

原位电沉积镍钴双金属氢氧化物用于超级电容器电极材料的研究

丁雪薇, 严 威, 曾 婷, 张媛媛

武汉工程大学化学与环境工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年3月2日; 录用日期: 2025年3月27日; 发布日期: 2025年4月9日

摘 要

超级电容器具有高功率密度和快速充放电速率的特点。在本文中通过简单经济的电化学电沉积技术, 以硝酸镍和硫酸钴作为金属源, 通过一步电沉积法, 在石墨纸电极上生长了纳米球形NiCo LDH。通过多种分析技术对其形貌、组成和电化学性能进行分析, 结果表明球形NiCo LDH表面由三维交联的片层结构组成。同时NiCo LDH电极表现出优异的电化学性能, 在 $1\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 电流密度下的比电容为 $735\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$; $10\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 时充放电循环3000次, 电容保持率为80.4%。将其作为正极, 废纸衍生的碳材料AC作为负极构建了非对称超级电容器, 组装的NiCo LDH//AC非对称超级电容器(ASC)在功率密度为 $749.7\text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ 具有最大能量密度为 $21.7\text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$, 成功驱动小车模型, 展现了其实际应用的潜力。

关键词

电沉积, 层状双金属氢氧化物, 非对称超级电容器, 能量储存

In Situ Electrodeposition of Nickel-Cobalt Bimetallic Hydroxides as an Electrode Material in Supercapacitors Application

Xuwei Ding, Wei Yan, Ting Zeng, Yuanyuan Zhang

School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: Mar. 2nd, 2025; accepted: Mar. 27th, 2025; published: Apr. 9th, 2025

Abstract

Supercapacitors have the characteristics of high power density and fast charging and discharging

文章引用: 丁雪薇, 严威, 曾婷, 张媛媛. 原位电沉积镍钴双金属氢氧化物用于超级电容器电极材料的研究[J]. 材料科学, 2025, 15(4): 576-586. DOI: 10.12677/ms.2025.154062

rates. In this article, nano spherical NiCo LDH was grown on graphite paper electrodes using a simple and economical electrochemical deposition technique with nickel nitrate and cobalt sulfate as metal sources through a one-step electrodeposition method. Through various analytical techniques, the morphology, composition, and electrochemical properties of the spherical NiCo LDH were analyzed, and the results showed that the surface was composed of a three-dimensional cross-linked layer structure. Meanwhile, the NiCo LDH electrode exhibits excellent electrochemical performance, with a specific capacitance of $735 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at a current density of $1 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$; When charged and discharged 3000 times at $10 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$, the capacitance retention rate was 80.4%. Using it as the positive electrode and carbon material AC derived from waste paper as the negative electrode, an asymmetric supercapacitor was constructed. The assembled NiCo LDH//AC asymmetric supercapacitor (ASC) had a maximum energy density of $21.7 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ at a power density of $749.7 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$, successfully driving a car model and demonstrating its potential for practical applications.

Keywords

Electrodeposition, Layer Double Hydroxides, Asymmetric Supercapacitor, Energy Storage

Copyright © 2025 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

在全球经济扩张的推动下,对石油、天然气和煤炭等石化能源的需求不断上升,导致石油资源枯竭,并加剧了空气污染、全球变暖和气候变化等环境问题。因此,在到 2050 年实现净零碳排放目标的推动下,全球能源向绿色和可再生能源转型,加强了对能源转换和储存技术的研究[1]。在各种储能装置中,超级电容器因其快速充放电能力、优异的倍率性能、稳定的循环性能和高功率密度而引起了学者、专家和业界的广泛关注。在传统的对称双层电容器中,能量存储仅通过物理静电吸附在电极表面或表面附近进行,导致能量密度低。低能量密度对超级电容器的可持续发展构成了重大障碍,限制了它们在许多情况下的适用性。非对称超级电容器可以有效地利用正负极的不同电压窗口,显著拓宽工作电压窗口,提高能量密度[2] [3]。

过渡金属氢氧化物因其独特的二维层状结构、高比表面积、更多暴露的活性位点和多价氧化还原能力而受到广泛关注。过渡金属层状结构的丰富多样性和易于控制性,阴极材料中的双氢氧化物具有巨大的潜力[4]。同时由于 LDHs 纳米片以特定的方式有序排列生长,有效地提高了比电容、速率性能和循环稳定性。因此过渡金属氢氧化物材料被广泛应用于超级电容器的储能研究领域并取得一定的成果[5] [6]。Jiang 等人采用水热法在石墨烯包裹的碳纳米纤维布上合成了 NiCo 层状氢氧化物,基材优化、外部导电网络结构以及结构/成分改性的协同效应提高了电子电导率,增加了电活性反应位点,提高了结构稳定性,加速了动力学,从而带来了显著的速率能力和出色的循环稳定性[7]。Jung 等人实现在 NiCo LDH 基质中引入了网络化的 MXene 纳米片,这种由静电吸引控制的逐层组装确保了 MXene 和 NiCo LDH 之间牢固而紧密的接触。由此产生的 MXene 涂层 NiCo LDH 电极不仅体现了两种材料的组合强度,还表现出增强的电学属性、循环弹性以及优异的透明度,使其成为一种示例性的候选材料[8]。

本研究提出了一种利用电沉积法直接制备超级电容器活性材料的方法。以硝酸镍和硫酸钴作为金属源,通过一步电沉积法,在石墨纸电极上生长了纳米球形 NiCo LDH,这种材料在不使用粘结剂的条件下具有较高的导电性、强结合力,特殊的结构特征促进了电解液和电极材料之间快速的电子转移速率。通

过 SEM、TEM、XPS 详细研究了 NiCo LDH 电极材料的形貌、微观结构与组成,在三电极体系中通过 CV、GCD、EIS 测试了其电化学性能,并通过动力学计算分析了其电容贡献机制。将其作为正极,上一章中制备的 AC 作为负极,构建了非对称超级电容器,所构建的 ASC 器件表现出良好的循环寿命和能量密度,成功驱动小车模型,表明了其实际应用的潜力,为储能领域超级电容器器件设计提供了新的思路。

2. 实验

2.1. 材料的制备

2.1.1. 球形 NiCo LDH 的制备

通过恒电位沉积法合成 NiCo LDH。将 1.4539 g 六水合硝酸镍和 0.7028 g 七水合硫酸钴(Ni:Co 摩尔比为 2:1)溶解于 50 mL 的 0.5 M 硫酸钠溶液中,得到的混合溶液作为电解质,选用石墨纸为工作电极,在 -1.0 V 的电位下沉积 120 s。随后,将电极用去离子水和乙醇洗涤后烘干。具体合成流程图如下图 1 所示。

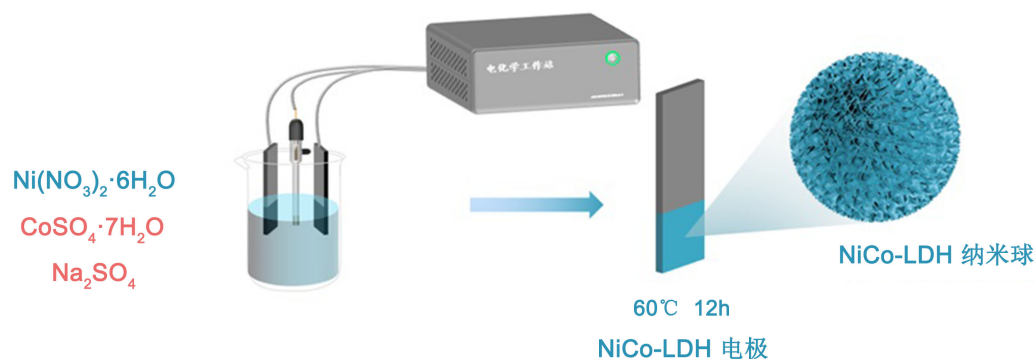


Figure 1. Synthetic schematic diagram of NiCo-LDH

图 1. NiCo-LDH 合成示意图

2.1.2. A4 纸衍生碳(AC)的制备

将 A4 纸剪碎,置于管式炉中,在 N_2 氛围下 400°C 热处理 2 h 使其预碳化。随后,按照 3:1 的质量比称取 KOH,与碳化的 A4 纸粉末混合均匀后,在 N_2 氛围下 800°C 处理 1 h。得到的灰黑色产物,经酸洗、水洗、烘干后,最后得到产物 AC。

2.2. 负极的制备

负极材料的制备步骤如下:将负极活性材料(AC)、乙炔黑、聚四氟乙烯(PTFE, 粘合剂)按质量比 8:1:1 准确称取,置于称量瓶中,加入一定量无水乙醇和 N-甲基-2-吡咯烷酮作为溶剂,超声 30 分钟使悬浊液充分混匀。放于鼓风干燥箱中烘至油墨状,均匀涂覆在石墨纸上,活性材料覆盖面积为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$, 60°C 烘干得到工作电极。称量石墨纸电极涂覆材料前后的质量,计算得到每个电极负载材料质量约为 1.5 mg 左右。

2.3. 非对称超级电容器(ASC)的组装

非对称超级电容器的正极材料由所制备的 NiCo LDH 组成,负极材料为 AC,通过质量匹配后进行组装,在三电极体系中, $50\text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 的扫速下 CV 预扫 20 圈,预扫的过程起到一个浸润和激活电极的作用。随后,将正极、纤维素隔膜、负极依次放置,借助电热夹板用塑封膜对其进行封装,在最后封口之前使

用注射器注入 2 mL KOH 溶液。

2.4. 电极材料的表征与性能测试

采用场发射扫描电子显微镜(FESEM)、透射电子显微镜(TEM)对样品的形貌和结构进行了研究,采用 X 射线光电子能谱(XPS)对样品表面的化学元素组成和价态进行了观察和分析。在三电极体系中,以 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 KOH 作为电解质溶液,上述材料制备的电极为工作电极,参比电极和对电极分别为饱和甘汞电极(SCE)和石墨纸电极进行循环伏安法(CV)、恒电流充放电(GCD)、电化学阻抗谱(EIS)等测试。经过质量配比后组装的两电极 ASC (NiCo LDH//AC)体系中,使用上述相同方法进行测试。

3. 结果与讨论

3.1. 材料 NiCo LDH 表征

利用扫描电子显微镜对材料的结构进行了表征,通过 SEM 图像观察 NiCo LDH 的形貌。高倍电镜图 SEM 观察图 2A, 图 2B 显示,材料表面呈现多个直径约为 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 球状聚集样貌,放大条件下的球形表面呈现出三维无序交联的片层结构,形成了三维通道,这种结构在电极材料的界面上提供了许多活性位点,这将有利于电解质离子在其表面扩散传输,从而增强电化学性能,同时,交联结构支撑也有利于充放电过程中结构的稳定。通过透射电镜 TEM 图像(图 2C, 图 2D)进一步观察其形貌,可以明显观察到球形结构,整个球呈现较深的颜色说明所制备的 NiCo-LDH 为实心球结构,同时观察到球形表面的交联层状结构,结果与 SEM 一致。

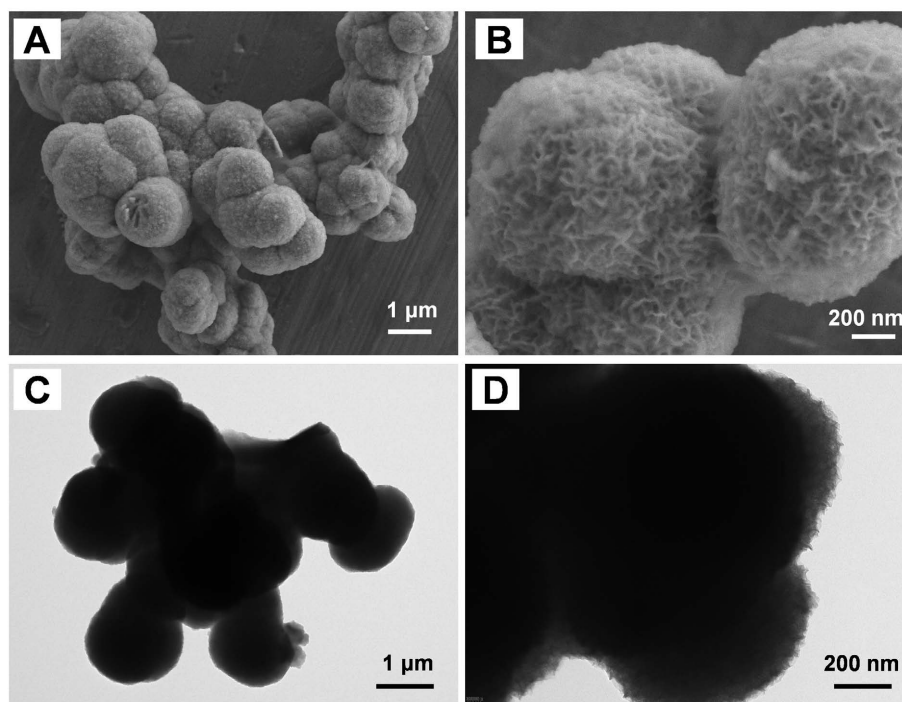


Figure 2. SEM images (A-B) and TEM images (C-D) of NiCo-LDH

图 2. NiCo-LDH 的 SEM 图像(A-B)和 TEM 图像(C-D)

利用 XPS 进一步检测了 NiCo LDH 的元素组成和价态。图 3A 是材料的全谱图,可以看到 Ni 2p, Co 2p 以及 O 1s 的特征峰,验证了 Ni、Co、O 元素的存在。为了分析元素的价态,对其精细谱图进行了拟

合分析。Ni 2p XPS 谱(图 3B)显示两种 Ni 价态, 在 873.4 和 855.9 eV 处的拟合峰对应 Ni^{2+} 的 Ni 2p_{3/2} 和 Ni 2p_{1/2} 信号, 而在 875.5 和 857.6 eV 可以归因于 Ni^{3+} 的 Ni 2p_{3/2} 和 Ni 2p_{1/2} 信号[9]。对于 Co 2p XPS 谱(图 3C), 799.5 eV 和 783.2 eV 处的拟合峰由 Co^{2+} 的 Co 2p_{3/2} 和 Co 2p_{1/2} 贡献, 797.1 eV 和 781.2 eV 处的拟合峰由 Co^{3+} 的 Co 2p_{3/2} 和 Co 2p_{1/2} 贡献[10]。O 1s 的高分辨率光谱(图 3D)显示了三个氧贡献信号, 在 530.7 eV 处的贡献表明 M-O 键(M=Ni, Co), 531.3 eV 处的拟合峰归属于与 -OH 信号, 532.5 eV 处的信号峰与吸附水有关[11]。上述表征进一步证实了 NiCo LDH 电极材料的成功合成。

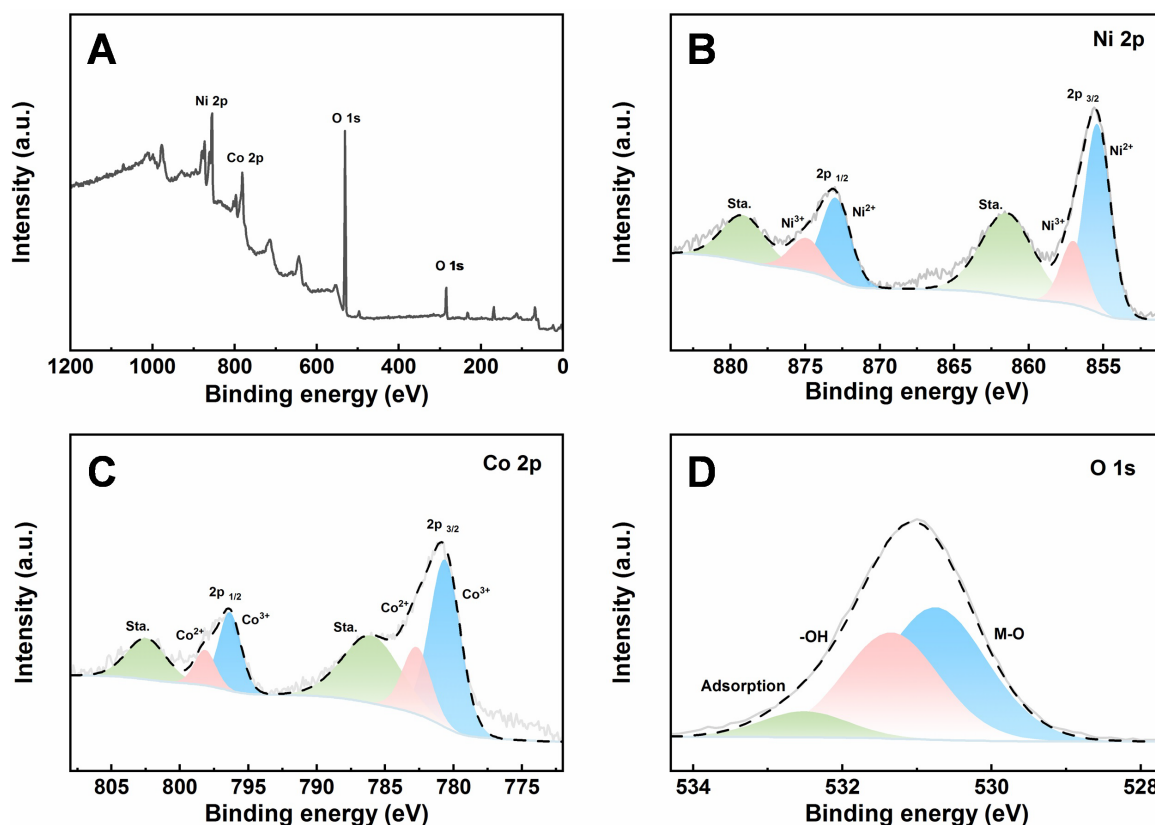


Figure 3. (A) XPS spectra of NiCo-LDH, (B-D) are the fine spectra of Ni 2p, Co 2p and O 1s respectively
图 3. (A) NiCo-LDH 的 XPS 谱图, (B-D) 分别为 Ni 2p、Co 2p 和 O 1s 的精细谱

3.2. 材料 NiCo LDH 电化学测试

采用恒流充放电(GCD)和循环伏安(CV)技术对电沉积所得 NiCo LDH 材料进行电化学测试, 并利用循环稳定性测试对材料潜在的使用寿命进行了评价。图 4A 和图 4C 为不同扫描速率下的循环伏安曲线和不同电流密度下的恒电流充放电曲线。CV 曲线均有明显的氧化还原峰, GCD 曲线均有明显的电压平台, 且呈现良好的对称性, 证明是典型的法拉第氧化还原反应[12]。

倍率性能是评价功率型超级电容电极性能的重要参数, NiCo LDH 的倍率性能通过 CV 和 GCD 的结果计算分析, 如图 4B 所示, 从 $10 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ 到 $50 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ 电容保持率为 65.7%; 另外, 图 4D 中, $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 时比电容为 $735.0 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$, $15 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 电容依然达到 $427.5 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$, 体现了较好的倍率性能。这样良好的倍率性能将保证在较大的电流密度下快速充放电依然保持较高的比容量。随后, 研究了 NiCo LDH 的循环稳定性, 如图 4E 所示, 在 $10 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 电流密度下充放电循环 3000 次, 电容保持率为 80.4%, 结果优于已报道的文献[9] [13]。长期的循环过程中, 库伦效率也基本保持不变, 整体维持在 96.8%左右。

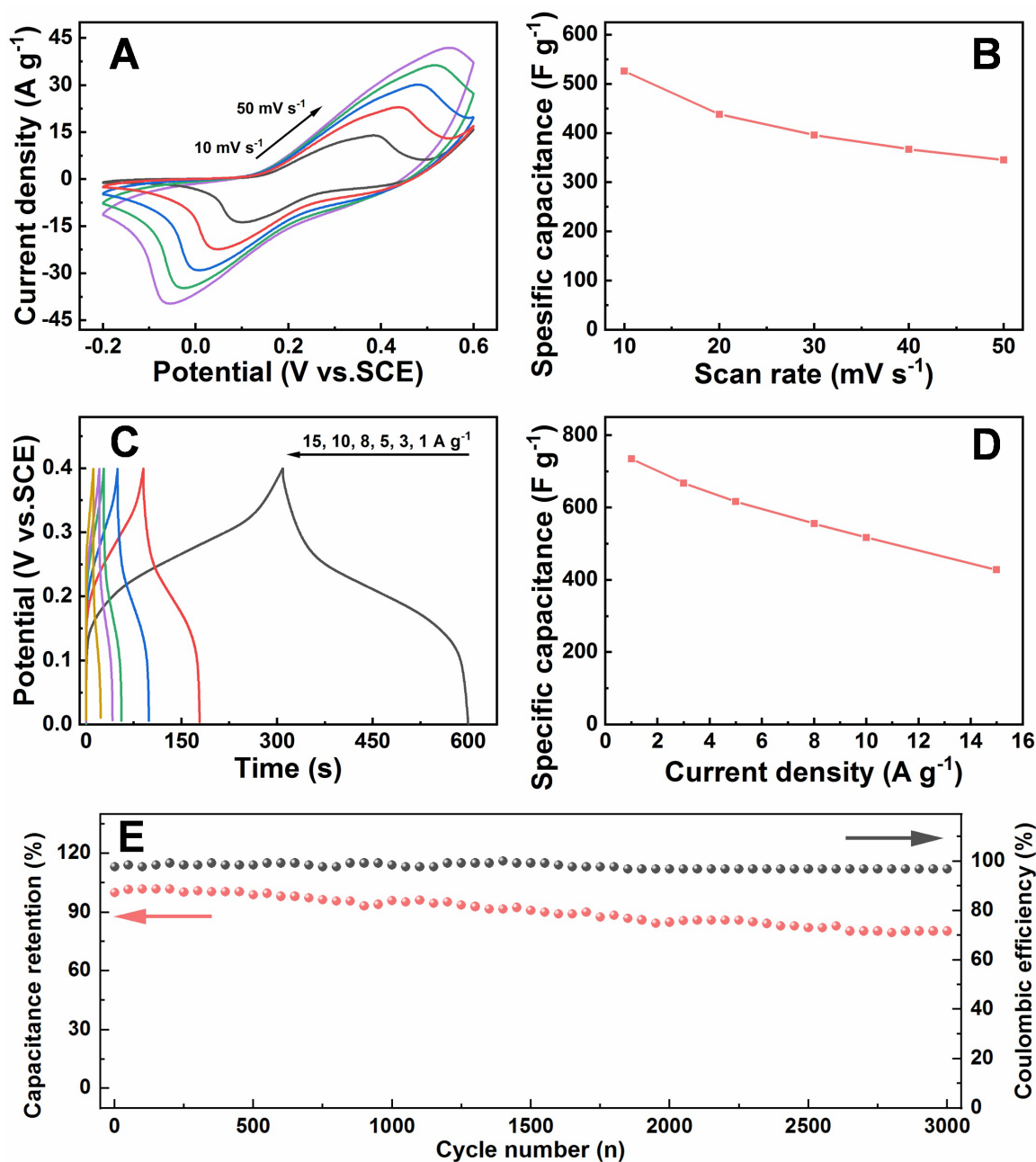


Figure 4. Electrochemical performance of NiCo LDH, (A) CV curves at different sweep rates, (B) Rate performance calculated based on CV, (C) GCD curves calculated at different current densities, (D) Rate performance calculated based on GCD, (E) Cycle stability at 10 A·g⁻¹ current density

图 4. NiCo LDH 的电化学性能, (A) 不同扫速下的 CV 曲线, (B) 基于 CV 计算的倍率性能, (C) 不同电流密度下的 GCD 曲线, (D) 基于 GCD 计算的倍率性能, (E) 10 A·g⁻¹ 电流密度下的循环稳定性

通过 CV 动力学分析, 定量评价了 NiCo LDH 电极的电荷存储机理, 有助于区分表面电容和扩散控制对电荷存储过程的贡献。通 CV 曲线峰电流与扫速的对数关系(图 5A), 进行线性拟合, 得到氧化峰与还原峰 b 值分别为 0.69 和 0.67, 说明 NiCo LDH 的电化学反应动力学过程由扩散和电容行为共同参与。进一步地计算拟合, 得到图 5B 的拟合曲线, 在 40 mV·s⁻¹ 这个特定的扫描速率下电容贡献部分积分面积占比为 79%, 这表明 NiCo LDH 电极快速表面反应和有效内部离子存储的协同组合, 共同提高了超级电

容器的整体性能。同样的方法可以计算得到不同扫速下表面电容和扩散控制贡献之间的比例关系,如图 5C 所示,随着扫速增大,电容贡献率从 55% 增大至 84%。扫速越大,电容贡献表现更强,说明在高扫速下,电化学反应是由电容行为主导的动力学过程。

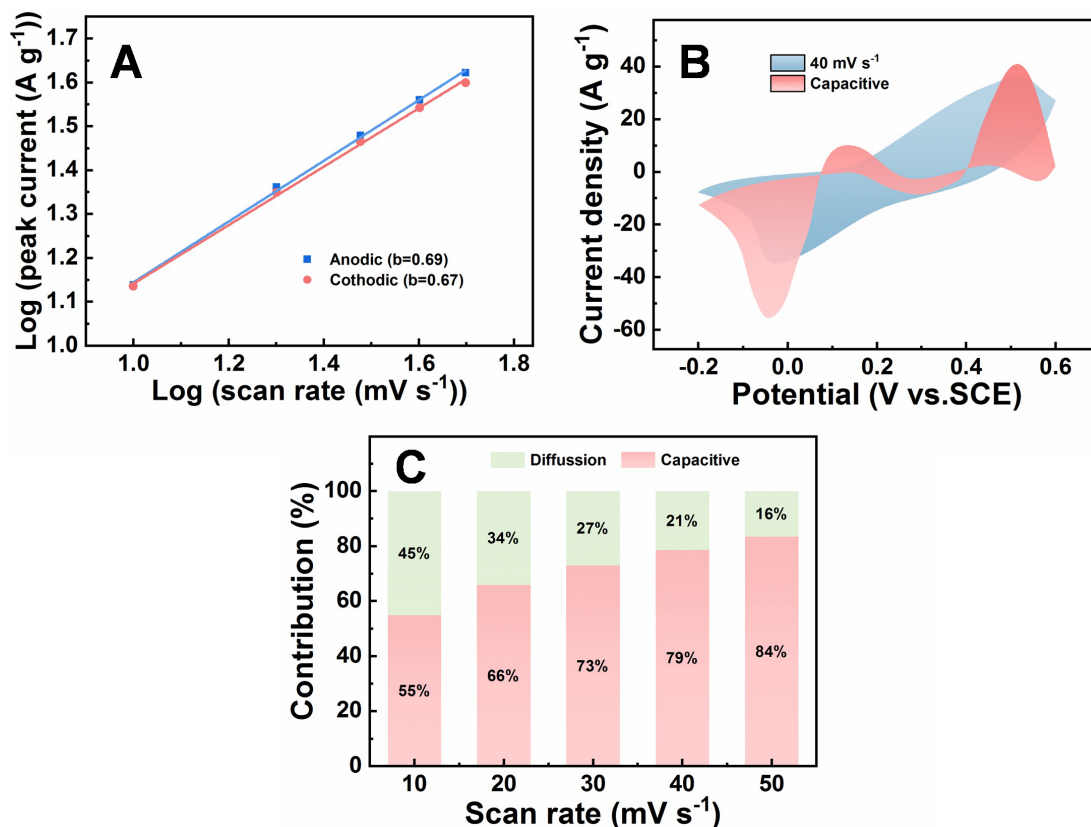


Figure 5. (A) The plots of log i versus log v for the redox peaks of CVs; (B) CVs of the NiCo LDH electrode with the separation between the total current and the capacitive current at a scan rate of 40 mV·s⁻¹; (C) Contribution ratios of the capacitive current to diffusion-controlled current as a function of scan rate

图 5. (A) 峰电流与扫速之间的对数关系图, (B) NiCo LDH 电极材料在扫速为 40 mV·s⁻¹ 时电容贡献, (C) 不同扫速下电容贡献与扩散贡献占比

3.3. 非对称超级电容器 NiCo LDH//AC ASC 的电化学性能

NiCo LDH 电极具有优异的电化学性能, 优于其他合成的电极材料。因此, 选择它作为正极在 ASC 器件的组装中, 目的是探索其潜在的应用。为了构建 ASC, 将 NiCo LDH 作为正极, AC 作为负极。首先, 进行了正负极质量的匹配, 图 6A 是 10 mV·s⁻¹ 时的正负极 CV 曲线, 通过计算, 正负极质量比为 0.94:1。通过 CV 和 GCD 探索了 ASC 的工作电压, 如图 6B 所示, 从 1.0 V 到 1.5 V, CV 曲线没有明显上翘, 可以看出 1.5 V 是 ASC 最大工作电压。同时, 图 6C 中不同电位窗下的 GCD 曲线也说明了这一点。

不同扫速下的 CV 曲线(图 6D)和不同电流密度下的 GCD 曲线(图 6E)用于分析 ASC 的倍率性能。CV 扫速从 10 mV·s⁻¹ 到 100 mV·s⁻¹, 曲线变化较小, 仅出现较小幅度的形变; 同时, 不同电流密度下的 GCD 曲线形状基本一致, 显示了加速的充放电响应和理想的电容行为。通过进一步的计算, 从 1 A·g⁻¹ 到 10 A·g⁻¹, 倍率性能保持在 50.8% (从 69.5 F·g⁻¹ 衰减到 35.3 F·g⁻¹), 结果表明所构建的 NiCo LDH//AC ASC 具有不错的倍率性能。

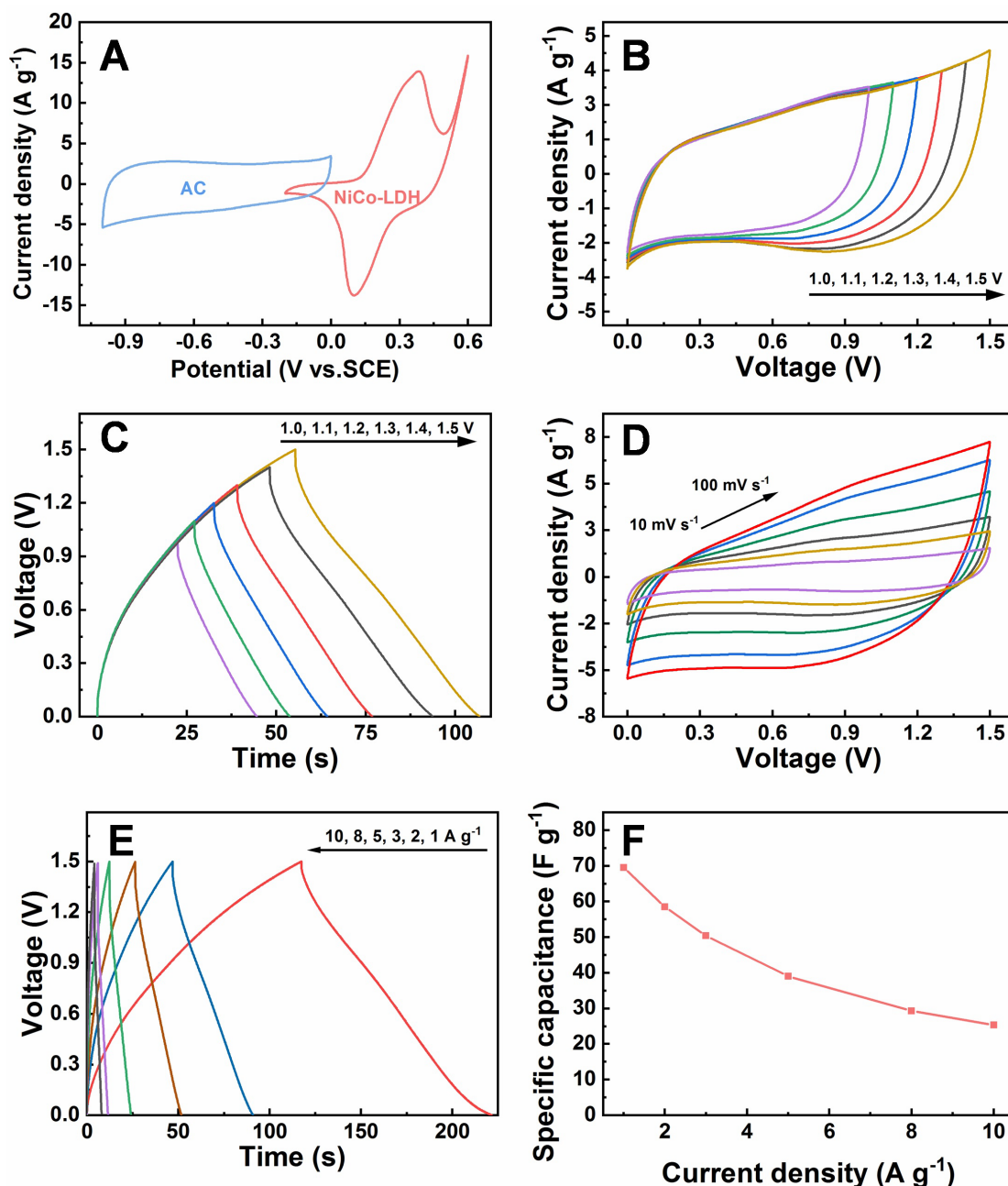


Figure 6. Electrochemical performance of NiCo LDH//AC ASC, (A) Positive and negative CV window matching, CV curves (B) and GCD curves (C) at different voltages, (D) CV curves at different sweep speeds, (E) GCD curves at different current densities, (F) Specific capacitance calculated based on GCD results

图 6. NiCo LDH//AC ASC 电化学性能, (A) 正负极 CV 窗口匹配, 不同电压下的 CV 曲线(B)和 GCD 曲线(C), (D) 不同扫速下的 CV 曲线, (E) 不同电流密度下的 GCD 曲线, (F) 基于 GCD 结果计算的比电容

循环稳定性能的评估对于超级电容器应用价值至关重要, 图 7A 描述了非对称超级电容器(ASC)装置在电流密度为 $10 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 下的充放电循环 2000 次的电容保持率。从图中可以看出, 前 500 圈电容出现小幅度的衰减, 后面基本保持不变, 电容保持率为 80.4%, 表现出较好的稳定性能。同时, 循环 2000 圈过程中, 库伦效率始终保持在 91.8% 左右, 进一步说明了该 ASC 的稳定性能。对循环 2000 次前后的阻抗结果进行分析, R_{ct} 值从 0.27Ω 增大至 0.36Ω , 这可能是电容衰减的原因。

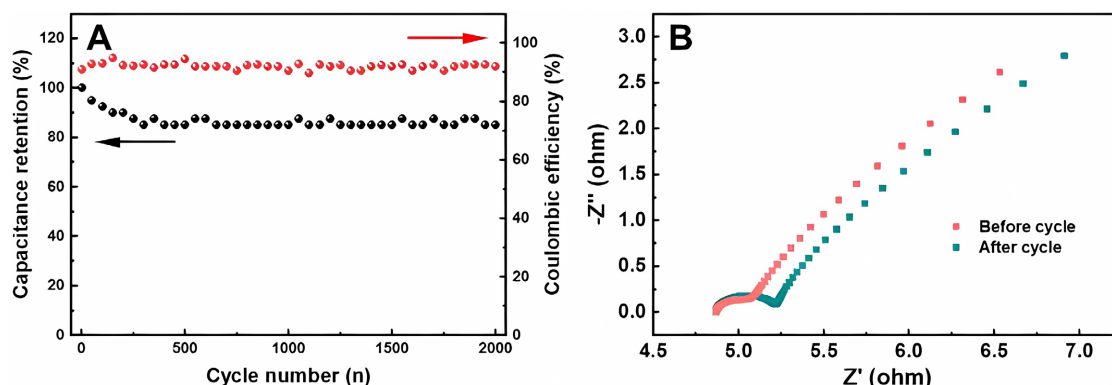


Figure 7. (A) Capacitance retention of NiCo LDH//AC ASC at $10 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ current density for 2000 cycles, and (B) impedance spectra before and after 2000 cycles

图 7. (A) NiCo LDH//AC ASC 在 $10 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 电流密度下循环 2000 次的电容保持率, (B) 循环 2000 次前后的阻抗谱图

基于以上的研究结果, 对 NiCo LDH//AC ASC 的实际应用价值进行了探究。能量密度与功率密度是评价其性能的重要参数, 如图 8A 所示, 本工作构建的 NiCo LDH//AC ASC 能量密度可达 $21.7 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$, 此时功率密度为 $749.7 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$; 最大功能功率密度达到 $7600 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, 此时能量密度依然保持在 $8.7 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这些参数相较于已报道的同类型 ASC 具有一定的优越性[14]-[16]。

进一步地, 构建了实际应用场景, 将两个 ASCs 串联用于驱动小车模型, 在走廊地板上进行了实验。如图 8B 所示, 闭合开关后小车迅速发动, 可以看出有足够的动力驱动小车前行, 直到小车停止, 测量其运动轨迹长达 4.2 m , 表明了 NiCo LDH//AC ASC 在汽车动力领域的实际应用潜力。器件具有较高能量密度、卓越的稳定性和优异的导电性, 证明了其卓越的电化学储能能力, 具有这些特性, 这种新开发的非对称超级电容器(ASC)器件在不久的将来有望得到广泛应用。

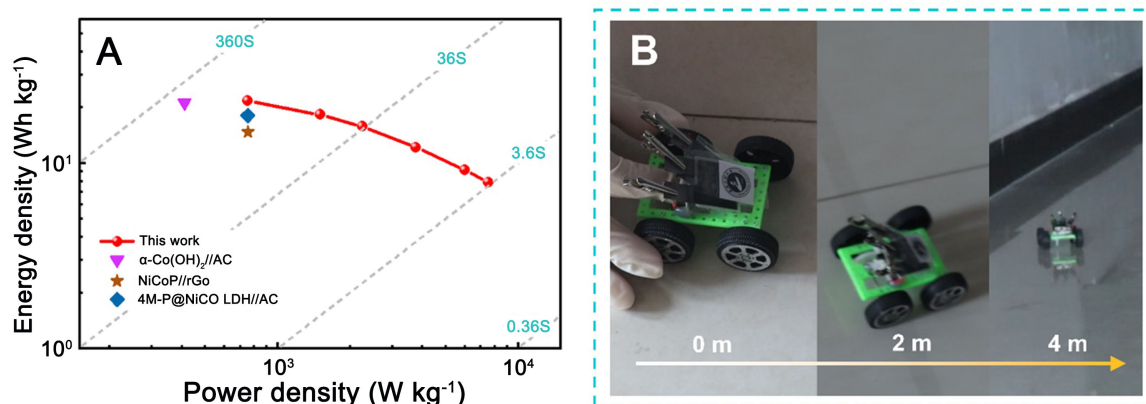


Figure 8. (A) Ragone diagram of energy density and power density of NiCo-LDH//AC ASC, (B) Two ASCs in series are used to drive the car model

图 8. (A) NiCo-LDH//AC ASC 能量密度与功率密度 Ragone 图, (B) 两个 ASC 串联用于驱动小车模型

4. 结果与讨论

本文采用一步电沉积法在石墨纸上沉积了球形 NiCo LDH, 为了评估材料在储能领域的潜力, 对其形貌、结构和电化学性能进行了分析。结果表明, 球形 NiCo LDH 表面呈现三维交联的片层结构, 这种优越的结构促使材料表现出高的比容量, 增强的速率能力, 良好的导电性和循环稳定性, 在 $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 电流密度下的比电容为 $735 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$; $10 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 时充放电循环 3000 次, 电容保持率为 80.4%。此外, 组装的 NiCo

LDH//AC 非对称超级电容器(ASC)的最大能量密度为 $21.7 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ (此时功率密度 $749.7 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$)，工作电压 1.5 V ，循环稳定性好，2000 次循环后电容保持率为 80.1%。最后，两个组装的 ASC 串联成功驱动小车模型前行 4.2 米，凸显了实际应用潜力。

基金项目

湖北省的自然科学基金会(No.2021CFB192)。

参考文献

- [1] Chen, F., Li, J., Shao, Y., Zhu, Z., Shen, T., Chen, K., *et al.* (2025) ZIF-67 Wraps Ni-Mn LDHS Nanosheets to Enhance the Capacitive Contribution of Supercapacitors. *Chemical Engineering Journal*, **507**, Article 160454. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.160454>
- [2] Huang, X., Huang, Y., Zhao, J., Xu, G. and Wang, X. (2023) Facile Design and Synthesis of Nickel Foam@mxene@nico Layered Hydroxides Core-Sheath Nanostructure for High Mass-Loading of Supercapacitors. *Electrochimica Acta*, **461**, Article 142657. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2023.142657>
- [3] Wu, Q., Li, F., Sheng, H., Qi, Y., Yuan, J., Bi, H., *et al.* (2024) In Situ Fabrication of Hierarchical CuO@con-LDH Composite Structures for High-Performance Supercapacitors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **16**, 23241-23253. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c01533>
- [4] He, Y., Li, L., He, X., Liu, C., Aminabhavi, T.M., Vasseghian, Y., *et al.* (2024) Heterostructured Nanocoral-Like Co(OH)F@NiCo-LDH/Co9S8 Nanocomposites as Electrodes for Supercapacitors. *ACS Applied Nano Materials*, **7**, 12701-12710. <https://doi.org/10.1021/acsanm.4c01226>
- [5] Li, X., Ren, J., Sridhar, D., Xu, B.B., Algadi, H., El-Bahy, Z.M., *et al.* (2023) Progress of Layered Double Hydroxide-Based Materials for Supercapacitors. *Materials Chemistry Frontiers*, **7**, 1520-1561. <https://doi.org/10.1039/d2qm01346k>
- [6] Zhao, N., Fu, P., Cui, X., Luo, M. and Huang, J. (2025) Electrodeposition of Nickel Cobalt Layered Double Hydroxides on Conductive Nickel-Coated Carbon Cloth: A Strategy for Boosting Flexible Supercapacitor Electrode Performance. *Journal of Energy Storage*, **110**, Article 115355. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115355>
- [7] Jiang, S., Ding, J., Wang, R., Deng, Y., Chen, F., Zhou, M., *et al.* (2022) High Performance Nico-LDH//Fe₂O₃ Asymmetric Supercapacitors Based on Binder-Free Electrodes with Dual Conductive Networks. *Chemical Engineering Journal*, **431**, Article 133936. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133936>
- [8] Jung, M.Y., Lee, C., Park, J., Son, J., Yun, Y.J. and Jun, Y. (2024) Transparent Supercapacitors with Networked Mxene on Nico-Layered Double Hydroxide. *Chemical Engineering Journal*, **490**, Article 151556. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151556>
- [9] Wang, Y., Zheng, F., Pan, Q., Deng, D., Liu, L. and Chen, B. (2021) A Three-Dimensional Nico-LDH Array Modified Halloysite Nanotube Composite for High-Performance Battery-Type Supercapacitor. *Journal of Alloys and Compounds*, **884**, Article 161162. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161162>
- [10] Liu, L., Guan, T., Fang, L., Wu, F., Lu, Y., Luo, H., *et al.* (2018) Self-Supported 3D Nico-LDH/Gr Composite Nanosheets Array Electrode for High-Performance Supercapacitor. *Journal of Alloys and Compounds*, **763**, 926-934. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.358>
- [11] Luo, L., Zhou, Y., Yan, W., Luo, L., Deng, J., Du, G., *et al.* (2021) Design and Construction of Hierarchical Sea Urchin-Like Nico-LDH@ACF Composites for High-Performance Supercapacitors. *Industrial Crops and Products*, **171**, Article 113900. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113900>
- [12] Han, X., Li, J., Lu, J., Luo, S., Wan, J., Li, B., *et al.* (2021) High Mass-Loading Nico-LDH Nanosheet Arrays Grown on Carbon Cloth by Electrodeposition for Excellent Electrochemical Energy Storage. *Nano Energy*, **86**, Article 106079. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106079>
- [13] Jiang, D., Zheng, M., You, Y., Li, F., Yuan, H., Zhang, W., *et al.* (2021) B-Ni(OH)₂/Nickel-Cobalt Layered Double Hydroxides Coupled with Fluorine-Modified Graphene as High-Capacitance Supercapacitor Electrodes with Improved Cycle Life. *Journal of Alloys and Compounds*, **875**, Article 159929. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159929>
- [14] Cheng, J.P., Liu, L., Ma, K.Y., Wang, X., Li, Q.Q., Wu, J.S., *et al.* (2017) Hybrid Nanomaterial of A-Co(OH)₂ Nanosheets and Few-Layer Graphene as an Enhanced Electrode Material for Supercapacitors. *Journal of Colloid and Interface Science*, **486**, 344-350. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.09.064>
- [15] Liu, Q., Hu, R., Qi, J., Sui, Y., He, Y., Meng, Q., *et al.* (2019) Facile Synthesis of NiCoP Nanosheets on Carbon Cloth and Their Application as Positive Electrode Material in Asymmetric Supercapacitor. *Ionics*, **26**, 355-366.

<https://doi.org/10.1007/s11581-019-03174-3>

- [16] Wang, G., Jin, Z. and Zhang, W. (2019) A Phosphatized Nico LDH 1D Dendritic Electrode for High Energy Asymmetric Supercapacitors. *Dalton Transactions*, **48**, 14853-14863. <https://doi.org/10.1039/c9dt02955a>