

钼掺杂镍钴氢氧化物电极材料的制备及其电化学性能研究

张永琰, 王 静, 任 啸, 张廷月

安徽理工大学材料科学与工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年8月1日; 录用日期: 2026年8月27日; 发布日期: 2026年9月8日

摘 要

以六水合硝酸镍、六水合硝酸钴和二水合钼酸钠为金属源, 尿素为沉淀剂, 采用一步水热法制备不同钼酸钠添加量的NiCoMo-LDH电极材料。通过X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、能谱(EDS) Mapping和X射线光电子能谱(XPS)对样品的物相组成、微观形貌、元素分布及表面价态进行表征, 并采用循环伏安(CV)、恒流充放电(GCD)、交流阻抗(EIS)和循环稳定性测试评价其电化学性能。结果表明, 适量钼酸钠能够调控NiCo-LDH的晶体生长和层级形貌, 使材料形成疏松多孔的纳米针交织结构。当钼酸钠添加量为0.3 mmol时, 所制备的NiCoMo-0.3样品表现出最佳电化学性能, 在1 A/g电流密度、0~0.5 V电位窗口下比电容达到1512 F/g; 在5 A/g电流密度下经过3000次充放电循环后, 电容保持率为73.4%。

关键词

镍钴钼氢氧化物, 钼掺杂, 水热法, 电极材料, 电化学性能

Preparation of Mo-Doped NiCo-LDH Electrode Materials and Investigation of Their Electrochemical Properties

Yongyan Zhang, Jing Wang, Xiao Ren, Tingyue Zhang

School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: August 1, 2026; accepted: August 27, 2026; published: September 8, 2026

Abstract

Using nickel nitrate hexahydrate, cobalt nitrate hexahydrate and sodium molybdate dihydrate as

文章引用: 张永琰, 王静, 任啸, 张廷月. 钼掺杂镍钴氢氧化物电极材料的制备及其电化学性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(9): 1-10. DOI: 10.12677/ms.2026.169177

metal sources, and urea as a precipitant, NiCoMo-LDH electrode materials with different sodium molybdate amounts were prepared via a one-step hydrothermal method. The phase composition, microstructure, elemental distribution and surface valence states of the samples were characterized by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive spectroscopy (EDS) mapping and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). Their electrochemical performance was evaluated by cyclic voltammetry (CV), galvanostatic charge-discharge (GCD), electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and cycling stability tests. The results show that an appropriate amount of sodium molybdate can regulate the crystal growth and hierarchical morphology of NiCo-LDH, leading to a loose porous nanoneedle-interwoven structure. When the sodium molybdate content is 0.3 mmol, the obtained NiCoMo-0.3 sample exhibits the best electrochemical performance, achieving a specific capacitance of 1512 F/g at 1 A/g within a potential window of 0~0.5 V. After 3000 charge-discharge cycles at 5 A/g, the capacitance retention is 73.4%.

Keywords

Nickel-Cobalt-Molybdenum Hydroxide, Mo Doping, Hydrothermal Method, Electrode Material, Electrochemical Performance

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

随着便携式电子设备、新能源汽车和智能电网等领域的快速发展,兼具高功率密度、快速充放电能力和长循环寿命的电化学储能器件受到广泛关注[1]-[3]。超级电容器作为一种重要的电化学储能装置,具有充放电速度快、功率密度高和循环寿命长等优势,其性能主要受电极材料的组成、结构以及电极/电解液界面传输行为影响[4][5]。因此,构筑具有丰富活性位点、开放孔道结构和良好电荷传输能力的电极材料,是提升超级电容器储能性能的重要途径。

层状双氢氧化物(layered double hydroxides, LDHs)具有金属组成可调、层板结构可控和理论比电容较高等特点,在赝电容电极材料领域受到关注[6][7]。其中, NiCo-LDH 兼具 Ni 和 Co 多价态氧化还原反应活性,能够在碱性电解液中提供较高的法拉第赝电容。然而,传统 NiCo-LDH 仍存在电子导电性不足、层片易团聚以及高倍率下活性物质利用率下降等问题,限制了其实际应用[8][9]。

元素掺杂和形貌调控是改善 LDH 材料电化学性能的有效手段。适量高价态 Mo 元素的引入可能调节 Ni/Co 活性中心的电子环境,并诱导晶格畸变或缺陷位点形成,从而改善电荷转移动力学和氧化还原反应活性[10]-[13]。同时,钼酸根参与水热反应过程可能影响晶体成核与生长,使产物形成更加疏松的层级结构,有利于电解液离子扩散和活性位点暴露[14][15]。

本文以六水合硝酸镍、六水合硝酸钴、二水合钼酸钠和尿素为原料,采用一步水热法制备不同钼酸钠添加量的 NiCoMo-LDH 电极材料,探究钼酸钠添加量对材料结构、形貌和电化学性能的影响,并探讨适量 Mo 调控提升 NiCo-LDH 赝电容性能的作用机制。

2. 实验

2.1. 试剂与仪器

六水合硝酸镍[Ni(NO₃)₂·6H₂O]、六水合硝酸钴[Co(NO₃)₂·6H₂O]、二水合钼酸钠(Na₂MoO₄·2H₂O)、

尿素[CO(NH₂)₂]、氢氧化钾(KOH)、乙炔黑、聚偏二氟乙烯(PVDF)、N-甲基-2-吡咯烷酮(NMP)等试剂均为分析纯,实验用水为去离子水。

2.2. 材料合成

采用一步水热法制备不同钼酸钠添加量的 NiCoMo-LDH 样品。首先称取 2.25 mmol 六水合硝酸镍、0.75 mmol 六水合硝酸钴和 25 mmol 尿素,加入 50 mL 去离子水中,磁力搅拌至完全溶解。随后分别加入 0、0.1、0.3 和 0.5 mmol 二水合钼酸钠,继续搅拌并超声处理,使前驱体溶液充分混合后将所得溶液转移至聚四氟乙烯内衬的不锈钢反应釜中,于 120℃下水热反应 12 h。反应结束后自然冷却至室温,将产物进行抽滤,并用去离子水和乙醇反复洗涤至中性,随后在 60℃真空条件下干燥 12 h,研磨后得到不同钼酸钠添加量的 NiCoMo-LDH 粉末。

为便于表述,将钼酸钠添加量为 0、0.1、0.3 和 0.5 mmol 的样品分别记为 NiCo-LDH、NiCoMo-0.1、NiCoMo-0.3 和 NiCoMo-0.5。

2.3. 材料表征

采用 Rigaku SmartLab SE X 射线衍射仪(XRD)分析样品的晶体结构和物相组成;采用 ZEISS Sigma 360 扫描电子显微镜(SEM)观察样品的微观形貌;采用 EDS Mapping 分析样品的元素分布;采用 Thermo Scientific K-Alpha X 射线光电子能谱(XPS)分析样品的表面元素组成及价态。

2.4. 电化学性能测试

2.4.1. 电极制备

将制备得到的活性材料、乙炔黑和 PVDF 按质量比 8:1:1 混合研磨,滴加适量 NMP 调制成均匀浆料。将浆料均匀涂覆于预处理后的泡沫镍片(10 mm × 10 mm)上,并在 60℃真空干燥 12 h,待冷却后称量压片,控制活性物质负载量为 2~3 mg。

2.4.2. 电化学测试

采用 CHI660E 型电化学分析仪,在三电极体系中进行电化学测试,以制备的材料电极为工作电极,铂片为对电极,Hg/HgO 电极为参比电极,3 mol/L KOH 溶液为电解液。循环伏安(CV)测试电压范围为 0~0.6 V,扫描速率为 5、10、20、30、50 mV/s;恒流充放电(GCD)测试电压范围为 0~0.5 V,电流密度为 1、2、3、4 和 5 A/g;电化学阻抗(EIS)测试频率范围为 0.01 Hz~100 kHz,交流扰动电压为 5 mV。

3. 结果与讨论

3.1. XRD 分析

图 1 为不同钼酸钠添加量 NiCoMo-LDH 样品的 XRD 谱图。由图可见,NiCo-LDH、NiCoMo-0.1、NiCoMo-0.3 和 NiCoMo-0.5 样品均出现了 LDH 类材料的特征衍射峰,并与标准卡片基本吻合,说明水热反应后成功形成了 NiCo-LDH 主体结构。其中,11.5°和 23°处的衍射峰分别对应 LDH 的(003)和(006)晶面,表明样品具有典型的层状堆叠结构;34.5°、39.7°和 47.3°处的衍射峰可分别归属于(012)、(015)和(018)晶面;60°和 62.5°处的衍射峰对应(110)和(113)晶面,反映了层板内金属阳离子的有序排列。

NiCoMo-0.3 样品的衍射峰相对较宽,说明其晶粒尺寸较小或结晶度适中,这有利于暴露更多边缘活性位点。XRD 谱图中未观察到明显 MoO₃、NiMoO₄ 等强杂相峰,说明 Mo 元素可能以低含量掺杂、高度分散或无定形形式存在于 LDH 结构中。NiCoMo-0.5 样品部分峰强度增强,可能与过量钼酸钠导致晶体生长加剧或局部结构粗化有关。

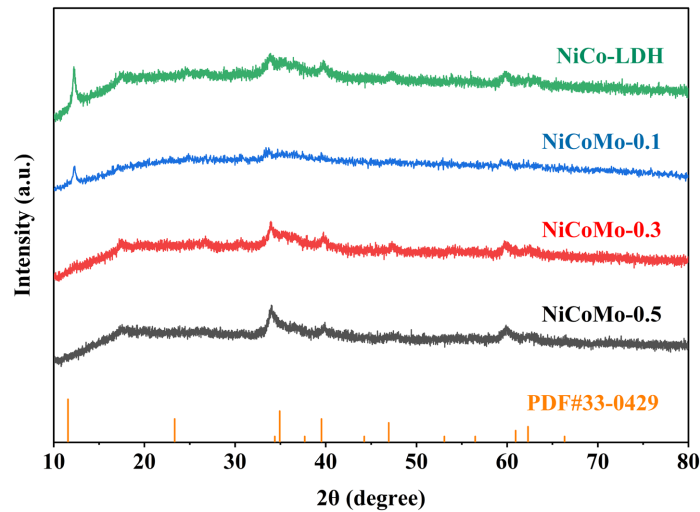


Figure 1. XRD patterns of NiCoMo-LDH samples with different sodium molybdate amounts
图 1. 不同钼酸钠添加量 NiCoMo-LDH 样品的 XRD 谱图

3.2. SEM 形貌与 EDS 元素分析

图 2 为不同钼酸钠添加量 NiCoMo-LDH 样品的 SEM 图像。由图 2(a)可见，未加入钼酸钠的 NiCo-LDH 样品能够形成由纳米针组装而成的花状聚集体，但表面结构相对致密，局部堆叠较明显，不利于电解液充分渗透。加入 0.1 mmol 钼酸钠后，由图 2(b)可见，NiCoMo-0.1 样品仍保持花状结构，表面纳米单元分散程度提高，结构较 NiCo-LDH 更加疏松，有利于暴露更多活性位点。

当钼酸钠添加量为 0.3 mmol 时，由图 2(c)可见 NiCoMo-0.3 样品形成更为开放的层级多孔结构，纳米针相互交错，构建出丰富的离子传输通道。这种疏松多孔结构能够增大电极材料与电解液的接触面积，缩短 OH⁻扩散路径，并提高 Ni、Co、Mo 活性中心的利用率，有利于提升材料的赝电容性能。当钼酸钠进一步增加至 0.5 mmol 时，由图 2(d)可见 NiCoMo-0.5 样品局部纳米结构出现粗化和团聚，其中部分片层变厚，可能导致有效活性面积下降和离子扩散阻力增大。

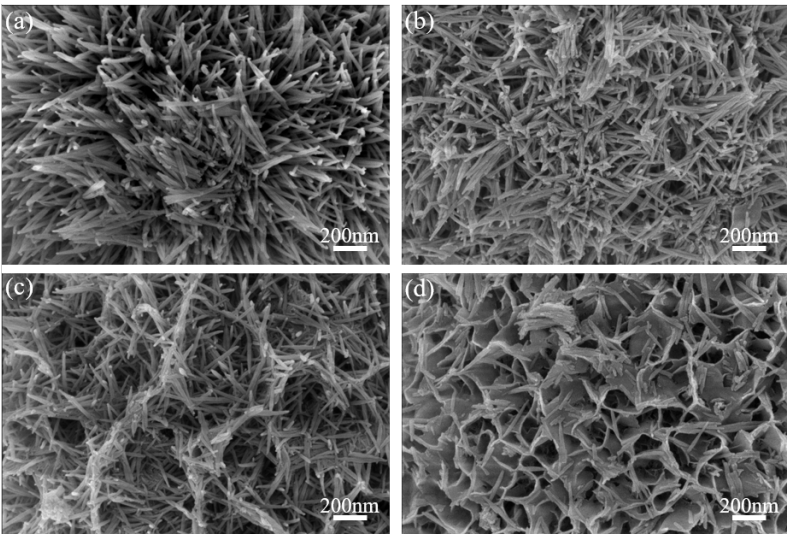


Figure 2. SEM images of NiCoMo-LDH samples with different amounts of sodium molybdate
图 2. 不同钼酸钠添加量 NiCoMo-LDH 样品的 SEM 图

为进一步证明 Mo 元素的引入及各元素分布是否均匀，对所制备的 NiCoMo-0.3 样品进行 EDS Mapping 分析，结果见图 3 和表 1。Ni、Co、O 和 Mo 元素在选定区域内均有分布，其中 Ni、Co 和 O 信号较强，Mo 信号相对较弱但可被检测到，表明少量 Mo 已成功引入材料中。元素分布未出现明显局部富集，说明 Mo 元素在 NiCo-LDH 基体中分散较均匀。

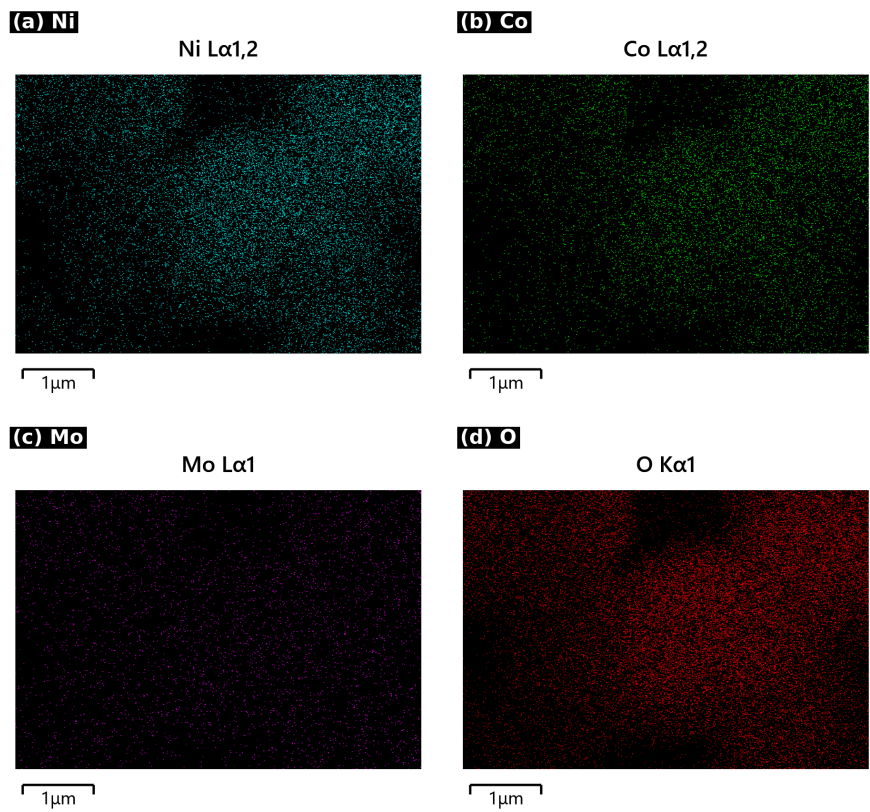


Figure 3. EDS elemental mapping images of NiCoMo-0.3 sample
图 3. NiCoMo-0.3 样品的 EDS 元素映射图

由表 1 可知，NiCoMo-0.3 样品中 O、Co、Ni 和 Mo 的原子百分比分别为 61.43%、10.35%、27.06% 和 1.17%。其中，Mo 原子百分含量较低，与实际所添加的钼酸钠含量相符；Ni/Co 原子比约为 2.61，接近实验投料中的 Ni/Co 比例。EDS 结果进一步说明 Mo 元素成功引入 NiCo-LDH 材料，同时没有形成高含量 Mo 富集相。

Table 1. Elemental contents of NiCoMo-0.3 sample obtained from EDS mapping
表 1. NiCoMo-0.3 样品的 EDS 元素含量

Element	Line Type	Weight/%	Weight % Sigma	Atomic/%
O	K series	29.84	0.31	61.43
Co	K series	18.51	0.36	10.35
Ni	K series	48.24	0.43	27.06
Mo	L series	3.41	0.25	1.17
Total		100.00		100.00

3.3. XPS 分析

为进一步分析最佳样品 NiCoMo-0.3 的表面元素组成和化学价态, 对其进行 XPS 测试, 结果见图 4。全谱图中可观察到 Ni、Co、Mo、O 和 C 等元素信号, 进一步证明 Mo 已成功引入到 NiCo-LDH 材料中[图 4(a)]。Ni 2p 高分辨谱可分为 Ni 2p_{3/2}、Ni 2p_{1/2} 及其卫星峰, 同时存在 Ni²⁺和 Ni³⁺相关峰。Ni 2p 谱显示 Ni 2p_{3/2} 主峰位于约 856.0 eV, 并伴随明显的卫星峰, 说明样品中 Ni 元素具有多价态氧化还原活性[图 4(b)]。

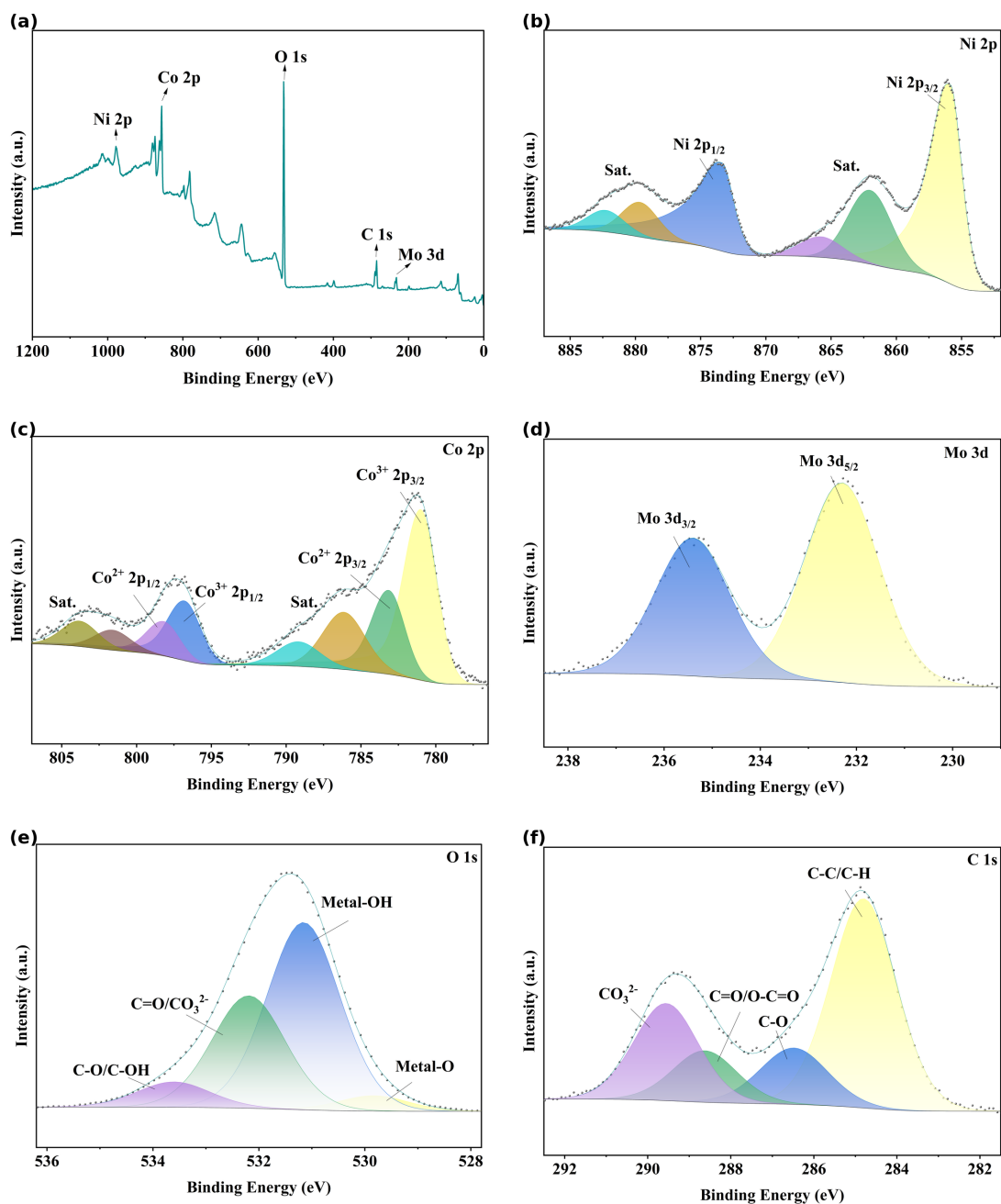


Figure 4. XPS spectra of NiCoMo-0.3: (a) survey; (b) Ni 2p; (c) Co 2p; (d) Mo 3d; (e) O 1s; (f) C 1s

图 4. NiCoMo-0.3 样品的 XPS 谱图: (a) 全谱; (b) Ni 2p; (c) Co 2p; (d) Mo 3d; (e) O 1s; (f) C 1s

Co 2p 谱图中可观察到 Co 2p_{3/2}、Co 2p_{1/2} 及相应卫星峰, Co 2p_{3/2} 分别对应约 782.0 eV 和 780.2 eV, 表明 Co²⁺/Co³⁺ 共存(图 4(c))。Mo 3d 谱图中出现 Mo 3d_{5/2} 和 Mo 3d_{3/2} 特征峰, 分别位于约 232.5 eV 和 235.7 eV 处, 对应 Mo⁶⁺ 价态, 表明钼元素以钼酸根形式成功掺入 LDH 晶格或层间(图 4(d))。Ni、Co 和 Mo 多价态共存有利于在碱性电解液中发生可逆氧化还原反应, 增强赝电容贡献。高分辨 O 1s 谱经过分峰拟合后可分解为 Metal-O、Metal-OH、C=O/CO₃²⁻ 和 C-O/C-OH 等特征峰。其中 Metal-OH 和非晶格氧占比显著, 表明材料表面存在丰富的羟基和氧空位/吸附氧, 这有利于提供更多赝电容活性位点并促进电解液离子扩散。C 1s 信号主要来源于表面吸附碳或碳酸盐物种(图 4(f))。

3.4. 电化学性能分析

图 5 为不同样品的电化学性能测试结果。质量比电容按式(1)计算:

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

式中, C 为质量比电容, F/g; I 为放电电流, A; Δt 为放电时间, s; m 为电极活性物质质量, g; ΔV 为放电电位窗口, V。

图 5(a) 为各样品在相同扫描速率下的 CV 曲线。各电极材料均呈现明显氧化还原峰, 说明其电容行为主要来源于 Ni/Co 基活性物质的法拉第赝电容反应, 而非单纯双电层电容。与 NiCo-LDH 相比, 含 Mo 样品的 CV 曲线积分面积明显增大, 表明 Mo 调控能够提高电极材料的电荷存储能力。其中, NiCoMo-0.3 样品的 CV 曲线包围面积最大, 氧化还原峰电流最高, 说明其具有更高的电化学反应活性和更充分的活性位点利用率。

图 5(b) 为各样品在 1 A/g 下的 GCD 曲线。各曲线均存在明显充放电平台, 进一步说明材料具有赝电容行为。NiCoMo-0.3 样品的放电时间最长, 在 0~0.5 V 的电位窗口下质量比电容达到 1512 F/g, 明显高于其他样品。这一结果与 CV 曲线积分面积变化一致, 表明适量 Mo 引入能够有效提升 NiCo-LDH 的容量性能。

图 5(c) 为不同样品的交流阻抗谱图。样品的 EIS 图由高频区半圆与低频区倾斜直线组成。与未掺杂 NiCo-LDH 相比, Mo 调控样品在高频区的半圆半径整体减小, 说明电荷转移过程得到改善; 低频区曲线趋于直线, 表明电极过程具有离子扩散控制特征。对曲线进行拟合, 高频区半圆直径对应电荷转移电阻(R_{ct})。NiCo-LDH、NiCoMo-0.1、NiCoMo-0.3 和 NiCoMo-0.5 的 R_{ct} 分别为 0.593、0.327、0.310 和 0.391 Ω 。其中, NiCoMo-0.3 样品的 R_{ct} 最小, 说明电极/电解液界面电荷转移更快, 电化学反应动力学更优。

图 5(d) 为 NiCoMo-0.3 与 NiCo-LDH 在 5 A/g 电流密度下的循环稳定性。经过 3000 次循环后, NiCoMo-0.3 仍保持 73.4% 的初始电容, 高于 NiCo-LDH 的 70.2%。两条曲线均表现为随循环次数增加而总体缓慢下降, 同时伴有一定程度的局部起伏。在约 1500 次循环时, NiCoMo-0.3 和 NiCo-LDH 的电容保持率分别约为 82.3% 和 80.6%; 循环 3000 次后, 二者分别保持 73.4% 和 70.2% 的初始电容。循环曲线中的局部波动可能来源于多种因素的共同作用: 一方面, 反复充放电能够促进电解液对电极内部孔道的进一步浸润, 并使部分原先未充分参与反应的活性位点逐渐活化, 从而造成局部电容短暂回升; 另一方面, 长期循环过程中活性材料发生的体积变化、局部结构重排、活性位点暂时堵塞或重新暴露, 也会使测得的放电时间产生小幅变化。该结果表明, 适量 Mo 调控不仅提高了材料的比电容, 也在一定程度上改善了循环稳定性。

由表 2 可知, NiCoMo-0.3 样品在 1、2、3、4 和 5 A/g 电流密度下的质量比电容分别为 1512、1480、1462、1433 和 1404 F/g, 均高于其他样品。随着电流密度由 1 A/g 增大至 5 A/g, 其比电容保持率为 92.8%,

低于 NiCo-LDH、NiCoMo-0.1 和 NiCoMo-0.5 样品的 96.5%、94.9%和 96.3%，说明 NiCoMo-0.3 样品在相对倍率保持率这一单项指标上并非最佳。出现该现象可能是由于 NiCoMo-0.3 样品在低电流密度下能够充分利用更多位于孔道内部或受离子扩散控制的活性位点，从而获得较高的初始比电容；当电流密度增大时，电解液离子的扩散时间缩短，部分深层活性位点不能被充分利用，使其相对于初始值的下降幅度略大。尽管 NiCoMo-0.3 样品的倍率保持率不是最高，但其在 5 A/g 下仍可提供 1404 F/g 的质量比电容，因此，较高的倍率保持率并不必然代表更高的实际储能能力。结合图 5(c)和表 3 可知，NiCoMo-0.3 样品的电荷转移电阻最低，仅为 0.310 Ω ，说明其界面电子传输动力学相对最好。

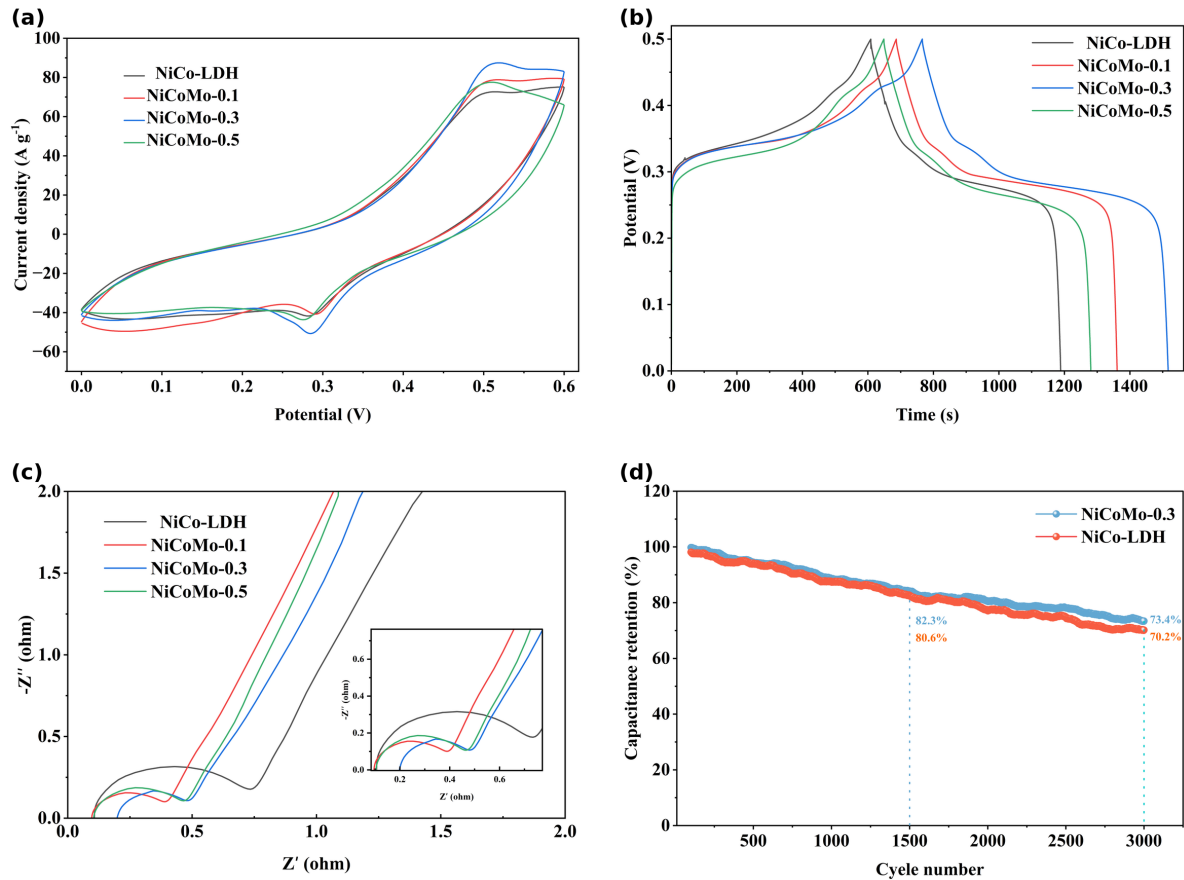


Figure 5. Electrochemical properties of different samples: (a) CV curves; (b) GCD curves; (c) EIS curves; (d) cycling stability
图 5. 不同样品的电化学性能: (a) CV 曲线; (b) GCD 曲线; (c) EIS 曲线; (d) 循环稳定性

Table 2. Specific capacitance and rate capability of different samples

表 2. 不同样品在不同电流密度下的比电容及倍率保持率

样品	比电容/(F/g)					5 A/g 保持率/%
	1 A/g	2 A/g	3 A/g	4 A/g	5 A/g	
NiCo-LDH	1172	1162	1158	1153	1130	96.5
NiCoMo-0.1	1359	1333	1321	1303	1289	94.9
NiCoMo-0.3	1512	1480	1462	1433	1404	92.8
NiCoMo-0.5	1271	1263	1246	1236	1224	96.3

Table 3. Charge transfer resistance of different samples
表 3. 不同样品的电荷转移电阻

样品	R _{ct} /Ω
NiCo-LDH	0.593
NiCoMo-0.1	0.327
NiCoMo-0.3	0.310
NiCoMo-0.5	0.391

4. 结论

本文采用一步水热法制备了不同钼酸钠添加量的 NiCoMo-LDH 电极材料, 并研究不同 Mo 添加量对材料结构、形貌以及电化学性能的影响。XRD 结果表明, 各样品均成功形成 LDH 结构, 未观察到明显钼氧化物的强杂相峰; SEM 结果表明, 适量钼酸钠能够调控材料形成疏松多孔的层级纳米针结构, 而过量钼酸钠会导致局部结构粗化和团聚。EDS Mapping 和 XPS 结果进一步证明 Mo 元素成功引入 NiCo-LDH 材料, 且 Ni、Co、Mo 多价态共存有利于提供更多可逆氧化还原反应活性。

电化学测试结果表明, NiCoMo-0.3 样品在 1 A/g 下的比电容达到 1512 F/g, 在 5 A/g 下仍保持 1404 F/g, 均为各样品中的最高值。虽然在 5 A/g 下倍率保持率为 92.8%, 低于其他样品, 但其高电流密度下的绝对比电容仍具有明显优势; 循环 3000 次后的电容保持率为 73.4%, 对应的剩余比电容也高于未掺杂 NiCo-LDH 样品。结合其较大的 CV 曲线面积、最长的放电时间、最低的电荷转移电阻以及较高的循环后绝对电容, 可以认定 0.3 mmol 的钼酸钠是最优添加量。

参考文献

- [1] 宋晓玉, 丁晓波, 朱俊生. 超级电容器金属化合物电极材料研究进展[J]. 蓄电池, 2021, 58(6): 293-298.
- [2] Meng, Q.F., Cai, K.F., Chen, Y.X., *et al.* (2017) Research Progress on Conducting Polymer Based Supercapacitor Electrode Materials. *Nano Energy*, **36**, 268-285. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.04.040>
- [3] Xia, Q., Yang, H., Wang, M., Yang, M., Guo, Q., Wan, L., *et al.* (2017) High Energy and High Power Lithium-ion Capacitors Based on Boron and Nitrogen Dual-Doped 3D Carbon Nanofibers as Both Cathode and Anode. *Advanced Energy Materials*, **7**, Article ID: 1701336. <https://doi.org/10.1002/aenm.201701336>
- [4] Simon, P. and Gogotsi, Y. (2008) Materials for Electrochemical Capacitors. *Nature Materials*, **7**, 845-854. <https://doi.org/10.1038/nmat2297>
- [5] Wang, F.X., Wu, X.W., Yuan, X.H., *et al.* (2017) Latest Advances in Supercapacitors: From New Electrode Materials to Novel Device Designs. *Chemical Society Reviews*, **46**, 6816-6854. <https://doi.org/10.1039/c7cs00205j>
- [6] Shao, Y., El-Kady, M.F., Sun, J., Li, Y., Zhang, Q., Zhu, M., *et al.* (2018) Design and Mechanisms of Asymmetric Supercapacitors. *Chemical Reviews*, **118**, 9233-9280. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00252>
- [7] Yamaguchi, N., Nakazato, R., Matsumoto, K., Kakesu, M., Rosero-Navarro, N.C., Miura, A., *et al.* (2023) Electrocatalytic Property of Zn-Al Layered Double Hydroxides for CO₂ Electrochemical Reduction. *Journal of Asian Ceramic Societies*, **11**, 406-411. <https://doi.org/10.1080/21870764.2023.2236441>
- [8] Wang, T., Chen, H.C., Yu, F., Zhao, X.S. and Wang, H. (2019) Boosting the Cycling Stability of Transition Metal Compounds-Based Supercapacitors. *Energy Storage Materials*, **16**, 545-573. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2018.09.007>
- [9] Xiong, D.B., Li, X.F., Bai, Z.M. and Lu, S.G. (2018) Recent Advances in Layered Ti₃C₂T_x MXene for Electrochemical Energy Storage. *Small*, **14**, Article ID: 1703419. <https://doi.org/10.1002/smll.201703419>
- [10] Yan, W., Zeng, H., Zhang, K., Long, Y. and Wang, M. (2023) Ni-Co-Mn Hydrotalcite-Derived Hierarchically Porous Sulfide for Hybrid Supercapacitors. *Journal of Colloid and Interface Science*, **635**, 379-390. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2022.12.144>
- [11] Sivakumar, P., Jana, M., Jung, M.G., Gedanken, A. and Park, H.S. (2019) Hexagonal Plate-Like Ni-Co-Mn Hydroxide Nanostructures to Achieve High Energy Density of Hybrid Supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, **7**, 11362-11369. <https://doi.org/10.1039/c9ta02583a>

-
- [12] 侯从聪, 王惠颖, 李婷婷, 等. N-CNTs/NiCo-LDH 复合材料的制备及电化学性能[J]. 高等学校化学学报, 2022, 43(10): 191-198.
- [13] Fan, J.H., Meng, Z.Y., Chen, A.Y., Zhang, Z.G., *et al.* (2025) Construction of NiCoMo Electrode with Unanticipated Strong Cyclic Stability by Transition from Oxide into Layered Double Hydroxide. *Materials Science in Semiconductor Processing*, **188**, Article ID: 109223. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2024.109223>
- [14] Huang, H.F., Wei, X.C., Wei, G., Yan, F.X., Yan, L.Q., *et al.* (2022) Construction of Vertically Aligned Ni-Co-Mo Hybrid Oxides Nanosheet Array for High-Performance Hybrid Supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, **899**, Article ID: 163267. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163267>
- [15] Li, D.H., Li, Y.L., Chen, Y.C., Dong, Y.X., Hu, J.D., Zhao, J.W., *et al.* (2024) One-Step Electrodeposited Cracked-Bark-Shaped NiCoMoS on Carbon Cloth for High-Performing Aqueous Asymmetric Supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, **102**, Article ID: 114253. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114253>