

# 电沉积法制备镍钴氢氧化物/碳布复合材料及其电化学性能研究

赵晨<sup>1</sup>, 王静<sup>1\*</sup>, 田哲圭<sup>2\*</sup>, 蔡凡<sup>1</sup>, 姚思佳<sup>1</sup>, 闫斌<sup>1</sup>, 吴蓉祯<sup>1</sup>, 张赵越<sup>1</sup>, 刘浩冉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>安徽理工大学材料科学与工程学院, 安徽 淮南

<sup>2</sup>湖西大学半导体工程系, 韩国 牙山

收稿日期: 2026年1月4日; 录用日期: 2026年1月27日; 发布日期: 2026年2月9日

## 摘要

为满足柔性超级电容器对高性能电极材料的迫切需求, 本研究采用电沉积法在亲水碳布(HCC)上原位生长镍钴层状双氢氧化物(NiCo-LDH), 系统探究了沉积时间(1000 s、1500 s、2000 s)对复合材料形貌、晶体结构及电化学性能的影响。通过扫描电镜(SEM)、X射线衍射(XRD)和X射线光电子能谱(XPS)等表征手段证实, 1500 s沉积条件下所得材料具有均匀的纳米片层结构、较高的结晶度以及良好的Ni<sup>2+</sup>/Ni<sup>3+</sup>与Co<sup>2+</sup>/Co<sup>3+</sup>氧化还原活性。电化学测试表明, 该材料在1 A/g电流密度下比电容高达1588 F/g, 经过3000次循环后, 电容保持率达74.7%, 展现出优异的循环稳定性与快速的电荷传输动力学。本研究验证了电沉积法在温和条件下构筑结构可控、性能突出的柔性电极材料的可行性, 为高性能超级电容器的设计与开发提供了重要参考。

## 关键词

电沉积, 复合材料, 超级电容器, 电化学性能, 柔性电极材料

# Study on the Electrodeposition of Nickel-Cobalt Hydroxide/Carbon Cloth Composites and Their Electrochemical Properties

Chen Zhao<sup>1</sup>, Jing Wang<sup>1\*</sup>, Zhegui Tian<sup>2\*</sup>, Fan Cai<sup>1</sup>, Sijia Yao<sup>1</sup>, Bin Yan<sup>1</sup>, Rongzhen Wu<sup>1</sup>, Zhaoyue Zhang<sup>1</sup>, Haoran Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Material Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

<sup>2</sup>Department of Semiconductor Engineering, Hoseo University, Asan, South Korea

\*通讯作者。

文章引用: 赵晨, 王静, 田哲圭, 蔡凡, 姚思佳, 闫斌, 吴蓉祯, 张赵越, 刘浩冉. 电沉积法制备镍钴氢氧化物/碳布复合材料及其电化学性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(2): 128-136. DOI: 10.12677/ms.2026.162031

## Abstract

To address the urgent demand for high-performance electrode materials in flexible supercapacitors, this study employed an electrodeposition method to *in situ* grow nickel-cobalt layered double hydroxide (NiCo-LDH) on hydrophilic carbon cloth (HCC). The effects of deposition time (1000 s, 1500 s, 2000 s) on the morphology, crystal structure, and electrochemical performance of the composite material were systematically investigated. Characterization via scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) confirmed that the material synthesized under 1500 s deposition conditions exhibits a uniform nanolayer structure, high crystallinity, and excellent  $\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}^{3+}$  and  $\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$  redox activity. Electrochemical testing revealed a specific capacitance of 1588 F/g at a current density of 1 A/g. After 3000 cycles, the capacitance retention reached 74.7%, demonstrating excellent cycling stability and fast charge transfer kinetics. This study validates the feasibility of using electrodeposition to construct structurally controllable, high-performance flexible electrode materials under mild conditions, providing important reference for the design and development of high-performance supercapacitors.

## Keywords

Electrodeposition, Composite Materials, Supercapacitors, Electrochemical Performance, Flexible Electrode Materials

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

随着能源存储需求的日益增长, 超级电容器因其高功率密度、快速充放电能力和长循环寿命而备受关注[1]-[3]。电极材料作为决定其性能的核心组件, 其设计与合成策略尤为关键[4]。镍钴层状双氢氧化物(NiCo-LDH)因其丰富的氧化还原活性、较高的理论比电容和可调控的层状结构, 被视为极具潜力的赝电容电极材料。然而, 其实际性能受到制备方法的显著影响[5]。

传统水热法虽可合成高性能 NiCo-LDH, 但通常依赖于高温高压环境, 反应时间长, 且工艺参数对产物形貌与均匀性影响显著, 尤其在柔性基底(如碳布)上易引起结构损伤或性能不均[5]-[11]。因此, 发展一种温和、可控的合成方法以实现 NiCo-LDH 在柔性导电基底上的均匀负载与结构优化, 成为提升其电化学性能的重要途径[1] [12]-[14]。

电沉积法作为一种新兴的合成技术, 可在常温常压下通过电场引导金属离子定向还原与沉积, 具有反应条件温和、成膜均匀、形貌可控性强等独特优势[5]。该方法不仅能避免高温对柔性基底的结构破坏, 还可通过调节沉积电位、时间及电解液组成等手段[15]-[17], 精准调控 NiCo-LDH 的晶体结构、纳米形貌及界面特性, 从而优化其导电性、离子扩散动力学与电化学活性[18] [19]。

鉴于此, 本研究采用电沉积法在亲水碳布(HCC)上原位生长镍钴氢氧化物(NiCo-LDH), 系统考察沉积时间对材料微观结构、形貌演变及电化学性能的影响规律[19]。通过扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)和 X 射线光电子能谱(XPS)等手段对复合材料进行物性表征, 并借助循环伏安(CV)、恒流充放电(GCD)和

交流阻抗(EIS)等电化学测试, 深入探究其在超级电容器中的储能机制与性能表现, 旨在为高性能、柔性化电极材料的可控合成与设计提供理论依据与实验参考[20]。

## 2. 实验

### 电沉积法制备镍钴氢氧化物与超亲水碳布复合材料

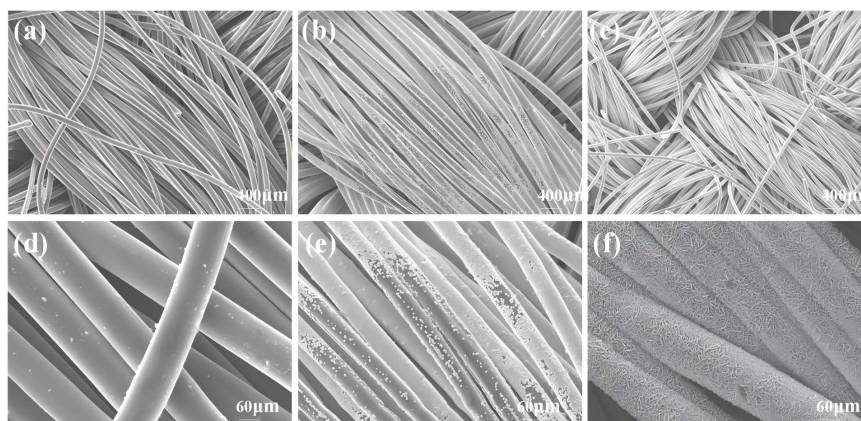
首先, 称取 5 mmol  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  溶解于 100 mL 去离子水, 超声拌 30 min 制成电解液。将酸化后的亲水碳布作为工作电极, 氯化银( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ )电极作为参比电极, 铂片作为对电极, 采用恒压法施加 -1V 电压进行沉积, 沉积时间为 1000 s、1500 s 和 2000 s。

待沉积完成后, 再使用无水乙醇和去离子水充分的冲洗亲水碳布表面, 然后放置于真空干燥箱中, 保持温度为  $60^\circ\text{C}$  下持续干燥 12 h 后, 即可获得 NiCo-LDH/HCC。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 样品表征分析

图 1 为电化学沉积制备的 NCL/HCC 复合材料扫描电镜图, 从图 1(a)~(c)可看出, 图像中的纤维结构清晰可见, 主要展示了碳布纤维表面的形态。图中呈现纤维细长且交织布置, 其形成较大的网络结构。此结构利于增强复合材料的机械强度, 还为氢氧化物沉积提供了更多表面积与反应位点。图 1(d)~(f)能看到, 氢氧化钴与氢氧化镍以颗粒或者纳米结构的形式, 在碳布纤维表面沉积着。氢氧化钴的颗粒很细小, 有的是微粒状, 还有的是层状分布于纤维表面。这说明氢氧化钴在电沉积时, 沉积层比较均匀, 比表面积也比较大。这对提高电化学反应活性和储能性能有帮助。氢氧化镍呈现为细长的颗粒或者纳米片状的结构, 特别是在放大倍率较低的时候, 其片层结构更明显。这些片层的排列提供了更多反应位点, 电化学活性也增强了。电沉积法提供了较高的沉积均匀性和精确控制能力, 通过控制沉积电流密度和时间, 能够调节氢氧化钴和氢氧化镍的沉积层的结构, 进而影响材料的导电性、比表面积、离子扩散速率等性能。



**Figure 1.** SEM images of NCL/HCC-1000s ((a), (d)); SEM images of NCL/HCC-1500s ((b), (e)); and SEM images of NCL/HCC-2000s ((c), (f))

**图 1.** NCL/HCC-1000s 的((a), (d)) SEM 图像; NCL/HCC-1500s 的((b), (e)) SEM 图像; 和 NCL/HCC-2000s 的((c), (f)) SEM 图像

在不同电沉积时间的条件下, NCL/HCC 电极材料的形貌有显著区别。如图 1(a), 图 1(d)所示, 电沉积时间为 1000 s 时, NCL/HCC 电极材料的纳米结构可能尚未完全有序, 表面较为光滑, 纤维形态可能表

明沉积层没有完全结合,这可能为材料的电导性及电荷转移效率产生负面影响。如图 1(e),图 1(f)所示,随着电沉积时间的延长,纳米纤维趋于均匀且排列紧密,沉积物显得更加致密,且微观结构的特征愈加清晰。电极材料孔隙度的降低,进一步优化了电极材料的导电性能,满足了更高电流密度的需求。

运用 X-射线衍射(XRD)技术来剖析制备的复合材料的晶体结构。实验结果如图 2 所示,衍射峰出现在大约  $2\theta = 27^\circ$  和  $2\theta = 38^\circ$ ,这两个峰通常与  $\text{Co}(\text{OH})_2$  和  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  的特征峰相对应,分别与  $\text{Co}(\text{OH})_2$  的(001)晶面和  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  的(101)晶面有关。并且,随着电沉积的增多,由 NCL/HCC-1000s (蓝色曲线)变到 NCL/HCC-1500s (红色曲线),衍射峰慢慢变强。这意味着在电沉积时间较长的时候,氢氧化钴与氢氧化镍的结晶度或许会提升,进而让其晶体结构变得更有序,呈现出较强的衍射峰强度。从 NCL/HCC-1500s (红色曲线)到 NCL/HCC-2000s (黑色曲线),衍射峰稍微变宽且减弱了。这或许是因为沉积时间长或者热处理过程长,致使晶体结构不完全或者变形了。

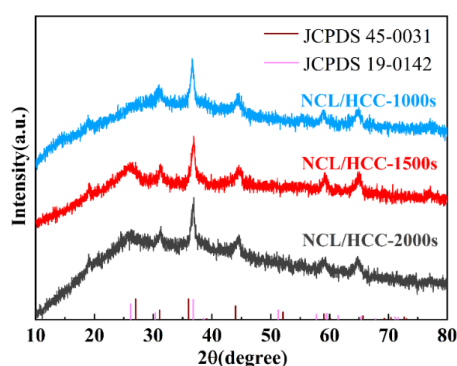


Figure 2. NCL/HCC XRD spectrum

图 2. NCL/HCC XRD 图谱

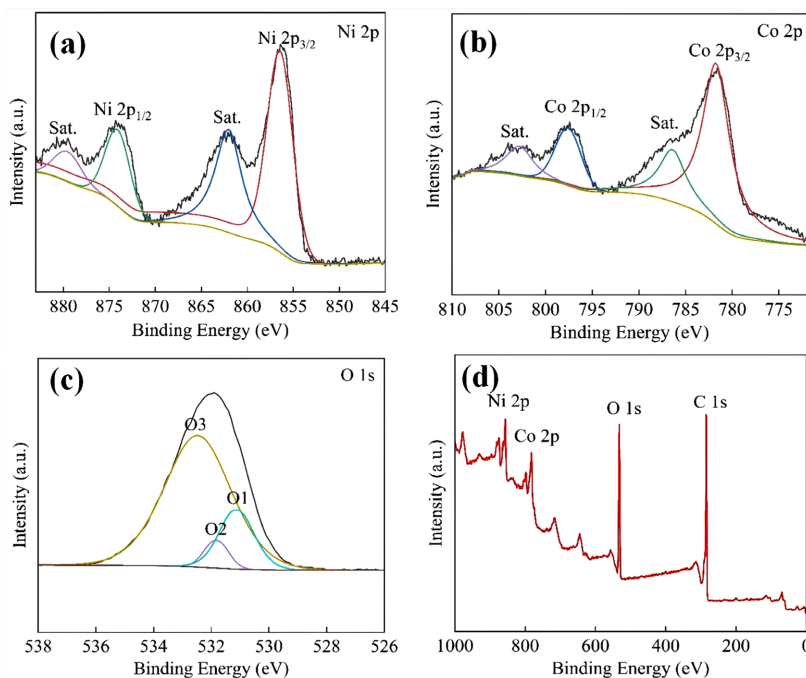


Figure 3. XPS spectra: (a) Ni spectrum; (b) Co spectrum; (c) O spectrum; (d) survey spectrum

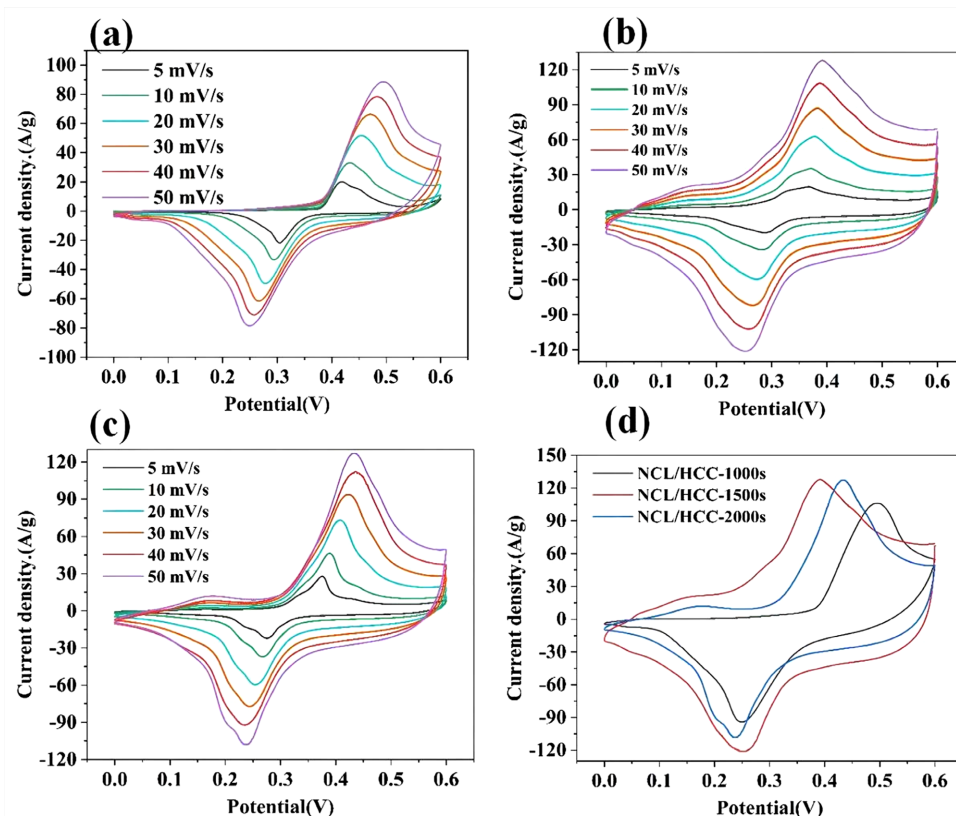
图 3. XPS 谱图: (a) Ni 图谱; (b) Co 图谱; (c) O 图谱; (d) 全谱

如图 3(d)所示, 通过 X-射线光电子能谱(XPS)分析确定复合材料 NCL/HCC 主要由 C、O、Ni 和 Co 组成。详见图 3(a), 在 Ni 2p 的特征谱图中可以观察到这三种材料皆在 856.6 eV (Ni 2p<sub>3/2</sub>)和 874.4 eV (Ni 2p<sub>1/2</sub>)展现的两组轨道峰, 以及伴随卫星峰, 均与材料中的 Ni<sup>2+</sup>/Ni<sup>3+</sup>对应。如图 3(b)所示, 在 Co 2p 的特征谱图中, Co 2p 谱线的分裂模式表明氢氧化钴主要以 Co<sup>2+</sup>存在。类似于 Ni 2p 谱线, Co 2p 谱线中也出现了饱和峰, 这是由于氢氧化物的氧还原反应所引起的电子跃迁效应。在 O 1s 的特征图谱图 3(d)中, 在 530 eV 出现的拟合峰与氢氧化 物中的氧离子(O<sup>2-</sup>)相关, 代表氢氧化钴和氢氧化镍中的氧化态氧, 在 532eV 和 533 eV 出现的拟合峰对应氢氧根和吸附的氧原子。

### 3.2. 复合材料的电化学性能分析

#### (1) 循环伏安法

在三电极体系下, 采用循环伏安法对制备的电极材料进行测试。(扫描速率为 5~50 mV/s, 电压为 0~0.6 V)。该曲线呈现出对称的锯齿状形态, 表明材料具有典型的电容性行为, 并且其电荷存储过程包括双电层电容和伪电容的协同作用。由于材料的电化学反应迅速, CV 曲线在不同扫描速率下表现出一致的形状, 说明材料在快速充放电过程中保持了良好的电容性能。



**Figure 4.** CV curves at different scan rates: (a) NCL/HCC-1000s; (b) NCL/HCC-1500s; (c) NCL/HCC-2000s; and (d) comparison of CV curves at 50 mV/s

**图 4.** 不同扫描速率下的 CV 曲线(a) NCL/HCC-1000s; (b) NCL/HCC-1500s; (c) NCL/HCC-2000s 和(d) 50 mV/s CV 曲线对比图

图 4(a), 图 4(b), 图 4(c)分别展示了三个样品的 CV 曲线, 通过观察发现在 0.2~0.5 V 的电压范围内, 氧化还原峰呈现较为对称的形态, 这主要源自于 Ni<sup>2+</sup>/Ni<sup>3+</sup>和 Co<sup>2+</sup>/Co<sup>3+</sup>之间的氧化还原反应, 详见公式(1)

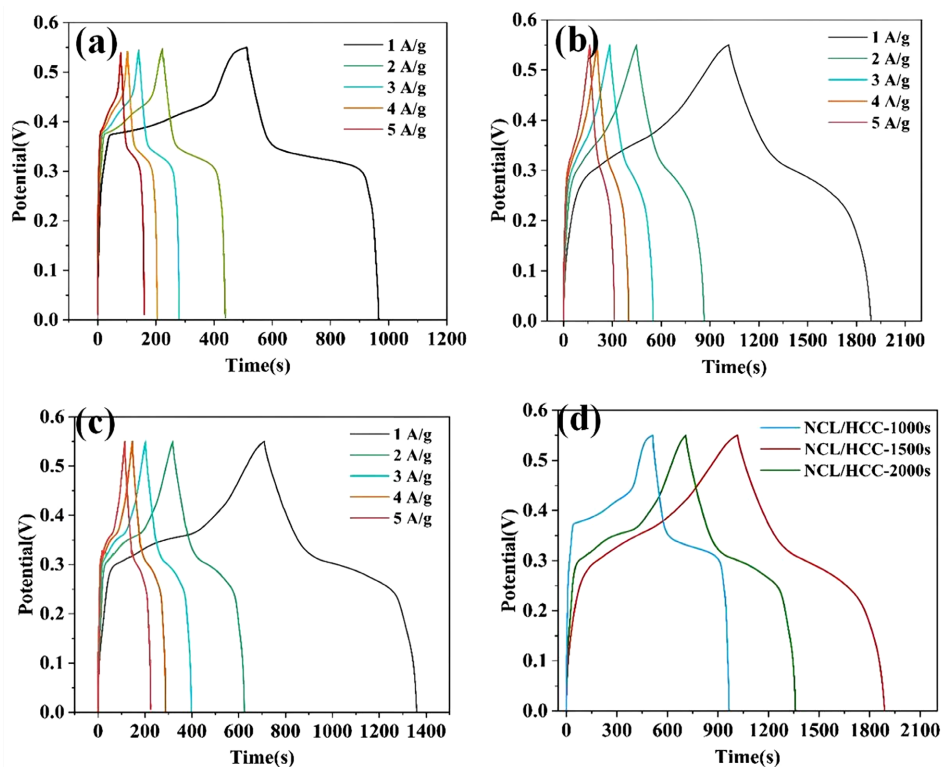
和(2); 增大扫描速率时, 电流密度增大, 不过曲线宽度变化不大。这就显示, 电解质离子的扩散速度还是能跟上电极反应的速率。在这一过程里, 还原峰倾向于向低电位移动, 氧化峰则是向高电位偏移。这一现象主要是扫描速率不断升高, 电化学反应受扩散限制, 影响氧化还原峰位置。



图 4(d)展示了在扫描速率为 50 mV/s 时, 三种不同电极材料的 CV 曲线对比。如图所示, NCL/HCC-1500s 的曲线面积明显比 NCL/HCC-1000s 和 NCL/HCC-2000s 要大。较短的电沉积时间(1000 s)可能导致材料未能充分形成理想的纳米结构, 表面较为光滑, 从而影响了其电化学性能。而较长的电沉积时间(如 2000 s)可能导致材料表面的结晶性发生变化, 产生更多晶格缺陷或不均匀的沉积层, 电沉积时间过短或过长均可能通过改变材料的微观结构, 进而影响其电化学行为。NCL/HCC-1500s 的电沉积时间还算合理, 结果它结构更均匀, 电化学表现更出色, 在 CV 曲线上的表现面积更大。

## (2) 恒流充放电法

在三电极体系下, 采用恒流充放电法对制备的电极材料进行测试。(电流密度为 1~5 A/g, 电压为 0~0.6 V)。图 4(a), 图 4(b), 图 4(c)为不同电流密度下的 NCL/HCC 的 GCD 曲线, 可以看到随着电流密度的增加, 充放电时间显著缩短。例如, 1 A/g 时充放电曲线较为平稳, 而 5 A/g 时, 曲线变得更加陡峭, 充放电时间显著减少。高电流密度下, 电池的电压变化更加迅速, 这反映了电池在较短时间内完成充放电过程, 但也表明高电流密度可能引起电解质离子的扩散限制, 影响电池的电化学性能。



**Figure 5.** GCD curves at different current densities: (a) NCL/HCC-1000s; (b) NCL/HCC-1500s; (c) NCL/HCC-2000s; and (d) comparison of 1 A/g GCD curves

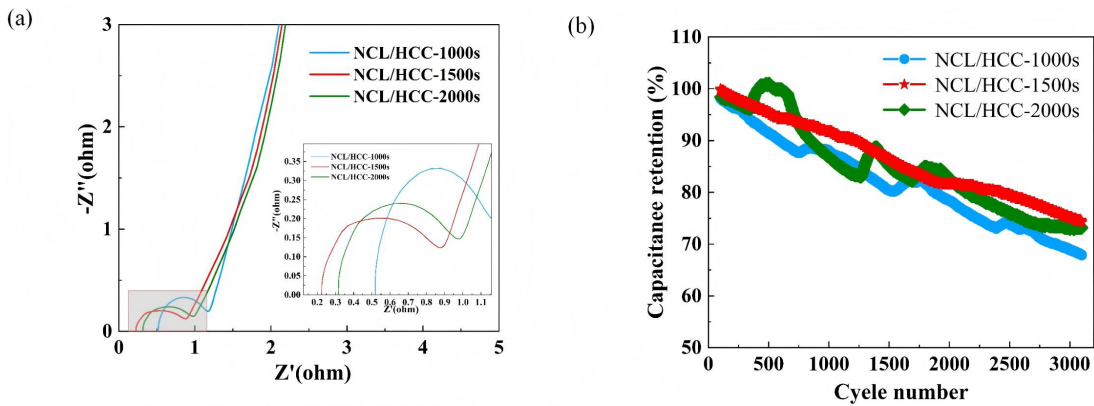
**图 5.** 不同电流密度下的 GCD 曲线(a) NCL/HCC-1000s; (b) NCL/HCC-1500s; (c) NCL/HCC-2000s 和(d) 1 A/g GCD 曲线对比图

GCD 曲线的对称性体现了该材料在充放电时的电化学可逆性，电极材料可以高效地存储和释放电荷。如图 5(d)所示，在 1 A/g 电流密度下三种材料的 GCD 曲线对比。从图中可以明显看到，NCL/HCC-2000s 复合材料具有最长的放电时间，且其对应的比电容值也最大。在 1 A/g 电流密度时，NCL/HCC-2000s 复合材料的比电容达 1588 F/g。电流密度逐渐增至 5 A/g 时，NCL/HCC-2000s 复合材料的比电容平均保持率会达到 86.6%，明显优于另外两个电极材料。表 1 详细列出了在不同电流密度下 NCL/HCC 复合材料的比电容数据。实验通过用电化学沉积法制备的 NCL/HCC 复合材料，在比电容和倍率性能上，都得到明显的提升。NCL/HCC-1000s 电极复合材料的表现比较意外，低于未进行复合时的 NiCo-LDH 电极材料的比电容，或许可能是因为该材料的晶格结构或者表面活性位点减少造成的。

**Table 1.** The specific capacitance of NCL/HCC  
**表 1.** NCL/HCC 的比电容

| 材料比电容(F/g)    | 1 A/g | 2 A/g | 3 A/g | 4 A/g | 5 A/g |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NCL/HCC-1000s | 823   | 783   | 754   | 734   | 732   |
| NCL/HCC-1500s | 1588  | 1511  | 1458  | 1417  | 1376  |
| NCL/HCC-2000s | 1183  | 1115  | 1067  | 1035  | 1015  |

(3) 交流阻抗法和长循环测试



**Figure 6.** (a) AC impedance plot and (b) long-cycle test curves  
**图 6.** (a) 交流阻抗图和(b) 长循环测试曲线

交流阻抗测试在开路电位下进行，振幅设定为 5 mV，频率范围从 0.01 Hz 到 100 kHz。如图 6(a)所示，NCL/HCC 的交流阻抗谱在高频区域，阻抗谱呈现出近似半圆形的形状，这一部分主要反映了材料与电解液之间的电荷转移电阻。NCL/HCC-1500s 样品的半圆直径最小，表明该样品的电荷转移电阻最低，即其具有较高的电化学活性和较快的电子传输能力。较小的半圆直径表示该材料的电子导电性较好，且在电荷转移过程中，电解质离子和电子的扩散都较为顺畅。

图 6(b) HCC 复合材料在电流密度 5 A/g 下，历经 3000 次充放电的循环实验稳定性曲线。如图所示，NCL/HCC-1500s 的电容在经过 3000 次充放电循环实验后容量保持率最高为 74.7%，而较长的电沉积时间(2000 s)导致了材料的电容衰减增加，这可能是由于晶体结构不均匀、表面缺陷增多或电解液渗透性下降等问题，进而影响了材料的电化学稳定性。不同电沉积时间下复合材料长循环后的容量保持率如表 2 所示。

在近似半圆后的那一段叫做中低频区域，电极材料的电容性就凭借线性部分的斜率来呈现，这跟电

容性行为关联密切，代表着材料里离子的扩散过程。较低频率时，离子于电极/电解质界面上的扩散会决定电池的电容性。电极材料的内阻( $R_s$ )能够从交流阻抗谱中曲线与 X 轴的交点获取出来，这截距意味着电极材料跟电解液之间的总电阻，涵盖电极材料自身的电阻，还有电荷转移时产生的阻力。其中，NCL/HCC-1500s ( $R_s$ ) = 0.221  $\Omega$ ，明显低于 NCL/HCC-1000s (0.511 $\Omega$ )和 NCL/HCC-2000s (0.314 $\Omega$ )，在法拉第反应过程中，NCL/HCC-1500s 电极材料的电荷转移阻力较小，该材料在电荷转移过程中具有较高的效率。在低频区域的线性部分，NCL/HCC-1500s 呈现出最大直线斜率，这与电极材料的离子扩散特性有很大关系。较大斜率值表示离子于材料里的扩散更顺畅。那电极材料在充放电的时候，能更高效地把电荷存储和释放，所以电化学可逆性就更好。

**Table 2.** Capacity retention of all composite materials after 3000 cycles  
**表 2.** 所有复合材料 3000 次循环后容量保持率

| 复合材料          | 容量保持率(%) |
|---------------|----------|
| NCL/HCC-1000s | 74.6     |
| NCL/HCC-1500s | 74.7     |
| NCL/HCC-2000s | 69.7     |

4. 结论

通过电沉积法合成镍钴氢氧化物与亲水碳布复合材料 NCL/HCC，通过调整电化学沉积时间，控制了镍钴氢氧化物纳米材料的晶体形态和尺寸，通过表征和测试，探究电沉积恒压法对金属氢氧化物结构和电化学性能的影响。结论如下：

- (1) 氢氧化钴和氢氧化镍以颗粒或纳米结构的形式沉积在碳布纤维表面。其中，氢氧化钴以细小的颗粒状或层状的形式分布在纤维表面，这种形态表明氢氧化钴在电沉积过程中形成了较为均匀的沉积层，并且提供了较大的比表面积，有助于提升电化学反应活性和储能性能。在 1500 s 电沉积时间下，氢氧化钴和氢氧化镍的结晶度提高，导致其晶体结构的更加有序，表现为较强的衍射峰强度。在大约  $2\theta = 27^\circ$  和  $2\theta = 38^\circ$ ，这两个峰与  $\text{Co}(\text{OH})_2$  和  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  的特征峰相对应。
- (2) 在三电极体系下进行的电化学性能测试中，NCL/HCC-1500s 复合材料表现出最佳的电化学性能。在恒流充放电测试中，当电流密度为 1 A/g 时，NCL/HCC-1000s、NCL/HCC-1500s 和 NCL/HCC-2000s 复合材料的比电容分别为 823 F/g、1588 F/g 和 1183 F/g。其中，NCL/HCC-1500s 的比电容明显高于水热法合成的 NCL/HCC (982 F/g)。当电流密度增加至 5 A/g 时，NCL/HCC-1500s 复合材料的比电容保持率达到 86.6%，在长时间循环测试中，NCL/HCC-1000s、NCL/HCC-1500s 和 NCL/HCC-2000s 复合材料的比电容保持率分别为 74.6%、74.7%和 69.7%。这些结果表明，电沉积法制备镍钴氢氧化物/碳布复合材料在电沉积时间 1500 s 时在超级电容器中有良好的应用潜力。

基金项目

- 1. 安徽理工大学揭榜挂帅项目“传感器电极修饰关键材料研究”JBGS2024GDYJY009；2. Hoseo 大学创新支持项目研究基金(2024-0015-01)。

参考文献

[1] Yu, R., Li, Z., Lan, Y., Wang, Q., Dai, J. and Lu, X. (2024) Two-Step Electrodeposition Synthesis of Nano-Clustered Ni@NiCo-LDH Heterostructure as Cathodes for High-Performance Hybrid Supercapacitors. *Electrochimica Acta*, **483**, Article ID: 144031. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144031>

[2] Wang, Y., Yin, Z., Wang, Z. and Guo, H. (2023) Fabrication of NiCo Layered Double Hydroxide on Carbon Fiber Paper

- as High Performance Binder-Free Electrode for Supercapacitors. *Materials Research Bulletin*, **167**, Article ID: 112408. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2023.112408>
- [3] Fu, Y., Li, Y. and Lü, Q. (2024) In Situ Construction of Sea Urchin-Like Structural NiCo-LDH Coated Cobalt-Nitrogen Co-Doped Carbon as High-Performance Electrode for Supercapacitor. *Journal of Energy Storage*, **100**, Article ID: 113510. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.113510>
  - [4] Wang, S., Zou, Y., Xu, F., Xiang, C., Peng, H., Zhang, J., *et al.* (2021) Morphological Control and Electrochemical Performance of NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@NiCo Layered Double Hydroxide as an Electrode for Supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, **41**, Article ID: 102862. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102862>
  - [5] Wang, X., Zhang, Y., Song, X., Gao, J., Liu, Y. and Yang, S. (2024) Preparation and Capacitance Performance of NiCo Layered Double Hydroxide by Multi-Step Constant Current Electrodeposition Method. *Electrochimica Acta*, **497**, Article ID: 144514. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144514>
  - [6] Li, R., Shen, X., Li, J., Zhao, D., Zhao, R. and Wu, F. (2024) Enhanced Electrochemical Performance of NiCo-Layered Double Hydroxides: Optimal Synthesis Conditions and Supercapacitor Applications. *Advanced Sustainable Systems*, **9**, Article ID: 2400753. <https://doi.org/10.1002/adsu.202400753>
  - [7] Dai, Y., Zhao, H., Sa, R., Lin, Q. and Li, Y. (2025) Synergistic Coupling of NiCo-LDH in High-Performance Supercapacitors via Hydrothermal Method: Optimal Utilization of the Potential Window. *Journal of Alloys and Compounds*, **1010**, Article ID: 177091. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177091>
  - [8] Wang, Z. and Zhao, H. (2025) Preparation and Electrochemical Properties of Vanadium Doped NiCo-LDH Electrode Materials. *Journal of Physics: Conference Series*, **2951**, Article ID: 012129. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2951/1/012129>
  - [9] Wei, J., Zhang, C., Yang, X., Jia, J. and Qin, Z. (2025) Synthesis of Coo-Anchored Nickel-Cobalt Layered Hydroxide Nanowire Arrays via Low-Cobalt Hydrothermal Method for High-Performance Supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, **1021**, Article ID: 179517. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.179517>
  - [10] Yao, P., Li, Z., Zhu, J., Ran, X., Shi, Z. and Zhu, J. (2021) Controllable Synthesis of NiCo-LDH/Co(OH)<sub>2</sub>@PPY Composite via Electrodeposition at High Deposition Voltages for High-Performance Supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, **875**, Article ID: 160042. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160042>
  - [11] Torres Soto, H.E., Encinas, A. and de la Torre Medina, J. (2025) Cost-Effective Fabrication of NiCo-LDH/Ni Inverse Opal-Like Electrodes for High Current Stable Supercapacitors. *Journal of Physics: Materials*, **8**, Article ID: 015009. <https://doi.org/10.1088/2515-7639/ada30c>
  - [12] Vincent, M., Avvaru, V.S., Rodríguez, M.C., Haranczyk, M. and Etacheri, V. (2021) High-Rate and Ultralong-Life Mg-Li Hybrid Batteries Based on Highly Pseudocapacitive Dual-Phase TiO<sub>2</sub> Nanosheet Cathodes. *Journal of Power Sources*, **506**, Article ID: 230118. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230118>
  - [13] Li, H., Lin, S., Li, H., Wu, Z., Chen, Q., Zhu, L., *et al.* (2022) Magneto-Electrodeposition of 3D Cross-Linked NiCo-LDH for Flexible High-Performance Supercapacitors. *Small Methods*, **6**, e2101320. <https://doi.org/10.1002/smt.202101320>
  - [14] Fu, M., Zhang, Z., Chen, W., Huang, Y. and Yu, H. (2023) Honeycomb Nickel-Cobalt Layered Double Hydroxides Supported on Carbon Skeleton as High-Performance Electrodes in Supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, **938**, Article ID: 168527. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168527>
  - [15] Zhao, J., Zhou, C., Guo, Y., Shen, Z., Luo, G., Wu, Q., *et al.* (2024) Balancing Loading Mass and Gravimetric Capacitance of NiCo-Layered Double Hydroxides to Achieve Ultrahigh Areal Performance for Flexible Supercapacitors. *Advanced Powder Materials*, **3**, Article ID: 100151. <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2023.100151>
  - [16] Chauhan, P., Late, D.J., Patel, V., Sahatiya, P. and Sumesh, C.K. (2023) Hierarchical NiCo-LDH@MoS<sub>2</sub>/CuS Composite as Efficient Trifunctional Electrocatalyst for Overall Water Splitting and Asymmetric Supercapacitor. *Electrochimica Acta*, **469**, Article ID: 143197. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143197>
  - [17] Chen, X., Zhou, S., Wei, Y., Zhang, Z., Han, S. and Jiang, J. (2023) Heterogeneous Structure and Defect Engineering Mutual Coupling of NiCoP@NiCo-LDH for High-Performance Supercapacitors. *Electrochimica Acta*, **469**, Article ID: 143284. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.143284>
  - [18] Peng, S., Pan, Q., Qiao, Y., Wang, T., Htut, N.L., Chen, B., *et al.* (2024) Importance of Morphology of Layered Double Hydroxide in Electrochemical Energy Storage and Catalysis. *Small Methods*, **8**, e2400519. <https://doi.org/10.1002/smt.202400519>
  - [19] Li, P., Wang, X. and Yang, S. (2024) Preparation of Core-Shell NiCo-LDH@NiCo-Hydroxysulfide by Two-Step Electrodeposition for High-Performance Supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, **97**, Article ID: 112838. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112838>
  - [20] Hu, W., Fu, H., Chen, L., Wu, X., Geng, B., Huang, Y., *et al.* (2023) Synthesis of Amorphous Nickel-Cobalt Hydroxides with High Areal Capacitance by One-Step Electrodeposition Using Polymeric Additive. *Chemical Engineering Journal*, **451**, Article ID: 138613. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138613>