

# 氮气电感耦合等离子体处理提升 Ni-Al LDH 电极材料性能

李一多<sup>1,2</sup>, 储建军<sup>2</sup>, 梁吉轲<sup>2</sup>, 李可可<sup>2</sup>, 孟旭<sup>2</sup>, 方世东<sup>2\*</sup>

(1. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽合肥 230026;

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:** 等离子体处理材料是一种快速、有效提升电极性能的手段。首先用水热法在泡沫镍表面, 于 140°C、12 h 的条件下合成了具有 3D 花簇状纳米片结构的 NiAl-LDH, 该电极在 2 A/g 时具有 2 899.6 F/g 的高比容量。随后使用氮气电感耦合等离子体装置在 20 W 和 40 W 的条件下处理该电极 120 s。测试表明, 氮气等离子体处理在电极表面成功实现了氮掺杂并引入了氧空位, 在同样扫描速率下, 处理后的电极比容量依次升高为 3 063.6 F/g 和 3 320.8 F/g, 性能依次提升了 164 F/g 和 421.2 F/g。

**关键词:** 层状氢氧化物; 电感耦合等离子体; 超级电容器; 电极

**中图分类号:** TB321; TM53

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2026)05-0177-07

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.030

## Nitrogen inductively coupled plasma treatment to enhance the performance of Ni-Al LDH electrode materials

LI Yi-duo<sup>1,2</sup>, CHU Jian-jun<sup>2</sup>, LIANG Ji-ke<sup>2</sup>, LI Ke-ke<sup>2</sup>, MENG Xu<sup>2</sup>, FANG Shi-dong<sup>2\*</sup>

(1. Science Island Branch, Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

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

**Abstract:** Plasma treatment of materials is a fast and effective approach to enhance the performance of electrodes. NiAl-LDH with 3D flower cluster-like nanosheet structure was first synthesized by hydrothermal method on the surface of nickel foam at 140°C for 12 h. The electrode had a high specific capacity of 2 899.6 F/g at 2 A/g. The electrode was subsequently treated using a nitrogen inductively coupled plasma device at 20 W and 40 W for 120 s. The results showed that the nitrogen plasma treatment achieved nitrogen doping on the electrode surface and introduced oxygen vacancies, and the specific capacities of the treated electrodes were increased to 3 063.6 F/g and 3 320.8 F/g at the same scan rate, and the performances were sequentially enhanced by 164 F/g and 421.2 F/g.

**Key words:** layered double hydroxide; inductively coupled plasma; supercapacitor; electrode

随着全球能源结构转型和可再生能源的快速发展, 高效储能技术成为解决能源间歇性问题的关键<sup>[1]</sup>。超级电容器是一种有前途、储能特性优异的设备<sup>[2]</sup>。得益于其特殊的储能机制, 超级电容器有着功率密度高、充放电速度快和循环寿命长等优点<sup>[3-4]</sup>, 在储能领域占据重要地位<sup>[5]</sup>。然而, 传统超级电容器的能量密度较低, 限制了其在大规模储能中的应用<sup>[6]</sup>。因此, 开发兼具高能量密度和高功率密度的新型电极材料及器件成为研究热点。

层状双金属氢氧化物(LDHs)作为一种典型的赝电容材料, 具有层状结构可调、理论比容量高、离子交换能力优异和化学稳定性好等优势, 在柔性储能设备中展现出巨大潜力<sup>[7-9]</sup>。然而, LDHs的导电

性较差, 且传统制备方法往往会产生团聚现象, 限制了其实际应用<sup>[10]</sup>。

等离子体是气体被电离后形成的物质第4态, 宏观上表现为电中性, 主要由离子、电子和自由基组成。等离子体技术是一种重要的材料加工技术, 对各个领域都有重大影响, 已成为材料、航空航天、半导体等行业的关键技术。并且, 等离子体处理是一种节能、无污染、干燥的表面改性工艺。近年来, 等离子体处理技术因其快速、环保和高效的特点<sup>[11]</sup>, 被广泛应用于电极材料的改性<sup>[12-13]</sup>。研究表明, 等离子体处理可以显著提升材料的表面活性<sup>[14]</sup>、导电性<sup>[15]</sup>和润湿性<sup>[16]</sup>, 从而优化电极-电解质界面接触并增强电容性能。

收稿日期: 2025-07-24; 修回日期: 2026-03-10

作者简介: 李一多(2002-), 男, 硕士生, 研究方向为低气压冷等离子体材料制备与材料改性, liyiduo@mail.ustc.edu.cn; 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。

基于以上背景,本文开发了一种电感耦合等离子体(ICP)处理提升镍铝 LDH 复合泡沫镍电极比容量的新方法。通过电感耦合等离子体处理调控镍铝 LDH 的表面电子结构和界面特性,成功获得了具有丰富氧空位的镍铝 LDH 电极材料,并在 40 W 的处理下掺入了氮元素。该研究为开发高效、环保的电极改性技术及柔性储能器件提供了新思路。

## 1 材料与设备

### 1.1 实验材料

六水合硝酸镍[ $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ]、九水合硝酸铝[ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ]、氟化铵( $\text{NH}_4\text{F}$ )、尿素[ $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ]、氢氧化钾(KOH),均为分析纯,购自阿拉丁化学试剂有限公司;盐酸(HCl),符合美国化学会试剂标准,质量分数 37%,购自阿拉丁化学试剂有限公司;泡沫镍(NF),购自东莞科路得创新科技有限公司。

### 1.2 实验设备

电感耦合等离子体装置,中国科学院等离子体物理研究所自研;电化学工作站 CHI760E 型,购自上海辰华仪器有限公司。使用 Gemini SEM 500 型扫描电镜(SEM)对材料表面形貌进行表征与微区元素分析;使用 Philips X'Pert 型 X 射线衍射仪(XRD)分析材料的结构;使用 Kratos Axis Supra+型 X 射线光电子能谱仪(XPS)对材料表面元素组成和化学态进行分析。

## 2 实验部分

### 2.1 NiAl-LDH@NF 电极的制备

采用水热合成法直接在泡沫镍集流体上生长 NiAl-LDH。首先将泡沫镍集流体裁剪成合适大小,然后将其浸于 120 mL、3 mol/L 的盐酸中超声清洗 30 min,接着依次使用无水乙醇、超纯水超声清洗 20 min,结束后放入烘箱中 60℃ 干燥 5 h。随后取 60 mL 超纯水,向其中依次加入 2.25 mmol 六水合硝酸镍、2.25 mmol 九水合硝酸铝、4 mmol 氟化铵,分别搅拌 10 min,然后加入 13 mmol 尿素继续搅拌 15 min 形成混合溶液。随后将清洗好的泡沫镍和混合溶液放入内衬为 100 mL 的特氟龙不锈钢高压反应釜中,将反应釜放入烘箱中,140℃ 水热 12 h。自然冷却至室温后,取出泡沫镍。用去离子水和无水乙醇冲洗带有泡沫镍反应产物的电极材料,然后放入烘箱中 60℃ 干燥 5 h,得到 NiAl-LDH@NF 电极。其中,NiAl-LDH 活性物质在泡沫镍上的负载

量约为 1.0~1.5 mg/cm<sup>2</sup>。

### 2.2 氮气等离子体处理 NiAl-LDH@NF 电极

电感耦合等离子体装置的频率为 13.56 kHz,工作气体为氮气。装置主要由真空系统和电感耦合等离子体激发系统两部分组成。其中真空系统包含供气源,真空泵,质量流量控制器以及由石英管构建的真空腔室组成。电感耦合等离子体激发系统由射频电源、射频匹配器(来自中国科学院微电子研究所)和缠绕在石英管上的铜线圈组成,装置放电示意图如图 1 所示。

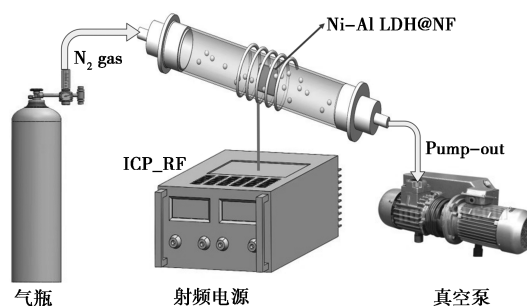


图 1 电感耦合等离子体装置与放电示意图

首先将制备的 NiAl-LDH@NF 电极置于腔室中电感线圈的正中心。随后调节减压阀至合适的压力后通入氮气,再调节氮气流速稳定在 50 sccm。然后打开机械泵,将腔室内抽至真空,直至腔室内气体压强到 25 Pa 以下,随后打开射频电源,将射频功率依次设定为 20 W 与 40 W 对样品进行 120 s 的等离子体处理,样品记为 NA-P20、NA-P40。

### 2.3 电化学表征

采用标准的三电极体系对 NiAl-LDH@NF 电极材料的电化学性能进行测试,以深入分析其电化学储能特性及其动力学行为。其中参比电极为汞/氧化汞电极,对电极为铂片电极,以 NiAl-LDH@NF 电极材料为工作电极,电解液选用浓度为 6 mol/L 的 KOH 水溶液。测试环境保持在 25℃ 恒温水浴,以减少温度波动对测试结果的影响。实验数据由 CHI760E 型电化学工作站记录并分析,依次采用了循环伏安法(CV)、恒电流充放电法(GCD)及电化学阻抗谱法(EIS)等。

在测试过程中,通过改变给定的电流密度值,获取不同电流密度下的充放电曲线,然后利用式(1)计算 NiAl-LDH@NF 电极材料的比电容。

$$C_s = (I \times \Delta t) / (m \times \Delta V) \quad (1)$$

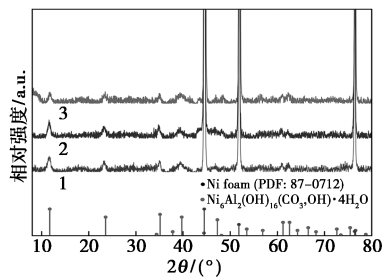
其中, $C_s$  为电极材料的比电容, F/g;  $I$  为充放电电流, A;  $\Delta t$  为放电时间, s;  $\Delta V$  为工作电位窗口, V;  $m$  为活性物质的质量, g。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 电极材料的结构表征与分析

##### 3.1.1 XRD 分析

通过 X 射线衍射仪对 NiAl-LDH@NF 与 NA-P20、NA-P40 电极进行材料物相与晶体结构分析,结果如图 2 所示。其中 44.6、52、76.5° 处的 3 个强峰为泡沫镍基底的衍射峰,分别对应于镍 (JCPDF# 87-0712) 的 (111)、(200)、(220) 晶面。



1—NiAl-LDH@NF; 2—NA-P20; 3—NA-P40

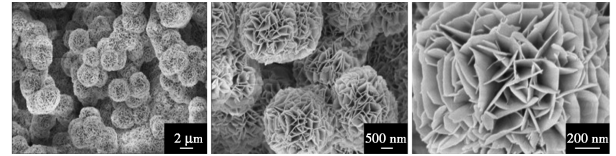
图 2 NiAl-LDH@NF 与 NA-P20、NA-P40 的 X 射线衍射谱

3 个材料的 X 射线衍射谱显示了 7 个主要特征性的衍射峰。11.5、23.1、35.1、39.3、46.7、61.1° 和 62.4° 的典型衍射峰可分别归因于 NiAl-LDH (PDF# 15-0087) 的 (003)、(006)、(012)、(015)、(018)、(110) 和 (113) 晶面,表示使用水热法成功制备了 NiAl-LDH 材料<sup>[17]</sup>。其中 (110) 和 (113) 的晶面表明制备的材料具有层状结构,并且 NA-P40 材料的 (110) 和 (113) 衍射峰对称性好于 NiAl-LDH@NF 和 NA-P20,这说明 40 W 的电感耦合等离子体处理减少了层间的缺陷。

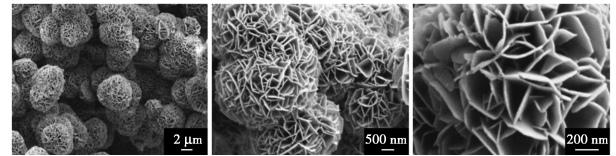
##### 3.1.2 SEM 分析

对 NiAl-LDH@NF 与 NA-P20、NA-P40 电极材料进行了 SEM 表征。图 3 显示了 NiAl-LDH@NF、NA-P20、NA-P40 在 2 μm、500 nm 与 200 nm 下的 SEM 图像。图 3(a) 可以看到材料呈现纳米片 3D 花簇状结构,材料由具有亚微米级间隙的水滑石纳米片的径向排列组成,这种超薄纳米片结构可加速电解质渗透,这对电化学性能至关重要。图 3(b)、(c) 分别为使用 20 W 和 40 W 氮气等离子体处理的 SEM 图,可以看出其微观形貌并未发生太大的变化,3D 花簇状纳米片结构被有效保留,说明了材料具有较好的稳定性。但是经过 40 W 处理的纳米花结构更加趋于球形花状且形貌更加完整,孔隙增大,这有助于电解液浸透。观察到随着放电功率的增

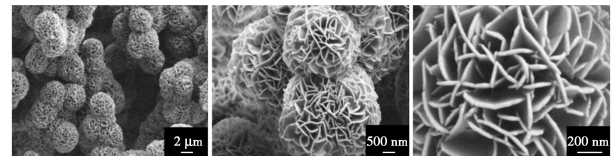
大,团聚的现象逐渐降低,这减轻了镍铝水滑石纳米片的高密度堆叠,并提供了更多与电解质的可用表面接触。



(a) NiAl-LDH@NF 的 SEM 图



(b) NA-P20 的 SEM 图

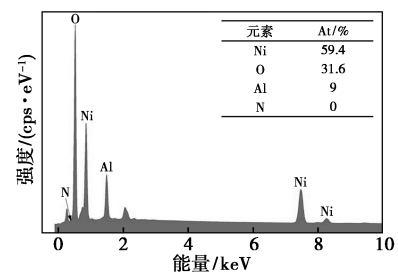


(c) NA-P40 的 SEM 图

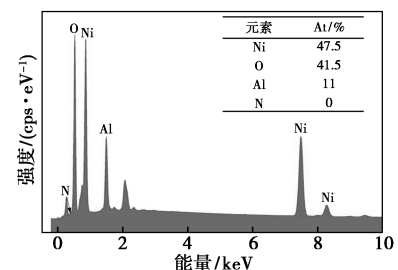
图 3 NiAl-LDH@NF 与 NA-P20、NA-P40 的 SEM 图

##### 3.1.3 EDS 分析

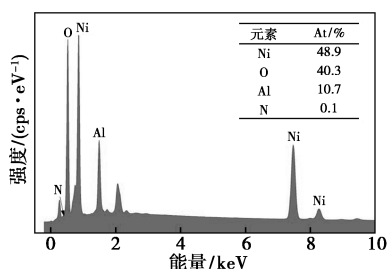
通过 EDS 能谱分析电极材料微区成分元素种类与含量。EDS 能谱显示了 Ni、O、Al 和 N 元素均匀地分布于材料中,图 4 为 NiAl-LDH@NF 与 NA-P20、NA-P40 的 EDS 谱与元素含量。其中,可以看到在等离子体处理后,NA-P20、NA-P40 氧元素的含量出现了不同幅度的下降,这表明等离子体处理产生了更多的氧空位。而通过 NA-P40 的 EDS 元



(a) NiAl-LDH@NF 的 EDS 谱与元素含量



(b) NA-P20 的 EDS 谱与元素含量



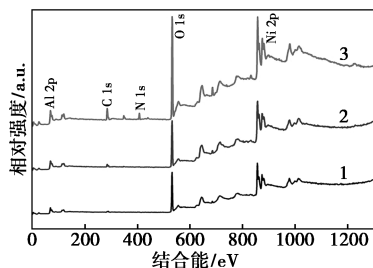
(c) NA-P40 的 EDS 谱与元素含量

图 4 NiAl-LDH@NF 与 NA-P20、NA-P40 的 EDS 谱与元素含量(左至右)

素含量表可见,在 40 W 的氮气电感耦合等离子体的作用下,成功地往镍铝水滑石中掺杂了 0.1% 的氮元素。氧空位的增加与氮元素的掺杂都将提升电极在工作时的导电性<sup>[18]</sup>。

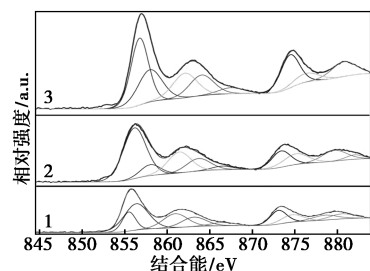
### 3.1.4 XPS 分析

利用 X 射线光电子能谱仪分析了样品 NiAl-LDH@NF 与 NA-P20、NA-P40 的元素价态分布情况,通过 Avantage 软件对 Ni 2p、Al 2p 和 O 1s 的精细谱进行了分峰拟合,结果如图 5、图 6 所示。

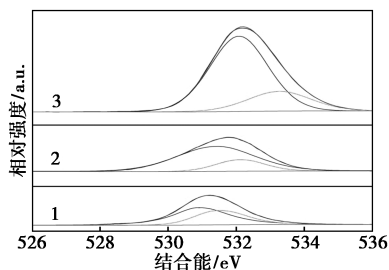


1—NiAl-LDH@NF;2—NA-P20;3—NA-P40

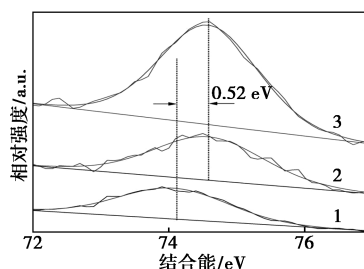
图 5 NiAl-LDH@NF 与 NA-P20、NA-P40 的 XPS 全谱



(a) Ni 2p



(b) O 1s



(c) Al 2p

1—NiAl-LDH@NF;2—NA-P20;3—NA-P40

图 6 NiAl-LDH@NF 与 NA-P20、NA-P40 的 Ni 2p、O 1s、Al 2p 谱

图 5 是 NiAl-LDH@NF 与 NA-P20、NA-P40 的 XPS 全谱,光谱显示了所有样品都含有 Ni、Al 和 O 元素,但是 NA-P40 材料新出现了明显的 N 1s 峰,说明 NA-P40 材料有 N 元素存在,和上述 EDS 表征一致,进一步验证了 40 W 等离子体处理在电极材料中掺杂了 N 元素。

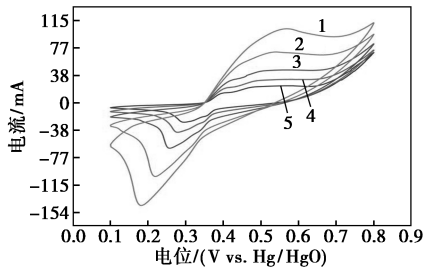
图 6 是 NiAl-LDH@NF 与 NA-P20、NA-P40 的 Ni 2p、O 1s、Al 2p 谱。在 Ni 2p 谱中,855.50 eV 和 873.1 eV 处观察到的峰属于 Ni<sup>2+</sup> 的 Ni 2p<sub>3/2</sub> 和 Ni 2p<sub>1/2</sub>,17.6 eV 自旋能分离对应于 Ni<sup>2+</sup> 状态。而在 856.35 eV 和 874.67 eV 处观察到的峰分别属于 Ni<sup>3+</sup> 的 Ni 2p<sub>3/2</sub> 和 Ni 2p<sub>1/2</sub>,其余峰为卫星峰<sup>[19]</sup>。在 O 1s 谱中,NiAl-LDH@NF 有结合能为 530.84、531.42 eV 的两个拟合峰,530.84 eV 处的峰与缺陷、污染物和一些表面物质,包括化学吸附的氧有关。531.42 eV 处的峰与 Ni—O 键有关。NA-P20 材料可分为 531.38 eV 和 532.07 eV 两个拟合峰,531.38 eV 处的峰与 Ni—O 键有关,532.07 eV 羟基 (M—OH 键) 有关。NA-P40 的特征峰位于 532.07 eV 和 533.25 eV,两者结合能分别归属于 Ni—O 键和 M—OH 键,因此可以确定该结构是氢氧化物<sup>[19]</sup>。在 Al 2p 谱中,74.1 eV 的峰属于 Al<sup>3+</sup>,等离子体处理之后,NA-P20 和 NA-P40 材料的 Al 2p 结合能发生偏移,升高了 0.52 eV 的结合能,说明等离子体处理降低了 Al 位的电子密度<sup>[20]</sup>。

### 3.2 电极材料的电化学性能分析

NiAl-LDH@NF 与 NA-P20、NA-P40 电极在三电极体系中的电化学行为如图 7~9 所示。

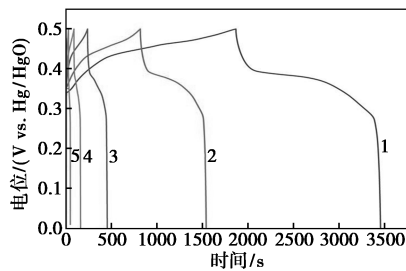
其中,图 7(a) 显示了 NiAl-LDH@NF 电极分别在 5、10、20、50、100 mV/s 扫描速率下的 CV 曲线。在所有扫描速率下,电极的 CV 曲线显示出相似的非矩形形状,具有明显耦合的还原峰和氧化峰,这意味着所有曲线均表现为赝电容特性<sup>[21]</sup>。但是可以

看出材料可逆性与循环性能较差。根据图 7(b) 的 GCD 曲线,当电流密度为 1、2、4、8、10、20 A/g 时,计算出相应的比容量分别为 3 184.6、2 899.6、2 164、2 205、1 448、848 F/g。在不同的电流下的库仑效率均低于 88%,说明材料库仑效率并不理想,尤其在 20 A/g 时的比电容保持百分比相对于 1 A/g 只有 26.6%,倍率性能非常差。



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

(a) NiAl-LDH@NF 的循环伏安曲线

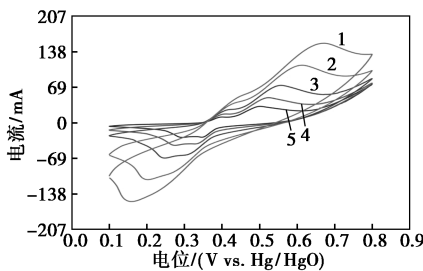


1—1 A/g;2—2 A/g;3—5 A/g;4—10 A/g;5—20 A/g

(b) NiAl-LDH@NF 的恒电流充放电曲线

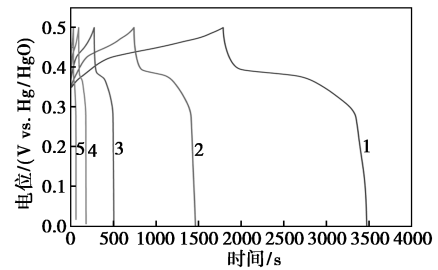
图 7 NiAl-LDH@NF 的循环伏安与恒电流充放电曲线

图 8(a) 显示了 NA-P20 电极分别在 5、10、20、50、100 mV/s 扫描速率下的 CV 曲线,所有曲线同样表现为赝电容特性。观察到一组对称的氧化还原峰,对称性好于 NiAl-LDH@NF 电极,这说明 ICP 处理可以提高材料的可逆性。图 8(b) 显示了 NA-P20 电极在 1、2、4、8、10 A/g 和 20 A/g 下的恒流充放电曲线,对应的比电容为 3 315.0、3 063.6、2 402、1 708 F/g 和 1 044 F/g。库仑效率均高于 89%,说明 20 W 等离子体处理提高了库仑效率,在 20 A/g



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

(a) NA-P20 的循环伏安曲线



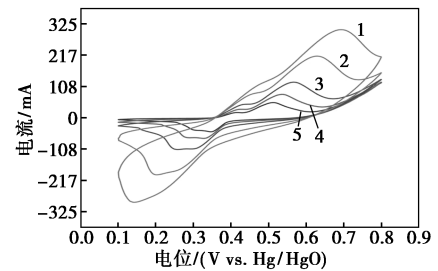
1—1 A/g;2—2 A/g;3—5 A/g;4—10 A/g;5—20 A/g

(b) NA-P20 的恒电流充放电曲线

图 8 NA-P20 的循环伏安与恒电流充放电曲线

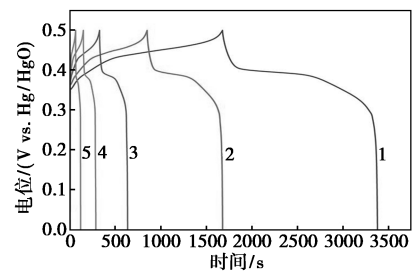
时的比电容约为 1 F/g 时比电容的 31.5%,微弱的提升了其倍率性能。

图 9(a) 显示了 NA-P40 电极分别在 5、10、20、50、100 mV/s 扫描速率下的 CV 曲线,很明显,随着扫描速率的增加,氧化峰向高电位移动,而还原峰则相反。说明制备的材料具有良好的电子传输性能,间接反馈出氧空位的增加提高了载流子迁移率。对 NA-P40 材料进行 GCD 分析,如图 9(b) GCD 曲线都显示出类似电池的特性,这与 CV 曲线的分析一致,基于这些 GCD 曲线,NA-P40 在 1、2、5、10 A/g 和 20 A/g 的电流密度下表现出 3 407.8、3 320.8、3 086、2 758 F/g 和 2 204 F/g 的极高比电容值,远高于文献报道值<sup>[22-23]</sup>。此外,NA-P40 在不同的电流密度下的库仑效率均高于 91%,其中 1 A/g 时有接近 100%的库仑效率。在 20 A/g 时的比电容约为 1 A/g 时比电容 64.7%,这表明 ICP 处理能有效提



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

(a) NA-P20 的循环伏安曲线



1—1 A/g;2—2 A/g;3—5 A/g;4—10 A/g;5—20 A/g

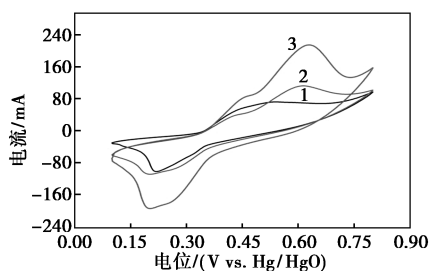
(b) NA-P40 的恒电流充放电曲线

图 9 NA-P40 的循环伏安与恒电流充放电曲线

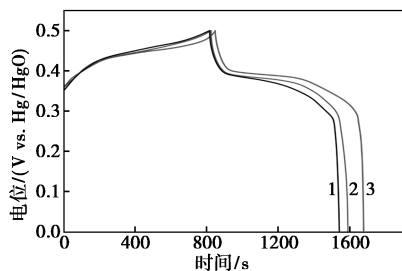
高材料的库仑效率和倍率性能。

### 3.3 电极材料的电化学性能对比

图 10 为 3 个材料的循环伏安曲线和恒电流充放电曲线对比图。图 10(a) 可以清楚地看到 NA-P40 的氧化还原峰和积分面积明显大于 NA-P20 和 NiAl-LDH@NF 电极, 这更加说明了 NA-P40 的比容量更大, 电化学活性和电化学可逆性更好。通过计算可以发现, 在 50 mV/s 的扫描速率下, NiAl-LDH@NF 的比容量是 987.2 F/g, NA-P20 比容量是 1 217.7 F/g, 而 NA-P40 的比容量为 2 330.9 F/g。图 10(b) 比较了所有 3 个电极在 2 A/g 下的 GCD 曲线。GCD 曲线中可以找到具有良好对称性的电压平台, 表明它们典型的电池类型性质<sup>[21]</sup>。NA-P40 电极在 2 A/g 时比 NA-P20 和 NiAl-LDH@NF 具有更长的放电时间, 表明其在 3 个电极中具有最高的比电容。在 2 A/g 下, NiAl-LDH@NF 的比电容为 2 899.6 F/g, NA-P20 的比电容为 3 063.6 F/g, NA-P40 的比电容为 3 320.8 F/g, 与 CV 结果一致。综上所述, 等离子体处理后, 电极比电容依次提升了 164 F/g 与 421.2 F/g。



(a) 3 个电极的循环伏安曲线对比图



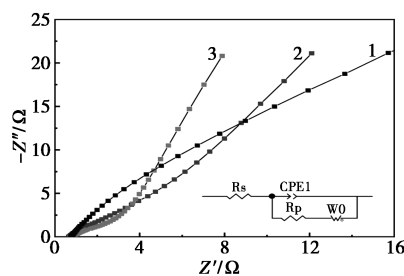
(b) 3 个电极的恒电流充放电曲线对比图

1—NiAl-LDH@NF; 2—NA-P20; 3—NA-P40

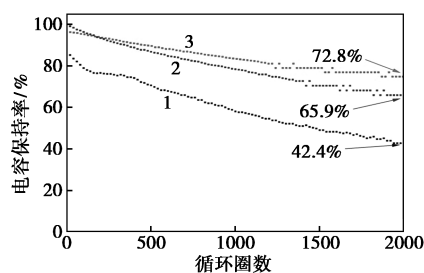
图 10 NiAl-LDH@NF 与 NA-P20、NA-P40 的 CV 与 GCD 对比图

通过电化学交流阻抗测试与等效电路拟合得到图 11(a), 即 3 个电极材料的 Nyquist 对比图。在 Nyquist 图高频区, 实部与横轴的截距代表电解液与电极接触的内阻  $R_s$ , 其中 NA-P40 的内阻  $R_s$  是 0.711  $\Omega$  低于 NA-P20 的 0.714  $\Omega$  低于 NiAl-LDH@

NF 的 0.749  $\Omega$ , 表明等离子体处理提高了电极材料与电解液的接触效率。而在 Nyquist 图低频区, 体系的反应主要受扩散控制(如 Warburg 阻抗), 对应的是缓慢的传质过程。其中 NA-P40 的斜率大于 NA-P20 大于 NiAl-LDH@NF, 这说明 NA-P40 材料的扩散阻抗更小, 具有更快的离子传输速率, 这与上述的 CV 和 GCD 曲线结果相符合。可以说, ICP 处理后带来的氮掺杂与氧空位提升了材料界面的电荷传输效率, 并且等离子体物理的刻蚀作用减弱了团聚现象, 促进更快的电子转移和离子扩散。图 11(b) 是 3 个电极在 20 A/g 下进行的循环充放电测试, 以研究 3 个电极的循环性能。从图中的曲线可以看出, 经过 2 000 次循环后, NA-P40 电极的电容保留率为 72.8%, NA-P20 电极的电容保留率为 65.9%, 大大高于相同测试条件下 NiAl-LDH@NF 电极的 42.4% 的保留率, 说明团聚严重并且孔隙太小的 NiAl-LDH@NF 材料循环寿命极差, 而 ICP 处理后极大地提高了 NiAl-LDH 电极材料的循环稳定性。



(a) 3 个电极的 Nyquist 曲线



(b) 3 个电极在 20A/g 下 2 000 圈的循环性能

1—NiAl-LDH@NF; 2—NA-P20; 3—NA-P40

图 11 3 个电极的阻抗与循环寿命评价

## 4 结论

通过水热法在泡沫镍集流体上原位生长出镍铝水滑石材料, 随后通过氮气射频等离子体对所得 NiAl-LDH@NF 电极进行改性处理, 最终制备出具有优异电化学性能的电极材料。电化学性能提升主要体现在 2 A/g 下处理后的电极比容量依次升高为

3 063.6 F/g 和 3 320.8 F/g,性能依次提升了 164 F/g 与 421.2 F/g,其中,40 W 处理的比电容增长率提升约 15%。同时对于材料比电容提升的机理进行了研究,分析为氮气等离子体作用材料后:在物理上改善了电极表面的形貌,缓解了团聚现象,促进了传质;在化学上引入了氮元素与氧空位,通过缺陷工程提升了材料界面的电荷传输效率。综上,通过一步水热法生长出性能优异的镍铝 LDH 后,借助氮气等离子体快速处理实现了对电极材料的表面改性,进一步提升了材料的电化学性能。

### 参考文献

- [1] Seenivasan S, Adhikari S, Sivagurunathan A T, *et al.* Supercapacitors: Unlocking the potential of battery-supercapacitor fusion[J]. *Energy & Environmental Science*, 2025, 18(3): 1054–1095.
- [2] Singh N, Singh V, Bisht N, *et al.* A comprehensive review on supercapacitors: Basics to recent advancements[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 121: 116498.
- [3] Libich J, Máca J, Vondrák J, *et al.* Supercapacitors: Properties and applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 17: 224–227.
- [4] 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.
- [5] 陈干. 基于三维互连碳管网格膜的小型化滤波超级电容器[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024.
- [6] 徐桂培, 刘浩, 赖洁文, 等. 高电压双电层超级电容器电解质的研究进展[J]. *材料导报*, 2025, 39(9): 20–27.
- [7] Karwasra R, Siwath P, Gupta Y, *et al.* Recent advancements in layered double hydroxides as an electrode material for high-performance asymmetric supercapacitors[J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2026, 30(1): 57–87.
- [8] He X, Yang J, Niu M, *et al.* Synthesis of CaLiAl-LDHs and its optimization on the properties and chloride binding capacity of ECO-friendly marine cement-based repair materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 443: 141183.
- [9] Guo X, Ruan Y, Diao Z, *et al.* Environmental-friendly preparation of Ni-co layered double hydroxide (LDH) hierarchical nanoarrays for efficient removing uranium(VI)[J]. *Journal of cleaner production*, 2021, 308: 127384.
- [10] Jia H, Wang M, Feng M, *et al.* Synergistic enhancement of supercapacitor performance: Modish designation of BPQD modified NiCo-LDH/NiCo<sub>2</sub>S<sub>4</sub> hybrid nanotube arrays with improved conductivity and OH<sup>-</sup> adsorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 484: 9.
- [11] Liu F, Zhang L H, Zhang Z, *et al.* The application of plasma technology for the preparation of supercapacitor electrode materials[J]. *Dalton Transactions*, 2024, 53(13): 21.
- [12] Ouyang B, Kan E, Rawat R S. Plasma nanotechnology: Novel tool for high-performance electrode materials for energy storage and conversion[J]. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 2023, 7(1): 1–36.
- [13] 杨永博, 吴进, 储建军, 等. 大气射流等离子体改性氢氧化镍电极及其电化学性能研究[J]. *现代化工*, 2025, 45(3): 166–171.
- [14] 张海宝, 陈强. 非热等离子体材料表面处理及功能化研究进展[J]. *物理学报*, 2021, 70(9): 22–38.
- [15] Hou D, Bai F, Dong P, *et al.* Recent development of low temperature plasma technology for lithium-ion battery materials[J]. *Journal of Power Sources*, 2023, 584: 233599.
- [16] 陈婷婷, 马冠水, 周小卉, 等. 聚丙烯无纺布表面氧等离子体润湿改性与油水分离[J]. *中国表面工程*, 2025, 38(2): 334–344.
- [17] Liu H, Yu T, Su D, *et al.* Ultrathin Ni-Al layered double hydroxide nanosheets with enhanced supercapacitor performance[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(16): 14395–14400.
- [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] Wang Y, Jiang D, Zhang Y, *et al.* Controlled preparation of cobalt carbonate hydroxide@nickel aluminum layered double hydroxide core-shell heterostructure for advanced supercapacitors[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 654: 379–389.
- [20] Wang G, Jin Z, Zhang W. Ostensibly phosphatized NiAl LDHs nanoflowers with remarkable charge storage property for asymmetric supercapacitors[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 577: 115–126.
- [21] Mathis T S, Kurra N, Wang X, *et al.* Energy storage data reporting in perspective—guidelines for interpreting the performance of electrochemical energy storage systems[J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9(39): 1902007.
- [22] Wang Y, Liu Y, Zhang M, *et al.* One-step architecture of bifunctional petal-like oxygen-deficient NiAl-LDHs nanosheets for high-performance hybrid supercapacitors and urea oxidation[J]. *Science China Materials*, 2022, 65(7): 1805–1813.
- [23] Wang Z, Song Y, Li R, *et al.* Fabrication of oxygen-vacancy abundant NiAl-layered double hydroxides for ultrahigh capacity supercapacitors[J]. *Dalton Transactions*, 2025, 54(2): 821–831. ■