 min。将上述溶液和处理后的泡沫镍一同转移到内衬为70 mL的特氟龙不锈钢高压中,130℃水热5 h。水热结束后,将泡沫镍取出,使用纯水反复冲洗,再将制得的样品置于60℃干燥箱中烘干,得到自支撑的 $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ 电极,记为NZ,NZ在泡沫镍上的负载质量约为1~1.8 mg/cm²。

2.2 等离子体处理

使用的ICP设备是自行搭建的,装置由真空系统和ICP激发系统两部分组成。真空系统由气源、真空泵、质量流量控制器、真空计以及由石英管构建的真空腔室组成。ICP激发系统由射频电源、匹配器和缠绕在石英管上的铜线圈组成。其中射频电源和匹配器均来自中国科学院微电子研究所。首先将NZ样品置于石英管中线圈的正中心。随后打开氮气气瓶,调节减压阀至合适的压力,再调节氮气质量流量计,使氮气流速稳定在50 sccm,然后再打开机械泵,将石英管内抽真空,直至石英管内气体压强达到25 Pa后,打开射频电源,功率设定为80 W。

对样品进行240 s的等离子体处理,样品记为P-NZ。

2.3 电化学性能测试

电化学测试采用标准三电极测试体系,其中参比电极为汞/氧化汞电极,对电极为1 cm×1 cm的铂片电极,将样品裁为1 cm×1 cm的大小以用作工作电极,电解液选用浓度为3 mol/L的KOH水溶液。主要测试方法为循环伏安法、恒流充放电测试以及电化学阻抗测试。

在实际的测试过程中,通过改变给定的电流密度,即可得到一系列的充放电曲线,然后利用公式计算电极材料的比电容。

$$C_s = (I \times \Delta t) / (m \times \Delta V)$$

式中: C_s 为电极材料的比电容,F/g; I 为充放电电流,A; Δt 为放电时间,s; ΔV 为工作电位窗口,V; m 为电极材料的质量,g。

3 结果与分析

3.1 组成与结构表征

3.1.1 XRD分析

通过XRD对NZ、P-NZ进行了物相与晶体结构分析,如图1所示。其中44.0°、76.0°为泡沫镍基底的衍射峰,分别对应于镍(JCPDF#89-7128)的(111)、(220)晶面;位于33°、38.5°、52.1°、59°、62.7°的峰,对应 $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ (PDF#01-073-6824)的(100)、(011)、(012)、(110)和(111)晶面。这表明通过水热法成功于泡沫镍上合成了 $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ 。此外经过ICP处理之后,峰的位置没有发生偏移,但是在19.2°出现了新的峰,此峰对应 $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ (PDF#01-073-6824)的(001)晶面,并且各个衍射峰均出现强度上升的现象,这表明经过ICP处理, $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ 样品表面结晶度提高。

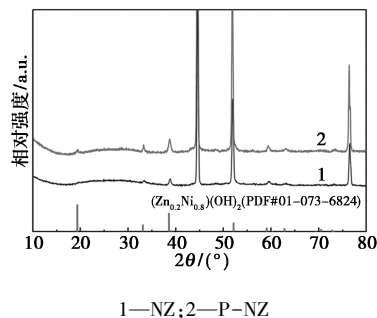


图1 NZ、P-NZ的XRD谱图

3.1.2 SEM分析

图2为NZ、P-NZ的SEM图。从图2(a)中可

以看出,NZ 呈片状结构,表面光滑平整,片状直径在 200 nm 以上,并且在泡沫镍上无规则性地垂直生长,片与片之间杂乱并紧密相连。相比于未处理过的样品,在 P-NZF 中能清楚地看出片状($Zn_{0.2}Ni_{0.8}$)(OH)₂ 材料团聚成了具有蜂窝状的球形,球形大小规则均匀且球与球之间相互连接,球形表面的片状结构变得粗糙,具有很多孔洞。从微观结构来看,经过 ICP 处理后, ($Zn_{0.2}Ni_{0.8}$)(OH)₂ 具有更大的比表面积和孔隙率,可以为电化学反应提供更多的反应活性位点,从而提高电极材料的电化学性能。

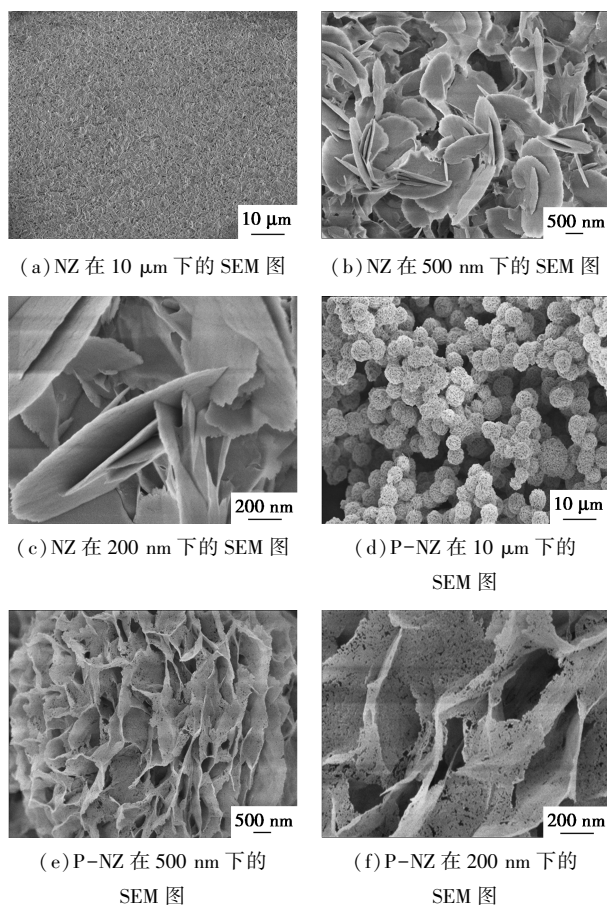


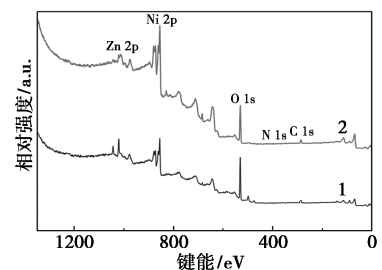
图 2 NZ、P-NZ 的 SEM 图

3.1.3 XPS 分析

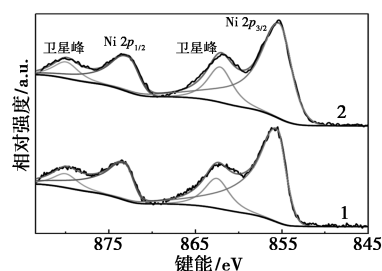
使用 XPS 对样品 NZ、P-NZ 的元素价态分布进行分析,结果如图 3 所示。图 3(a) 是 XPS 全谱,从全谱中可以明显观察到 Ni 2p、Zn 2p、O 1s、N 1s 的峰,揭示了材料含有 Ni、Zn、O、N 元素,但是并未清楚地观察到 N 1s 的峰。

随后通过 Avantage 软件对 Ni 2p、Zn 2p、O 1s、N 1s 进行了分峰拟合。如图 3(b) 所示,在 Ni 2p 的精细谱中观察到位于 855.6、862.5、873.2 eV 和 880.0 eV 的 4 个峰。其中结合能为 855.6 eV 和 873.2 eV 的两个峰分别对应于 Ni 2p_{3/2} 和 Ni 2p_{1/2} 的

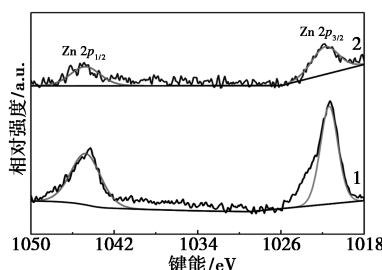
自旋轨道,其中 17.6 eV 自旋分离能对应于 Ni²⁺ 状态,而 862.5 eV 和 880.0 eV 的两个峰分别是 Ni 2p_{2/3} 和 Ni 2p_{1/2} 的卫星峰^[16]。



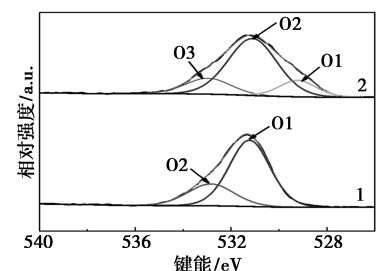
(a) XPS 全谱



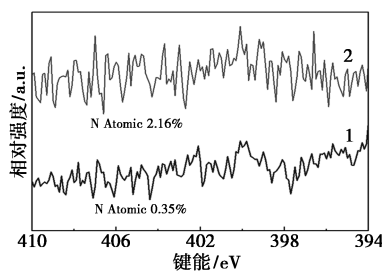
(b) Ni 2p



(c) Zn 2p



(d) O 1s



(e) N 1s

1—NZ; 2—P-NZ

图 3 NZ、P-NZ 的 XPS 谱图

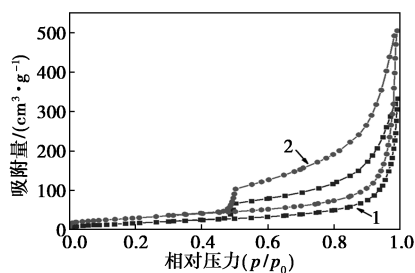
图 3(c) 是 Zn 2p 能谱图。从图中可以看出结合能 1 021.7 eV 和 1 044.9 eV 处的两个主峰分别归属于 Zn 2p_{1/2} 和 Zn 2p_{3/2}, 是氢氧化物中的 Zn(II) 氧化态^[17]。

图 3(d) 是 O 1s 能谱图。NZ 材料在 531.2、532.9 eV 处有两个峰, 其中 531.2 eV 处的峰与氧空位有关, 532.9 eV 的峰与羟基/吸附氧原子有关。使用 ICP 处理之后出现了新的峰, 位于 529.2 eV 处, 此峰与晶格氧有关^[18]。说明处理之后的材料存在氧配体空穴和更高密度的氧空位, 氧空位的存在可以有效地改变电极材料的表面电子结构, 改善电极材料的电子和离子传输, 从而有助于提高电化学性能。

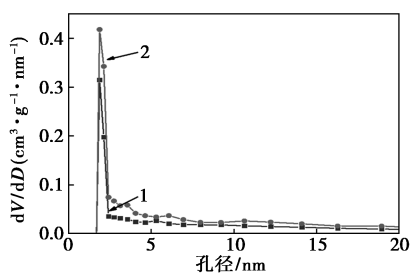
为进一步探寻使用氮气 ICP 处理 NZ 材料是否在 NZ 中掺入了 N 元素, 对 NZ 和 P-NZ 的 N 1s 能谱进行了分析[图 3(e)]。NZ 谱图中没有峰出现, 分析得到其 N 原子含量为 0.35%。而在 P-NZ 样品中有不明显的峰出现, 分析得到样品 N 原子含量为 2.16%, 说明使用氮气 ICP 处理可在 NZ 材料中掺杂 N 元素。

3.1.4 BET 表征

样品 NZ、P-NZ 的氮气吸附/脱附等温曲线如图 4(a) 所示。两个样品的等温线形态相似, 均为 IV 型等温线。当相对压力较高时 (0.5 < p/p₀ < 1), 样品会出现明显的 H3 型滞后回环, 说明样品中存在



(a) 吸附-脱附等温曲线



(b) BJH 孔径分布图

1—NZ; 2—P-NZ

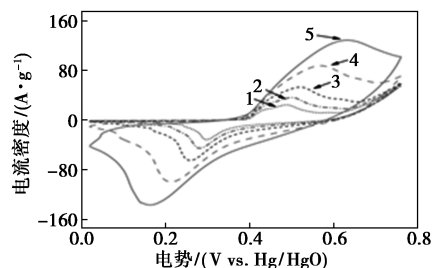
图 4 NZ、P-NZ 的氮气吸附/脱附等温线和孔径分布曲线

丰富的中孔孔道^[19], 当经过氮气 ICP 体处理后, 滞后回环变得更大更为明显, 滞后回环越大反映出其孔道结构越不规则^[20]。样品 P-NZ 的比表面积为 115.59 m²/g 大于样品 NZ 的 76.305 m²/g¹。图 4(b) 为通过 BJH 模型得到的两个样品的孔径分布图。从图中也可以看出, 两个样品含有丰富的中孔孔道结构且分布比较均匀, 中孔峰值均分布在 2.1 nm 左右。中孔的孔道结构有利于电极材料在电解液中浸润, 可以使电解质离子的传输速率更快; 较大的比表面积增大了固液接触界面, 可使传质动力学过程加快, 同时可以有效提升电极材料性能^[21]。

3.2 电化学性能研究

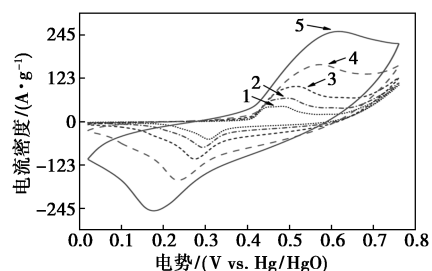
3.2.1 循环伏安分析

图 5(a)、(b) 分别为样品 NZ、样品 P-NZ 在 5~100 mV/s 不同扫描速率下的循环伏安曲线。可以清楚地观察到在所有扫描速率下的循环伏安曲线中都有一对氧化还原峰, 且强度随着扫描速率的增加



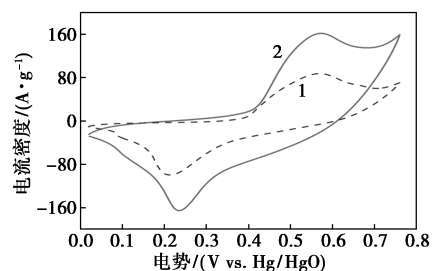
1—5 mV/s; 2—10 mV/s; 3—20 mV/s; 4—50 mV/s; 5—100 mV/s

(a) NZ



1—5 mV/s; 2—10 mV/s; 3—20 mV/s; 4—50 mV/s; 5—100 mV/s

(b) P-NZ



1—NZ; 2—P-NZ

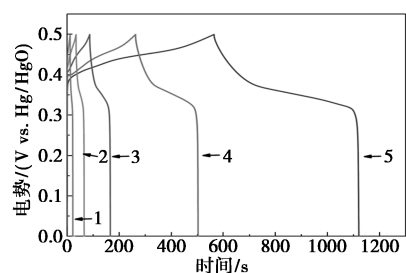
(c) 50 mV/s 下的循环伏安曲线

图 5 NZ、P-NZ 的循环伏安曲线

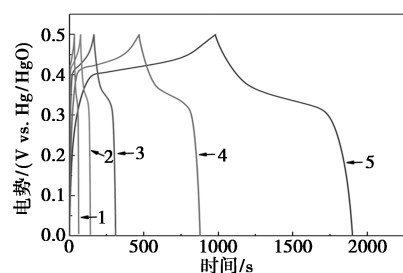
而增大,显示了电极材料典型的电池电容行为。此外,当扫描速率逐渐增加时,氧化峰向着高电位的方向偏移,而还原峰向着低电位的方向偏移,这是由于当扫描速率增大时,样品中的氧化和还原过程滞后于电位变化。图5(c)是经过ICP处理前后样品在50 mV/s的扫描速率下的循环伏安曲线。如图所示,P-NZ的循环伏安曲线面积比NZ样品的面积要大很多,比容量的大小与循环伏安曲线的封闭面积正相关,这意味着P-NZ样品比NZ的比容量大。

3.2.2 恒电流充放电分析

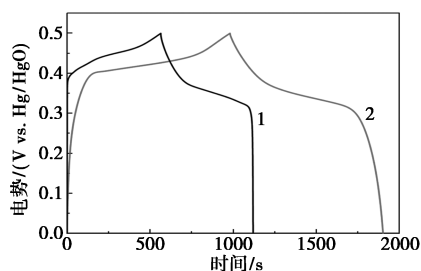
图6(a)为样品NZ在1、2、5、10 A/g和20 A/g下的恒流充放电曲线,对应的比电容为1 112.2、960.4、790、624 F/g和408 F/g。图6(b)为样品P-NZ在1、2、5、10 A/g和20 A/g下的恒流充放电曲线,对应的比电容为1 842、1 638、1 452、1 304 F/g和1 140 F/g。其中样品NZ、P-NZ在1 A/g时的库伦效率分别高达86.3%、88.9%,在20 A/g的大电



1—20 A/g; 2—10 A/g; 3—5 A/g; 4—2 A/g; 5—1 A/g
(a) NZ



1—20 A/g; 2—10 A/g; 3—5 A/g; 4—2 A/g; 5—1 A/g
(b) P-NZ



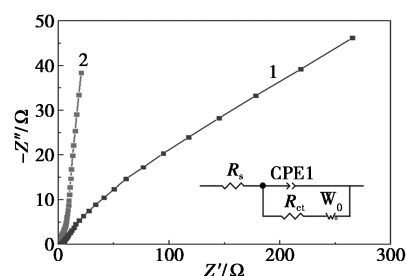
1—NZ; 2—P-NZ
(c) 1 A/g下的恒电流充放电曲线

图6 NZ、P-NZ的恒电流充放电曲线

流密度下,样品NZ、P-NZ的比电容约为1 A/g时比电容的36.7%、61.9%,说明处理后材料的倍率性能远优于处理之前。图6(c)为NZ、P-NZ在1 A/g时的恒电流充放电曲线对比。可以观察到两者的充电平台主要在0.4~0.46 V附近,而放电平台主要在0.32~0.38 V附近。在1 A/g时,NZ的比电容为1 112.2 F/g,P-NZ的比容量为1 842 F/g,通过ICP处理后,NZ的比电容提升了66%,这与处理之后材料的比表面积变大和新产生的晶格氧有关。

3.2.3 交流阻抗分析

为了进一步研究材料的电化学性能,使用电化学阻抗测试对等离子体处理前后的电极材料进行分析,并用等效电路对其进行拟合,交流阻抗测试结果解释了该材料作为电极的导电性和电荷传输行为。如图7所示,高频区域半圆的直径对应于电极和电解质界面之间的电荷转移电阻(R_{ct}),其中P-NZ的电荷转移电阻 R_{ct} 为0.74 Ω ,远远小于NZ的3.34 Ω ,表明经ICP处理后材料的电子传递效率提高,从高频区域来看,P-NZ的内部电阻(R_s)为0.174 Ω ,小于NZ的0.85 Ω ,说明P-NZ的电导率低于未经等离子体处理样品的电导率。电化学阻抗结果表明,P-NZ材料具有更大的比表面积和更小的电化学阻抗,能提高法拉第反应的电导率和电荷转移速率。此外,P-NZ电极的线性截面的斜率比NZ高,这表明其在电解质中具有快速离子扩散的理想电容行为^[21]。



1—NZ; 2—P-NZ

图7 NZ、P-NZ的Nyquist曲线

3.2.4 循环性能分析

图8为NZ、P-NZ材料的循环稳定性测试。电流密度为20 A/g并经过2 000次充放电后,P-NZ的电容保持率为66.6%,远高于NZ的22.2%,说明NZ材料经ICP体处理后,循环性能得到了极大的提升,这与处理之后材料由光滑的片状结构变为蜂窝状的球状结构有关,说明材料的结构变得更为稳定。

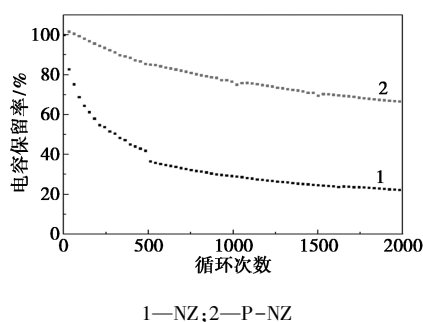


图 8 NZ、P-NZ 的循环稳定性

4 结论

本研究采用水热法在泡沫镍基底上成功制备了 $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ 电极材料 NZ, 之后通过 ICP 对所得电极材料进行改性处理得到 P-NZ。由实验结果可知, 经氮气等离子体处理 NZ 材料 240 s 后, 材料的形貌由垂直的平滑片状结构变为粗糙的球形蜂窝状结构, 极大地增加了材料的比表面积和稳定性, 而且处理后的电极材料产生了新的晶格氧, 从而使电极材料的比容量和循环稳定性提高。在电流密度为 1 A/g 时, NZ 电极比容量为 1 112 F/g, 经等离子体处理后比容量显著提升至 1 842 F/g, 提高了 66%。此外, 20 A/g 下经过 2 000 次循环后, NZ 的电容保持率为 22.2%, 而 P-NZ 的电容保持率为 66.6%, 提升了 3 倍。综上所述, 通过氮气 ICP 对 $(\text{Zn}_{0.2}\text{Ni}_{0.8})(\text{OH})_2$ 电极进行改性处理, 可以极大地提升其电化学性能。

参考文献

- [1] Chen H, Zhang Q, Han X, *et al.* 3D hierarchically porous zinc-nickel-cobalt oxide nanosheets grown on Ni foam as binder-free electrodes for electrochemical energy storage[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(47): 24022-24032.
- [2] Lo Piano S, Smith S T. Energy demand and its temporal flexibility: Approaches, criticalities and ways forward[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 160: 112249.
- [3] Pang Z, Li G, Xiong X, *et al.* Molten salt synthesis of porous carbon and its application in supercapacitors: A review [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2021, 61(10): 622-640.
- [4] Wang F X, Wu X W, Yuan X H, *et al.* Latest advances in supercapacitors: From new electrode materials to novel device designs[J]. *Chemical Society Reviews*, 2017, 46(22): 6816-6854.
- [5] Wang Y, Zhang L, Hou H, *et al.* Recent progress in carbon-based materials for supercapacitor electrodes: A review[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(1): 173-200.
- [6] Ran F, Yang X, Xu X, *et al.* Green activation of sustainable resources to synthesize nitrogen-doped oxygen-rich porous carbon nanosheets towards high-performance supercapacitor[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 412: 128673.
- [7] 聂志国, 王野, 王欢. 超级电容器关键材料研究进展[J]. *现代化工*, 2021, 41(8): 33-36, 41.
- [8] 赵力, 刘志豪, 金雷. 锌掺杂纳米 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 的制备及其电化学性能[J]. *中国有色金属学报(英文)*, 2013, 23(4): 1033-1038.
- [9] Cai B, Li J L, Wang L Y, *et al.* Enhanced performance of asymmetric supercapacitor based on NiZn-LDH@NiCoSe₂ electrode materials[J]. *Nanotechnology*, 2022, 33(29): 295402.
- [10] Senthil R A, Min A, Theerthagiri J, *et al.* Insights on Ni-based layered double hydroxides for electrochemical supercapacitors: Underlying aspects in rational design and structural evolution[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108305.
- [11] Jin Y, Wang Y, Ren P G, *et al.* Recent advances of carbon dots based emerging materials for supercapacitors applications [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 85: 111118.
- [12] Gao X R, Wang P K, Pan Z H, *et al.* Recent progress in two-dimensional layered double hydroxides and their derivatives for supercapacitors[J]. *ChemSusChem*, 2020, 13(6): 1226-1254.
- [13] 李鲁陶. 基于 ZIF-67 纳米骨架结构的高效光催化分解水催化剂研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
- [14] 李政昊, 吕泉, 李寰, 等. ICP 快速大面积制备三维内部联通蜂窝状微孔阵列[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(15): 2227-2235.
- [15] 侯栋宇, 胡觉, 孟凡明, 等. 低温等离子技术在锂离子电池材料制备及改性中的应用[J]. *有色设备*, 2023, 37(1): 36-41.
- [16] Ali A, Hamed I, Ammar M, *et al.* Enhanced rate capability for asymmetric supercapacitors by binder-free Zn-Ni-Co oxide nanoflakes on Ni foam [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 37: 102472.
- [17] Huang Z H, Sun F F, Batmunkh M, *et al.* Zinc-nickel-cobalt ternary hydroxide nanoarrays for high-performance supercapacitors [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(19): 11826-11835.
- [18] He Y, Sun C, Fang S, *et al.* Facile synthesis of N-doped NiCo-LDH nanowire with rich oxygen vacancies by nonthermal plasma for high-performance asymmetric capacitor electrode [J]. *Applied Surface Science*, 2024, 648: 159006.
- [19] Xu J, Ding W, Zhao W, *et al.* In situ growth enabling ideal graphene encapsulation upon mesocrystalline MTiO_3 (M = Ni, Co, Fe) nanorods for stable lithium storage[J]. *ACS Energy Letters*, 2017, 2(3): 659-663.
- [20] 王萍. 催化裂化烟气硫转移剂的失活考察及改进[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- [21] 李君, 宋沛良, 龚梓坤, 等. 油莎豆基超级电容器电极材料的制备与表征[J]. *新疆农业大学学报*, 2021, 44(2): 98-103. ■

欢迎订阅《现代化工》杂志, 邮发代号 82—67。