

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

杨永博^{1,2}, 吴进², 储建军^{1,2}, 香开新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:为改善氢氧化镍电极的电化学性能,采用大气射流等离子体对氢氧化镍电极进行表面改性。通过水热法在泡沫镍上合成了片状结构的氢氧化镍电极材料,在 1 A/g 的电流密度下,该材料拥有 1 712.3 F/g 的比电容。此外,用大气射流等离子体处理氢氧化镍电极。结果表明,改性后的氢氧化镍纳米片厚度变薄,同时形成了少量的氧化镍。对改性后的氢氧化镍电极进行电化学测试,在 1 A/g 的电流密度下,改性后的材料比电容达到了 2 124.5 F/g,提升了 24%。

关键词:等离子体;超级电容器;氢氧化镍;表面改性

中图分类号:TB321;TM53

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)03-0166-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.03.030

Modification of nickel hydroxide electrode by atmospheric jet plasma and its electrochemical performance

YANG Yong-bo^{1,2}, WU Jin², CHU Jian-jun^{1,2}, XIANG Kai-xin², 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: To improve the electrochemical performance of nickel hydroxide electrode, its surface is modified by using atmospheric jet plasma. Nickel hydroxide electrode material with sheet-like structure is synthesized on foam nickel through a hydrothermal method. At a current density of 1 A·g⁻¹, the prepared material has a specific capacitance of 1,712.3 F·g⁻¹. Afterwards, nickel hydroxide electrode is treated by atmospheric jet plasma. The characterization results show that the modified nickel hydroxide nanosheets become thinner and form a small amount of nickel oxide. Electrochemical testing on the modified nickel hydroxide electrode shows that at a current density of 1 A·g⁻¹, the specific capacitance of the modified nickel hydroxide electrode material reaches 2124.5 F·g⁻¹, an increase of 24%.

Key words: plasm; supercapacitor; nickel hydroxide; surface modification

近年来,对能源的需求呈现前所未有的加速增长态势^[1-3],对更为清洁、可再生的能源形式过渡提出了迫切要求^[4-6]。绿色电化学储能设备超级电容器凭借其卓越的功率密度、出色的循环稳定性、轻巧的体积及成本效益得广泛地应用^[7-9]。然而,超级电容器在能量密度方面的相对劣势成为了其进一步推广的一大障碍^[10-11]。氢氧化镍作为一种金属氢氧化物电极材料,凭借其较高的理论比电容、环保特性和经济性^[12-14],展现出巨大的应用潜力。尽管如此,氢氧化镍电极在实际应用中仍面临两方面的局限:一是其理论比容量存在上限,难以实现大幅度突破;二是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,从而在一定程度上限制了氢氧化镍电极电化学性能的充分发挥。

在物质存在的形态中,除固态、液态、气态这 3 种熟知的基本状态外,还存在着第 4 种等离子体态。等离子体态下,物质主要由正离子(即丧失电子的原子核)、自由电子以及尚未电离的中性原子或分子共同构成^[15]。其中,低温等离子体作为一种特殊类型的等离子体,其特点在于电子具有较高的动能,内部电子温度可达几千乃至几万摄氏度,离子和中性粒子的温度则维持在相对较低水平^[16]。

大气射流等离子体作为在大气压环境下运行的一种低温等离子体,能在常压条件下正常工作^[17]。其通过特定的设备,借助电能激发气体分子,从而在喷嘴处形成高速流动的等离子体射流。射流中蕴含的高能电子、离子及自由基,能够对目标物质进行高效的处理。基于上述原理,笔者通过等离子体技术

收稿日期:2024-05-07;修回日期:2025-01-12

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA29040800);安徽省高校协同创新项目(GXXT-2022-026)

作者简介:杨永博(1998-),男,硕士生,研究方向为低温等离子体应用,17344079806@163.com;方世东(1975-),男,博士,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。

对氢氧化镍电极进行处理,旨在通过这种方式对氢氧化镍电极的电化学性能进行优化,最终制备出性能优良且稳定的超级电容器电极材料。

1 材料与试剂

1.1 实验材料

泡沫镍,东莞科路得创新科技有限公司生产;盐酸、六水合硝酸镍、尿素、氟化铵、氢氧化钾,阿拉丁化学试剂有限公司生产。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。

1.2 实验设备

大气射流等离子体装置,南京苏曼等离子体科技有限公司生产;利用 Gemini SEM 500 型扫描电镜对材料表面形貌进行表征;利用 Philips X'Pert 型 X 射线衍射仪分析材料的组成;利用 Kratos Axis supra+ 型 X 射线光电子能谱仪对材料表面元素组成和化学态进行分析;利用 Nicolet ls 10/50 型傅里叶红外光谱仪进行官能团分析;利用 AvaSpec Multi-Channel Spectrometer 多通道型光纤光谱仪对大气射流等离子体进行诊断;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 氢氧化镍的制备

采用水热法直接在泡沫镍基底上生长氢氧化镍。泡沫镍依次经以下处理:浸于 3 mol/L 盐酸中超声清洗 20 min,超纯水中超声清洗 20 min,乙醇中超声清洗 20 min,最后于 60℃ 烘箱中烘干。其次,配置 4 mmol 六水合硝酸镍、25 mmol 尿素、12 mmol 氟化铵混合溶液 40 mL,将溶液置于磁力搅拌器之上搅拌 1 h。将大小为 2 cm×3 cm 的泡沫镍放入反应釜,并将上述溶液倒入反应釜,最后将反应釜置于烘箱中,110℃ 水热 10 h。水热结束后取出泡沫镍,用纯水反复冲洗,再将制得的样品置于 60℃ 烘箱中烘干,得到自支撑氢氧化镍电极,记为 Ni-NF,氢氧化镍在泡沫镍上的负载质量约为 0.5~0.8 mg/cm²。

2.2 等离子体的处理

大气射流等离子体设备的频率为 40 kHz,工作气体为氧气。将上述电极材料置于喷枪正下方,距离喷枪口约 5 cm 通入氧气,气体流量约为 600 mL/min,打开设备电源,设置功率为 800 W,最后激发大气射流等离子体对样品进行处理。依次对样品处理 180、300 s。处理过后的样品依次记为 Ni-NF-J180

和 Ni-NF-J300。

2.3 电化学性能的测量

采用标准三电极测试体系对电极材料进行电化学测试,其中参比电极为汞/氧化汞电极,1 cm×1 cm 的铂片为对电极,将样品裁为 1 cm×1 cm 的大小以用作工作电极,电解液选用 3 mol/L KOH 水溶液。测试方法主要是循环伏安法、恒流充放电测试以及电化学阻抗测试。所有的电化学测试均在辰华 CHI760E 电化学工作站上完成。

在实际的测试过程中,通过改变给定的电流密度值,即可得到一系列的充放电曲线,然后计算电极材料的容量:

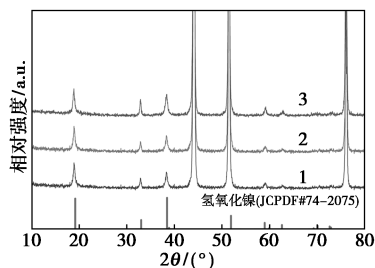
$$C_s = (I \times \Delta t) / (m \times \Delta V) \quad (1)$$

其中: C_s 为电极材料的比电容, F/g; I 为充放电电流, A; 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

通过 X 射线衍射仪对 Ni-NF、Ni-NF-J180 和 Ni-NF-J300 进行物相与晶体结构分析,结果如图 1 所示。从图 1 中可以看出,44.0°、51.4°、76.0° 为泡沫镍基底的衍射峰,分别对应于镍(JCPDF#89-7128)的(111)、(200)、(220)晶面。而其中位于 18.9°、32.9°、38.3°、59.2°、62.7° 等强度较小的峰,对应于氢氧化镍(JCPDF#74-2075)的(001)、(100)、(011)、(003)和(111)晶面,表明通过水热法成功于泡沫镍上合成了氢氧化镍。此外经过等离子体处理之后,氢氧化镍的各个衍射峰均出现强度下降的现象,相较于处理 120 s 的样品,处理 300 s 的样品峰强下降的更多,意味着经过氧气大气射流等离子体处理,样品表面有部分氢氧化镍被等离子体刻蚀。与未处理的样品相比,处理过后的样品没有发生峰的偏移,也没有产生新的衍射峰。



1—Ni-NF; 2—Ni-NF-J180; 3—Ni-NF-J300

图 1 Ni-NF、Ni-NF-J180 和 Ni-NF-J300 的 XRD 谱图

Ni-NF、Ni-NF-J180 和 Ni-NF-J300 的 SEM 图如图 2 所示。从图 2(a)、图 2(b) 中可以看出, Ni-NF 在泡沫镍表面垂直生长, 呈现出片状结构, 片层直径在 200 nm 以上。从图 2(c)、图 2(d) 中可以看出, 相较于未处理的样品, 大气射流等离子体处理 180 s 后的样品表面片状氢氧化镍的厚度明显减小, 片层大小则未发生明显变化。从图 2(e)、图 2(f) 中可以看出, Ni-NF-J300 经过 300 s 处理后, 片层的厚度进一步减小。

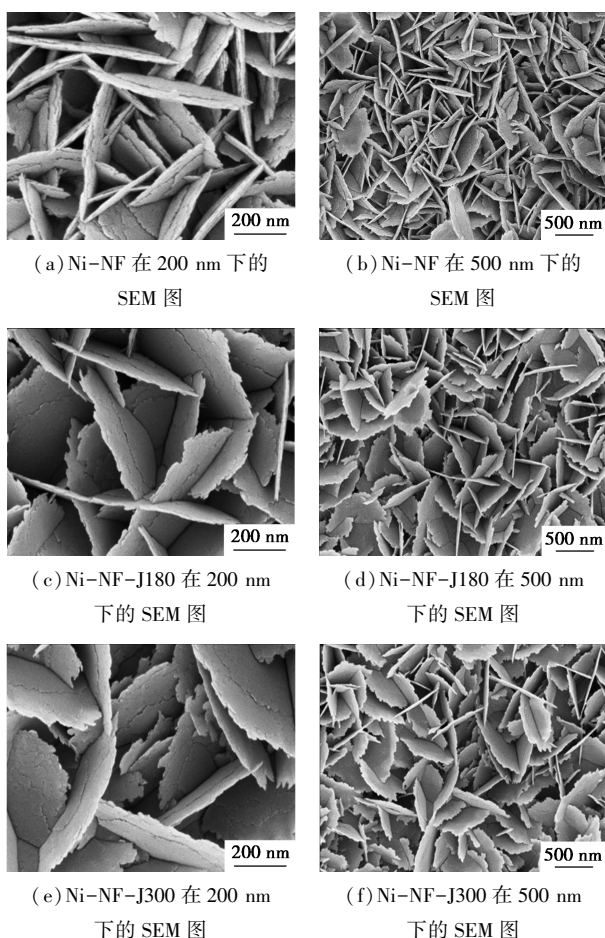
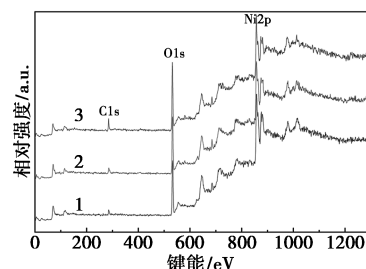


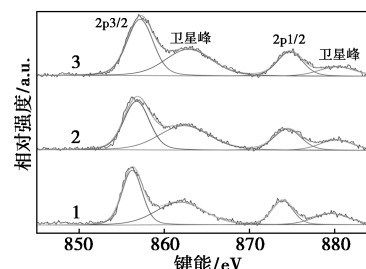
图 2 不同材料的 SEM 图

利用 X 射线光电子能谱仪分析了样品 Ni-NF、Ni-NF-J180 和 Ni-NF-J300 的元素价态分布情况, 结果如图 3 所示。从图 3(a) 中可以看出, XPS 的全谱中可以明显观察到 Ni2p、O1s 的峰, 说明材料中存在 Ni 和 O 元素。随后通过 CasaXPS 软件对 Ni2p、O1s 进行了分峰拟合。从图 3(b) 中可以看出, 在 Ni 2p 的精细谱中观察到位于 856.2、861.9、873.8 eV 和 879.6 eV 的 4 个峰。其中结合能为 856.2 eV 和 873.8 eV 的 2 个峰分别对应于 Ni 2p_{3/2} 和 Ni 2p_{1/2} 的自旋轨道, 而 861.9 eV 和 879.6 eV 的 2 个峰分别是 Ni 2p_{2/3} 和 Ni 2p_{1/2} 的卫星峰^[18]。

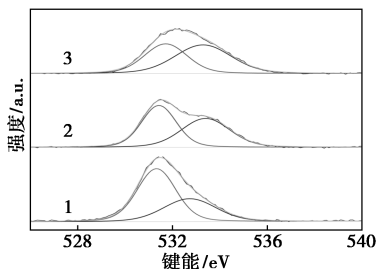
从图 3(c) 中可以看出, O1s 能谱在 531.7 eV 和 533.3 eV 处有 2 个峰, 其中 531.7 eV 处的峰与表面吸附的一些污染有机物和化学吸附的氧有关。533.3 eV 处的峰与 M—OH 有关, 因此可以确定该结构为氢氧化物。XPS 分析进一步证实了电极材料中氢氧化物的存在。



(a) Ni-NF、Ni-NF-J180 和 Ni-NF-J300 的 Ni 2p 谱



(b) Ni-NF、Ni-NF-J180 和 Ni-NF-J300 的 Ni 2p 谱

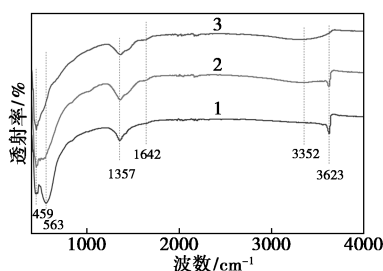


(c) Ni-NF、Ni-NF-J180 和 Ni-NF-J300 的 O 1s 谱
1—Ni-NF; 2—Ni-NF-J180; 3—Ni-NF-J300

图 3 不同材料的 XPS 图谱

利用傅里叶红外光谱仪观察样品 Ni-NF、Ni-NF-J180 和 Ni-NF-J300 的谱图如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 样品 Ni-NF 中主要有 4 个峰, 其中 459 cm⁻¹ 和 563 cm⁻¹ 是由镍离子与羟基配位所引起的伸缩振动峰^[19]。而位于 3 623 cm⁻¹ 处的峰对应于游离羟基的伸缩振动峰。1 357 cm⁻¹ 处的峰为 NO³⁻ 所引起的振动吸收峰, 表明在氢氧化物层间存在这些阴离子的插层, 其中 NO³⁻ 来源于硝酸镍的溶解, 层间插入的阴离子有助于扩大层间距离, 以便储存更多的电解液离子, 加快离子在片层之间的传输, 从而提升其电化学性能^[20]。相较于 Ni-NF、Ni-NF-J180 谱图, 于 1 642 cm⁻¹ 和 3 352 cm⁻¹ 处出现 2 个宽峰, 而位于 563 cm⁻¹ 处的峰强出现减小。而

Ni-NF-J300 的谱图中, $1\ 642\ \text{cm}^{-1}$ 和 $3\ 352\ \text{cm}^{-1}$ 处的 2 个宽峰继续增强, 而 $563\ \text{cm}^{-1}$ 处的峰则几乎消失。其中 $1\ 642\ \text{cm}^{-1}$ 和 $3\ 352\ \text{cm}^{-1}$ 处的 2 个宽峰为水分子中的 O—H 的拉伸和弯曲振动, 说明材料中出现结晶水, 结晶水有利于电化学反应中的质子置换, 能够改善电化学性能。结合镍离子与羟基的伸缩振动峰的减弱, 说明氧气等离子体射流使得一部分氢氧化镍发生分解, 进而产生了结晶水, 同时必然伴随着氧化镍的生成。



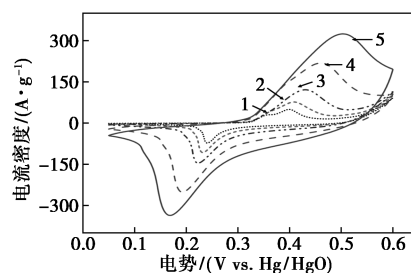
1—Ni-NF; 2—Ni-NF-J180; 3—Ni-NF-J300

图 4 Ni-NF、Ni-NF-J180 和 Ni-NF-J300 的红外谱图

3.2 电化学性能研究

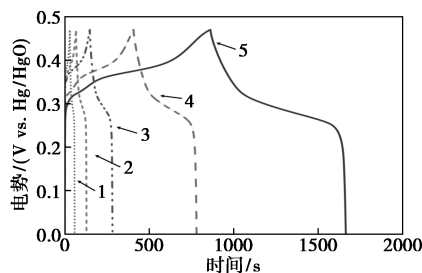
Ni-NF 和 Ni-NF-300 电极在三电极体系中的电化学行为如图 5 所示。从图 5(a) 中可以看出, 在所有扫描速率的循环伏安曲线中都可以明显地观察到 1 对对称的氧化还原峰, 且强度随着扫描速率的增加而增加。从图 5(b) 中可以看出, 样品在 1、2、5、10 A/g 和 20 A/g 下的恒流充放电曲线对应的比电容分别为 1 712.3、1 591.1、1 436.2、1 323.4 F/g 和 1 204.3 F/g。此外 Ni-NF 在不同的电流下的库仑效率均在 91% 之上, 其中 1 A/g 时有高达 93.3% 的库仑效率。样品 Ni-NF 在 20 A/g 时的比电容约为 1 A/g 时比电容的 70.3%, 说明 Ni-NF 样品有着优异的倍率性能。

从图 5(c) ~ 图 5(d) 中可以看出, 随着扫描速率的减小, 样品的氧化峰出现了明显的分峰, 其中 0.4 V 附近的氧化峰对应于氢氧化镍的氧化峰, 而 0.34 V 附近的氧化峰和氧化镍的氧化电位相匹配, 证明了氧化镍的产生。此外, 随着扫描速率的增大, 氧化峰向高电位的方向偏移, 而还原峰向低电位的方向偏移, 这是因为扫描速率的增大使得样品中的氧化过程和还原过程滞后于电位变化引起的, 因此, 扫描速率越快, 氧化峰与还原峰的偏移越大。从图 5(d) 中可以看出, Ni-NF-J300 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分别为 2 124.5、1 987.7、1 800、1 997.8 F/g 和 1 523.4 F/g。



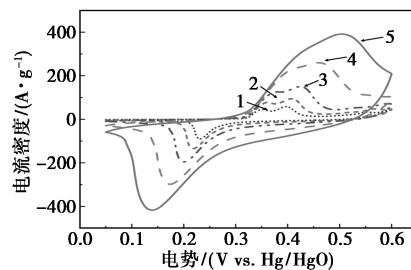
1—5 mV/s; 2—10 mV/s; 3—20 mV/s; 4—50 mV/s; 5—100 mV/s

(a) Ni-NF 在不同扫描速率下的 CV 曲线



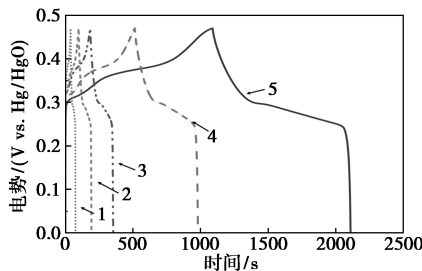
1—5 mV/s; 2—10 mV/s; 3—20 mV/s; 4—50 mV/s; 5—100 mV/s

(b) Ni-NF-J300 在不同扫描速率下的 CV 曲线



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

(c) Ni-NF 在不同电流密度下的 GCD 曲线



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

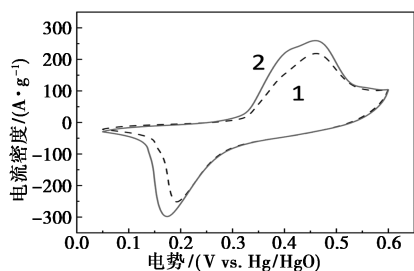
(d) Ni-NF-J300 在不同电流密度下的 GCD 曲线

图 5 Ni-NF 和 Ni-NF-J300 各自的电化学性能

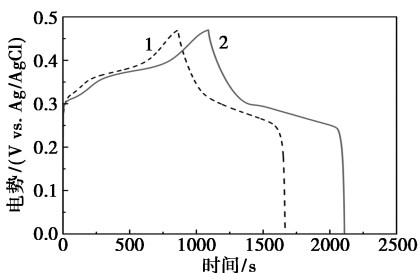
此外, Ni-NF-J300 在不同的电流下的库仑效率均在 90% 之上, 其中 1 A/g 时高达 93.6%。样品 Ni-NF-J300 在 20 A/g 时的比电容约为 1 A/g 时比电容的 71.7%。

大气压射流等离子体处理前后样品的循环伏安曲线和恒电流充放电曲线图 6(a) ~ 图 6(b) 所示。从图 6(a) 中可以看出, Ni-NF-J300 的循环伏安曲线面积比 Ni-NF 样品的大, 意味着 Ni-J300 样品比

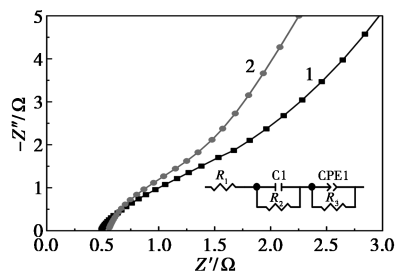
Ni 的比容量更大。在 50 mV/s 的扫描速率下, Ni-NF 的比容量为 1 266.3 F/g, 而 Ni-NF-J300 的比容量为 1 555.1 F/g。从图 6(b) 中可以看出, 2 个样品在 1 A/g 时的恒电流充放电曲线的充电平台主要在 0.36 V 附近, 而放电平台主要在 0.25~0.3 V 附近。在 1 A/g 时, Ni-NF 的比电容量为 1 712.3 F/g, Ni-NF-J300 的比容量为 2 124.5 F/g, 等离子体处理后, Ni-NF 的比电容量提升了 24%。氧化镍的理论比电容量高于氢氧化镍, Ni-NF-J300 比电容量的提升也与氧化镍的产生有关。



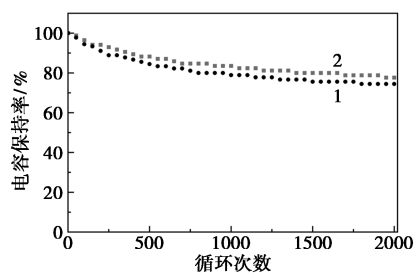
(a) Ni-NF 和 Ni-NF-J300 在 50 mV/s 下的 CV 曲线



(b) Ni-NF 和 Ni-NF-J300 在 1 A/g 下的 GCD 曲线



(c) Ni-NF 和 Ni-NF-J300 的 Nyquist 曲线



(d) Ni-NF 和 Ni-NF-J300 电极在 20 A/g 下的 2 000 圈的循环性能

1—Ni-NF; 2—Ni-NF-J300

图 6 Ni-NF 和 Ni-NF-J300 的电化学性能比较

利用电化学阻抗测试对等离子体处理前后的复合电极进行进一步的分析, 并采用等效电路进行拟合, 结果如图 6(c) 所示。从图 6(c) 中可以看出, 从高频区域来看, Ni-NF 的内部电阻 (R_s) 为 0.48 Ω , 小于 Ni-NF-J300 的 0.54 Ω , 说明 Ni-NF-J300 的电导率低于未经等离子体处理样品的电导率。这是因为经氧气大气压射流等离子体处理后的 Ni-NF 材料一部分氢氧化镍转变为了氧化镍, 而氧化镍的电导率要低于氢氧化镍, 因此导致 R_s 下降。在高频区, 奈奎斯特曲线中圆弧部分对应圆的直径为电极的电荷转移电阻 (R_{ct})。Ni-NF-J300 的电荷转移电阻 R_{ct} 值为 1.36 Ω , 小于 Ni-NF 的 2.38 Ω , 表明 Ni-NF-J300 样品的电子传递效率更高。电化学阻抗结果表明, 等离子体处理后的 Ni-NF 样品电荷转移电阻更低, 促进了氧化还原反应的进行。2 个样品在 20 A/g 下经过 2 000 个循环的容量保持率如图 6(d) 所示。从图 6(d) 中可以看出, Ni-NF-J300 的容量保持率为 77.6%, 稍好于 Ni-NF 的 74.4%。

3.3 等离子体发射光谱

发射光谱用于探索等离子体区域中活性物质的生成。采用多通道发射光谱仪对射流等离子体进行发射光谱的测定, 如图 7 所示。测试过程中光纤探头对准等离子体射流根部, 距离为 20 mm。从图 7 中可以看出, 在 300~900 nm 波长范围内检测到多个活性氧的发射峰。其中 660.6 nm 处的峰对应于 O I 的发射峰, 属于氧的单线态激发态(闭壳), 该状态下氧的能量极大、活性极高。其中 337.4、677.5 和 725.2 nm 对应于 O II 的发射峰, 该峰为氧的单线态激发态(闭壳)。

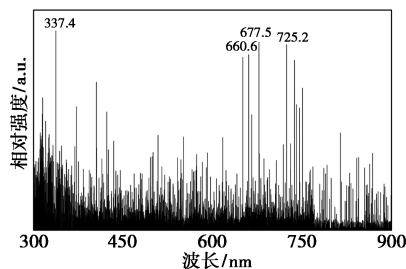


图 7 大气射流等离子体发射光谱

4 结论

采用水热法在泡沫镍基底上成功生长出氢氧化镍, 随后通过氧气大气压射流等离子体对所得 Ni-NF 电极进行改性处理, 最终制备出具有卓越电化学性能的电极材料。实验结果显示, Ni-NF 电极在电

流密度为 1 A/g 时的比容量为 1 712.3 F/g。而经过等离子体处理 300 s 后的电极,在相同电流密度下,比容量提升至 2 124.5 F/g,增长率高达 24%。此外,处理过后的电极在 20 A/g 下经过 2 000 次循环后,电容保持率为 77.6%。进一步揭示电化学性能提升的原因:一方面,等离子体处理改变了氢氧化镍的表面结构,使得片层变得更薄,有利于电极材料与电解质充分接触,增强了材料的离子扩散速率;另一方面,生成了少量的氧化镍,改善了电极材料的电化学性能。综上所述,通过氧气大气压射流等离子体对 Ni-NF 电极进行改性处理,成功地提升了其电化学性能,为制备高效超级电容器电极材料提供了新的思路与方法。

参考文献

- [1] Ghosh S, Yadav S, Devi A, *et al.* Techno-economic understanding of Indian energy-storage market: A perspective on green materials-based supercapacitor technologies [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2022, 161: 112412.
- [2] Theerthagiri J, Karuppasamy K, Lee S J, *et al.* Fundamentals and comprehensive insights on pulsed laser synthesis of advanced materials for diverse photo- and electrocatalytic applications [J]. *Light Sci Appl*, 2022, 11(1): 250–297.
- [3] Lee S J, Theerthagiri J, Nithyadharseni P, *et al.* Heteroatom-doped graphene-based materials for sustainable energy applications: A review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2021, 143: 110849.
- [4] Wang Y, Song Y, Xia Y. Electrochemical capacitors: mechanism, materials, systems, characterization and applications [J]. *Chem Soc Rev*, 2016, 45(21): 5925–5950.
- [5] Zou C, Zhao Q, Zhang G, *et al.* Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era [J]. *Natural Gas Industry B*, 2016, 3(1): 1–11.
- [6] Naik Shreyanka S, Theerthagiri J, Lee S J, *et al.* Multiscale design of 3D metal-organic frameworks (M-BTC, M: Cu, Co, Ni) via PLAL enabling bifunctional electrocatalysts for robust overall water splitting [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 446: 137045.
- [7] Xu B, Zhang H B, Mei H, *et al.* Recent progress in metal-organic framework-based supercapacitor electrode materials [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2020, 420: 213438.
- [8] 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.
- [9] 王惠颖, 安立宝. 基于碳纳米管的超级电容器电极材料研究进展 [J]. *现代化工*, 2023, 43(3): 30–35.
- [10] Chen R W, Yang Y, Huang Q B, *et al.* A multifunctional interface design on cellulose substrate enables high performance flexible all-solid-state supercapacitors [J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 32: 208–215.
- [11] Zhu R M, Duan H Y, Zhao Z M, *et al.* Recent progress of dimensionally designed electrode nanomaterials in aqueous electrochemical energy storage [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(15): 9535–9572.
- [12] 吕祥, 谢刚, 和晓才, 等. 球形氢氧化镍的制备及其电化学性能研究 [J]. *现代化工*, 2017, 37(7): 87–90, 92.
- [13] Goncalves J M, Martins P R, Araki K, *et al.* Recent progress in water splitting and hybrid supercapacitors based on nickel-vanadium layered double hydroxides [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2021, 57: 496–515.
- [14] Obodo R M, Shinde N M, Chime U K, *et al.* Recent advances in metal oxide/hydroxide on three-dimensional nickel foam substrate for high performance pseudocapacitive electrodes [J]. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2020, 21: 242–249.
- [15] Li J, Ma C, Zhu S, *et al.* A review of recent advances of dielectric barrier discharge plasma in catalysis [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(10): 1428.
- [16] Liu J, Li Y, Chen Y, *et al.* A review of low-temperature plasma-assisted machining: from mechanism to application [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2023, 18(1): 18.
- [17] 李文浩, 田朝, 冯绅绅, 等. 大气压等离子体射流装置及应用研究进展 [J]. *真空科学与技术学报*, 2018, 38(8): 695–707.
- [18] Xi Y, Wei G, Li J, *et al.* Facile synthesis of MnO₂-Ni(OH)₂ 3D ridge-like porous electrode materials by seed-induce method for high-performance asymmetric supercapacitor [J]. *Electrochimica Acta*, 2017, 233: 26–35.
- [19] Yan T, Li Z, Li R, *et al.* Nickel-cobalt double hydroxides microspheres with hollow interior and hedgehog-like exterior structures for supercapacitors [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(44): 23587–23592.
- [20] Tang Z, Tang C H, Gong H. A High energy density asymmetric supercapacitor from nano-architected Ni(OH)₂/carbon nanotube electrodes [J]. *Advanced Functional Materials*, 2012, 22(6): 1272–1278. ■
- [21] 2018, 436: 162–171.
- [22] Zhang J, Hu Y, Jiang X, *et al.* Design of a direct Z-scheme photocatalyst: preparation and characterization of BO/CN with high visible light activity [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 280: 713–722.
- [23] Shao B, Liu Z, Zeng G, *et al.* Nitrogen-doped hollow mesoporous carbon spheres modified g-C₃N₄/Bi₂O₃ direct dual semiconductor photocatalytic system with enhanced antibiotics degradation under visible light [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(12): 16424–16436.
- [24] Zinatloo-Ajabshir S, Mortazavi-Derazkola S, Salavati-Niasari M. Nd₂O₃-SiO₂ nanocomposites: A simple sonochemical preparation, characterization and photocatalytic activity [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, 42: 171–182. ■
- [25] Petit C, Seredych M, Bandoz T J. Revisiting the chemistry of graphite oxides and its effect on ammonia adsorption [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2009, 19(48): 9176–9185.
- [26] Chang F, Zhang J, Xie Y, *et al.* Fabrication, characterization, and photocatalytic performance of exfoliated g-C₃N₄-TiO₂ hybrids [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 311: 574–581.
- [27] Li X, Li W, Liu X, *et al.* Novel Yb³⁺/Nd³⁺ co-doped bismuth tungstate for excellent photocatalytic performance: Construction and synergistic effect of oxygen vacancies and in-built Yb³⁺/Yb²⁺ redox center [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 889: 161757.
- [28] Zhang L, Wang G, Xiong Z, *et al.* Fabrication of flower-like direct Z-scheme β-BO/CN photocatalyst with enhanced visible light photoactivity for Rhodamine B degradation [J]. *Applied Surface Science*,

(上接第 165 页)