Material Sciences 材料科学, 2025, 15(7), 1530-1537
Published Online July 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ms
https://doi.org/10.12677/ms.2025.157163

Hans汉斯

钴镍双金属氢氧化物的电沉积及其超级电容性能研究

吴　卓，胡正钧，顾芳竹，祝　彤，盛晓刚，冯东阳*

沈阳航空航天大学理学院，辽宁 沈阳

收稿日期：2025年6月19日；录用日期：2025年7月18日；发布日期：2025年7月28日

摘　要

超级电容器具有快速充放电、高循环稳定性等特点，在航空航天、交通运输等领域中得到广泛应用。过渡金属钴、镍元素拥有多重价态，其化合物具有多反应活性位点，是极具潜力的超级电容器电极材料。然而，该材料在充放电过程中易出现结构坍塌、活性物质脱落的现象，导致其循环稳定性和倍率性能不理想。本文利用循环伏安技术进行了钴镍双金属氢氧化物的电化学沉积，研究了沉积液中Co^{2+}和Ni^{2+}的比例及沉积圈数对材料电化学表现的影响。研究结果证明，在Co^{2+}和Ni^{2+}浓度达到2:1的条件下，电极材料在1 mA/cm²下的面积比电容为444.0 mF/cm²，在20 mA/cm²下可维持70.1%的面积比电容值。电极材料的负载量随着沉积圈数的增加而增加，在高负载量(4.5 mg/cm²)下，电极的倍率性能仍十分优异。

关键词

超级电容器，钴镍双金属氢氧化物，电化学沉积，倍率性能

Study on Electrodeposition of Co-Ni Double Hydroxides and Its Supercapacitor Performance

Zhuo Wu, Zhengjun Hu, Fangzhu Gu, Tong Zhu, Xiaogang Sheng, Dongyang Feng*

College of Science, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

Received: Jun. 19th, 2025; accepted: Jul. 18th, 2025; published: Jul. 28th, 2025

Abstract

Supercapacitors, characterized by their fast charge/discharge rates and high cycle stability, have found

*通讯作者。

文章引用: 吴卓, 胡正钧, 顾芳竹, 祝彤, 盛晓刚, 冯东阳. 钴镍双金属氢氧化物的电沉积及其超级电容性能研究[J]. 材料科学, 2025, 15(7): 1530-1537. DOI: 10.12677/ms.2025.157163

extensive applications in aerospace, transportation, and other fields. Transition metals cobalt and nickel, with their multiple oxidation states, demonstrate compounds containing abundant active sites, making them highly promising electrode materials for supercapacitors. However, these materials often suffer from structural collapse and active material detachment during charge/discharge processes, leading to suboptimal cycling stability and rate performance. This study employed cyclic voltammetry for electrodeposition of cobalt-nickel bimetallic hydroxides, systematically investigating the effects of Co^{2+}/Ni^{2+} ratio in the deposition solution and the number of deposition cycles on the electrochemical performance. The results revealed that electrodes prepared with a Co^{2+}/Ni^{2+} ratio of 2:1 exhibited an impressive area-specific capacitance of 444.0 mF/cm² at 1 mA/cm², while maintaining 70.1% area-specific capacitance retention at 20 mA/cm². The electrode material loading increased proportionally with deposition cycles, and notably, even at high mass loading (4.5 mg/cm²), the electrodes maintained excellent rate performance.

Keywords

Supercapacitors, Co-Ni Double Hydroxides, Electrochemical Deposition, Rate Performance

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“双碳”的背景下，清洁能源的地位日益凸显[1] [2]。在诸多绿色储能器件中，电化学储能设备已成为当下的研究热点[3]。超级电容器是极具发展潜力的电化学储能设备，拥有充电和放电速率快、使用寿命持久及绿色环保等特点，可应用于航空航天、交通运输、能源存储等领域[4] [5]。超级电容器的结构主要由集流体、电极材料、电解质溶液和隔膜等组合而成[6]，其中，电极材料的好坏决定着器件的整体性能。

钴镍双金属氢氧化物是一种极具潜力的超级电容器电极材料，具有理论容量高、电化学活性位点多、成本低廉等特点[7] [8]。然而，此类电极材料在电化学测试过程中易出现结构坍塌的问题，导致其电化学性能不理想[9] [10]。目前，钴镍双金属氢氧化物的主要合成方法包括化学共沉淀法、水热法和氢氧化物堆积法等[11]-[13]，这些方法可进行目标产物的快速制备，但在合成过程中难以实现对制备工艺的精准调控，且活性物质与集流体间的结合力相对较弱。利用高效、便捷的循环伏安沉积法[14]，能够进行活性物质在集流体上的原位沉积，优化钴镍双金属氢氧化物的合成工艺，可实现对材料结构及化学组成的精准调控，有助于提升其电化学表现。

本文利用循环伏安法进行钴镍双金属氢氧化物的电沉积，研究了沉积液中 Co^{2+}和 Ni^{2+}的浓度配比和循环伏安沉积圈数对材料电化学性能的影响，优化制备工艺，提升电极电化学性能，为高电化学活性的钴镍双金属氢氧化物的制备提供新思路。

2. 实验部分

2.1. 试剂及材料

本文相关实验中均使用分析纯化学试剂，所有实验均使用自制去离子水配制所需溶液，化学试剂和材料的具体情况见表 1。

Table 1. Regents and materials
表 1. 试剂及材料

名称	化学式	规格/纯度	生产厂家
碳纸	C	40 × 40 cm^2	北京晶龙特碳科技有限公司
硝酸钴	$Co(NO_3)_2$	AR	上海麦克林生化科技股份有限公司
硫酸镍	$NiSO_4$	AR	上海麦克林生化科技股份有限公司
无水乙酸钠	NaAc	AR	上海麦克林生化科技股份有限公司
氢氧化钾	KOH	AR	上海麦克林生化科技股份有限公司
无水乙醇	C_2H_5OH	AR	上海麦克林生化科技股份有限公司

2.2. 实验仪器

本文相关实验中所用到的主要仪器见表 2。

Table 2. Experimental instruments
表 2. 实验仪器

仪器名称	型号	生产厂商
电化学工作站	CHI660F	上海辰华电化学仪器有限公司
电子分析天平	FA224C	上海力辰仪器科技有限公司
真空烘箱	DZF-6020	上海力辰仪器科技有限公司
电热磁力搅拌器	LC-MSA-D	上海力辰仪器科技有限公司
X 射线衍射仪	PW3040/60	荷兰帕纳科公司
电解池、电极夹	C002	武汉高仕睿联科技有限公司
饱和甘汞电极	232 型	武汉高仕睿联科技有限公司
氧化汞电极	R0501 型	武汉高仕睿联科技有限公司

2.3. 电极材料的制备

2.3.1. 沉积液中不同 Co^{2+}/Ni^{2+}浓度配比下电极材料的制备

借助三电极系统，以碳纸(工作面积为 1 × 1 cm^2)为工作电极，以碳纸(工作面积为 1 × 1.5 cm^2)和饱和甘汞电极分别为辅助电极、参比电极，在含有 12 mM 的 $Co(NO_3)_2$、$NiSO_4$ 和 8 mM 的 NaAc 的混合溶液中，利用循环伏安沉积法，在 50 mV/s 扫描速率下，在−1.3~0 V (vs. SCE)电位范围内，固定 $Co(NO_3)_2$、$NiSO_4$ 溶液的总浓度为 12 mM，改变 Co^{2+}、Ni^{2+}的浓度比例分别为 3:1、2:1、1:1、1:2、和 1:3，进行镍钴双金属氢氧化物的循环伏安电沉积，分别制备 CoNi-3/1、CoNi-2/1、CoNi-1/1、CoNi-1/2、CoNi-1/3 电极。所制备的电极洗净后，放于真空干燥箱内 60℃下烘干 3 h。借助电子分析天平称量电极沉积前后质量，计算活性物质的净重。经实验测得所有电极中的镍钴双金属氢氧化物的质量约为 3.6 mg/cm^2。

2.3.2. 不同沉积质量下电极材料的制备

借助三电极系统，以碳纸为(工作面积为 1 × 1 cm^2)为工作电极，以碳纸(工作面积为 1 × 1.5 cm^2)和饱和甘汞电极分别为辅助电极、参比电极，在含有 8 mM 的 $Co(NO_3)_2$、4 Mm $NiSO_4$ 和 8 mM 的 NaAc 的混合溶液中，利用循环伏安沉积法，在 50 mV/s 扫描速率下，在−1.3~0 V (vs. SCE)电位范围内，改变循环伏安沉积圈数为 20、30、40、50 和 60 圈，分别制备 CoNi-2/1-20、CoNi-2/1-30、CoNi-2/1-40、CoNi-2/1-

50 和 CoNi-2/1-60 电极。所制备的电极洗净后，放于真空干燥箱内 60℃下烘干 3 h。借助电子分析天平称量电极沉积前后质量，计算活性物质的净重。在 20、30、40、50 和 60 圈循环伏安沉积下制备的电极中的活性物质质量分别为 0.9、1.5、2.3、3.6 和 4.5 mg/cm^2。

2.4. 样本标准

2.4.1. 组成的表征

借助 X 射线衍射仪(辐射源：CuK，波长：1.54718 nm，扫描范围：5˚~80˚，扫描速率：0.12˚/s)研究钴镍双金属氢氧化物的晶型组成。

2.4.2. 电化学性能测试

借助三电极测试系统完成相关电化学测试，工作电极选取钴镍双金属氢氧化物/碳纸，辅助电极选取纯碳纸，参比电极选取氧化汞电极，以 1 M KOH 溶液为电解质溶液，本文中涉及的电位主要相对氧化汞电极得出，通过循环伏安、恒电流充放电测试，测试电极的电化学性能。

2.5. 相关计算公式

根据所选取电流下的恒电流充放电测试曲线，计算电极的面积比电容值：

$$C_a = \frac{I \times \Delta t}{S \times \Delta U} \tag{1}$$

式中，C_a (mF/cm^2)为电极的面积比电容值，Δt (s)为放电时间，I (mA)为特定充放电电流值，S (cm^2)为电极的投影面积值，ΔU (V)为电极的工作电位区间。

3. 结果与讨论

3.1. 沉积液中 Co^{2+}/Ni^{2+}浓度配比对材料电化学性能的影响

为了分析沉积液中 Co^{2+}/Ni^{2+}浓度配比对钴镍双金属氢氧化物的影响，在 1 M KOH 电解质溶液中，在 0~0.5 V 电位区间内，进行 CoNi-3/1、CoNi-2/1、CoNi-1/1、CoNi-1/2 和 CoNi-1/3 电极的电化学测试。所制备的电极在 10 mV/s 的扫描速率下的循环伏安(CV)曲线见图 1(a)。由观察可得，所有电极的 CV 曲线均呈现出一对可逆的氧化峰和还原峰，说明所制备的电极均具有较好的电化学活性。随着沉积液中 Co^{2+}/Ni^{2+}的浓度配比从 3:1 逐渐变化至 1:3 时，对应条件下的样品的氧化还原峰均向正电位方向移动，这与活性物质中镍组分增多有关。随着镍含量的增多，不同电极的 CV 曲线的氧化峰和还原峰的峰电流呈现先增大后减小的趋势，所制备的 CoNi-2/1 电极的 CV 曲线的峰电流值最高，说明沉积液中适当的 Co^{2+}/Ni^{2+}比例有助于提升电极的电化学活性。

为了研究所制备电极在不同电流密度下的储能表现，对所制备的电极在 1、5、10、15 和 20 mA/cm^2 的电流密度下分别进行恒电流充放电测试，结合式(1)计算各电流密度下的面积比电容。所制备电极在 1 mA/cm^2 电流密度下的恒电流充放电曲线见图 1(b)。观察曲线可知，随着沉积液中 Co/Ni 的浓度配比从 3:1 变化至 2:1 时，所制备的 CoNi-3/1 和 CoNi-2/1 电极的放电时间逐渐增加，当沉积液中 Co^{2+}/Ni^{2+}的浓度配比逐渐变化至 1:1、1:2 和 1:3 时，恒电流充放电曲线的放电时间逐渐减小。在 1 mA/cm^2 电流密度下，CoNi-3/1、CoNi-2/1、CoNi-1/1、CoNi-1/2 和 CoNi-1/3 电极的面积比电容分别为 257.1、444.0、341.7、268.6 和 238.1 mF/cm^2。图 1(c)为所制备的电极在不同电流密度下的面积比电容曲线。由图可见，CoNi-2/1 电极在 1~20 mA/cm^2 区间的面积比电容值均高于另外四个电极。当电流密度增大至 20 mA/cm^2 时，CoNi-3/1、CoNi-2/1、CoNi-1/1、CoNi-1/2 和 CoNi-1/3 电极的面积比电容分别下降至 175.6、311.6、174.4、89.2 和 79.2 mF/cm^2，CoNi-2/1 电极具有较高的面积比电容值。不同电极在 1~20 mA/cm^2 电流密度下面积

比电容维持率曲线见图 1(d)。由图可见，相较于 CoNi-3/1、CoNi-1/1、CoNi-1/2 和 CoNi-1/3 电极，CoNi-2/1 电极的面积比电容维持率在 1~20 mA/cm^2 区间内均为最高。当电流密度为 20 mA/cm^2 时，CoNi-3/1、CoNi-1/1、CoNi-1/2 和 CoNi-1/3 电极的面积比电容维持率分别为 68.3%、70.1%、51.0%、33.2%和 33.2% (表 3)，呈现出先增大后减小的变化趋势，与所制备电极的面积比电容变化趋势相一致，这种变化趋势可能与所制备的电极中镍组分含量增多有关，过多导电性差的 $Ni(OH)_2$ 会抑制活性材料的电化学性能[15]。

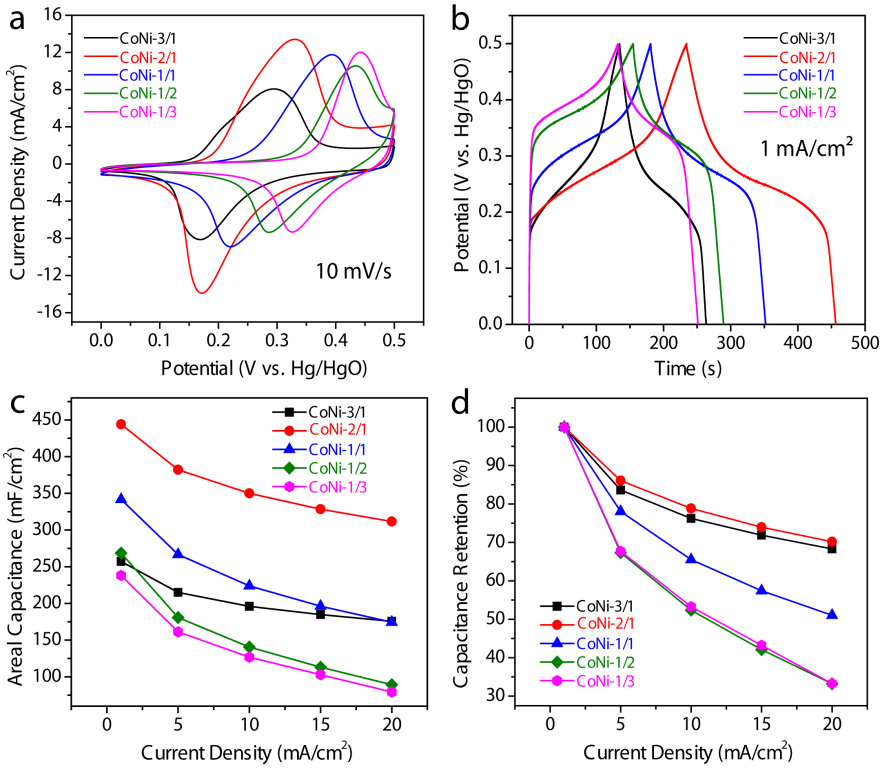

Figure 1. Electrochemical performance tests of CoNi-3/1, CoNi-2/1, CoNi-1/1, CoNi-1/2 and CoNi-1/3 electrodes: (a) CV curves at 10 mV/s; (b) Galvanostatic charge/discharge curves at a current density of 1 mA/cm^2; (c) Area-specific capacitance curves and (d) Area-specific capacitance retention curves at 1~20 mA/cm^2

图 1. CoNi-3/1、CoNi-2/1、CoNi-1/1、CoNi-1/2 和 CoNi-1/3 电极的电化学性能测试：(a) 10 mV/s 下的 CV 曲线；(b) 1 mA/cm^2 下的恒电流充放电曲线；1~20 mA/cm^2 下的(c) 面积比电容曲线和(d) 面积比电容维持率曲线

Table 3. Area-specific capacitance at 1 mA/cm^2 and 20 mA/cm^2 and area-specific capacitance retention of at 1~20 mA/cm^2 of the prepared electrodes, respectively

表 3. 所制备的电极分别在 1 mA/cm^2、20 mA/cm^2 下的面积比电容和 1~20 mA/cm^2 下的面积比电容维持率

样品名称	面积比电容(1 mA/cm^2)	面积比电容(20 mA/cm^2)	电容维持率(1~20 mA/cm^2)
CoNi-3/1	257.1	175.6	68.3%
CoNi-2/1	444.0	311.6	70.1%
CoNi-1/1	341.7	174.4	51.0%
CoNi-1/2	268.6	89.2	33.2%
CoNi-1/3	238.1	79.2	33.2%

为了研究 CoNi-2/1 电极中钴镍双金属氢氧化物的结构稳定性，我们对该电极进行 X 射线衍射(XRD)测试和电化学循环稳定性测试。图 2(a)为 CoNi-2/1 电极的 XRD 谱图。由图可见，CoNi-2/1 电极和碳纸

的衍射峰在数量和位置上基本相同，均在 26.4˚和 54.6˚处出现碳纸中碳的典型衍射峰，无其他衍射峰出现，说明利用循环伏安法制备的钴镍双金属氢氧化物为无定型材料。图 2(b)为 CoNi-2/1 电极在 10 mA/cm^2 电流密度下的循环稳定性测试曲线。如图所示，在 1000 次恒电流充放电测试后，CoNi-2/1 电极的面积比电容维持率高达 92.0%，说明钴镍双金属氢氧化物的无定型结构有助于提升电极材料在电化学循环过程中的稳定性。

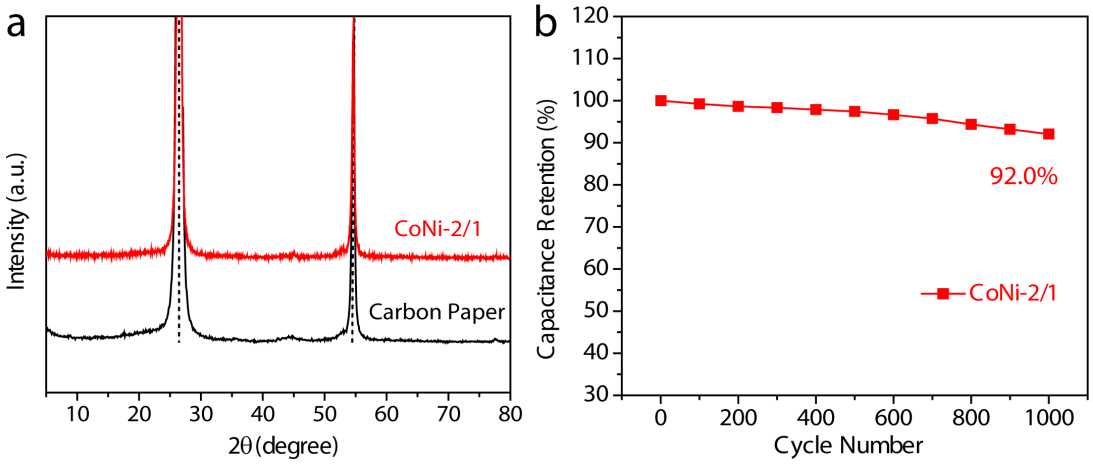

Figure 2. (a) XRD patterns of CoNi-2/1 and carbon paper electrodes; (b) Cycling stability test of CoNi-2/1 electrode at a current density of 10 mA/cm^2

图 2. (a) CoNi-2/1 和碳纸电极的 XRD 图谱；(b) CoNi-2/1 电极在 10 mA/cm^2 电流密度下的循环稳定性测试

3.2. 活性物质质量对材料电化学性能的影响

为了研究活性物质质量对钴镍双金属氢氧化物电化学性能的影响，通过改变循环伏安沉积圈数，制备活性物质质量不同的 CoNi-2/1 电极。图 3(a)为电极中的钴镍双金属氢氧化物的沉积质量曲线。由图可见，CoNi-2/1-20、CoNi-2/1-30、CoNi-2/1-40、CoNi-2/1-50 和 CoNi-2/1-60 电极中的活性物质质量分别为 0.9、1.5、2.3、3.6、4.5 mg/cm^2，说明利用循环伏安沉积法可实现高负载量活性物质的制备。

为了研究活性物质对 CoNi-2/1 电极电化学性能的影响，对钴镍双金属氢氧化物质量分别为 0.9、1.5、2.3、3.6 和 4.5 mg/cm^2 的电极进行电化学测试。所制备电极在 10 mV/s 的扫描速率下的 CV 曲线见图 3(b)。经观察曲线可得，随着钴镍双金属氢氧化物质量的增加，相应电极的 CV 曲线峰电流逐渐增大，说明质量的提升不会抑制活性材料的电化学活性。不同电极在 1 mA/cm^2 电流密度下的恒电流充放电曲线见图 3(c)。经观察曲线可得，所有曲线的充电时间和放电时间均较为近似，说明所制备的电极均具有较高的可逆性，且电容性能均较为优异。图 3(d)为所制备电极在不同电流密度下的面积比电容值。由图可见，当活性物质质量增加时，电极在整个电流区间内的面积比电容值也相应增加。当电流密度从 1 mA/cm^2 增大至 20 mA/cm^2 时，CoNi-2/1-20、CoNi-2/1-30、CoNi-2/1-40、CoNi-2/1-50 和 CoNi-2/1-60 电极的面积比电容由 92.2、131.3、208.9、444.0 和 540.8 mF/cm^2 分别下降至 48.4、75.2、132.4、311.6 和 396.3 mF/cm^2，相应面积比电容维持率分别为 52.4%、57.2%、63.3%、70.1%和 73.2%。由此可见，随着电极中钴镍双金属氢氧化物质量的增加，电极的倍率性能基本呈现出逐渐增加的趋势，说明本实验中的制备方法有助于实现高负载量电极材料的制备。CoNi-2/1 电极在高活性物质负载量(4.5 mg/cm^2)下具有出色的倍率性能(1~20 mA/cm^2, 73.2%)，优于近期报道的其它钴镍双金属氢氧化物材料，例如，通过水热法在泡沫镍基底上生长的镍钴层状双金属氢氧化物(1~10 A/g, 57.1%) [16]、利用醇－水热法合成的钴镍双金属氢氧化物(1~10 A/g, 35.1%) [17]、采用水热法制备的中空结构钴镍双金属氢氧化物(1~20 A/g, 70.1%) [18]和利用化

学共沉积的方法合成的钴镍双氢氧化物复合电极材料(1~10 A/g, 71%) [19]。

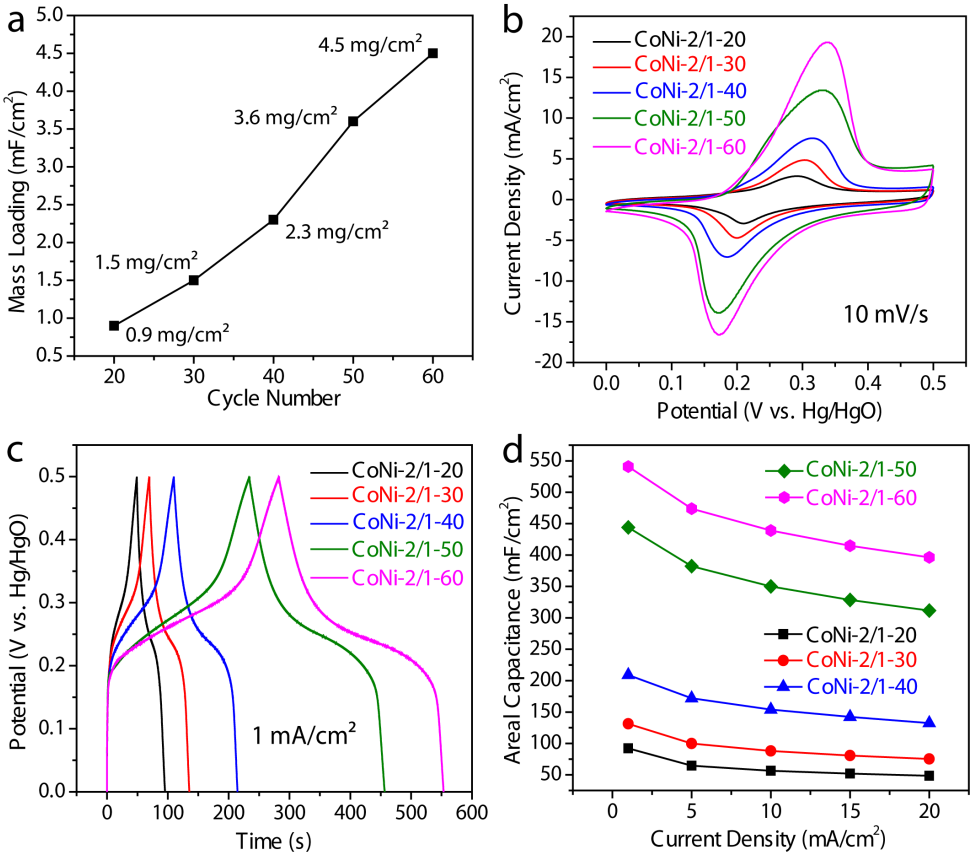

Figure 3. (a) Active substance deposition mass curves, (b) CV curves at 10 mV/s, (c) Galvanostatic charge/discharge curves at 1 mA/cm^2 and (d) Area-specific capacitance curves at 1~20 mA/cm^2 of CoNi-2/1-20, CoNi-2/1-30, CoNi-2/1-40, CoNi-2/1-50 and CoNi-2/1-60 electrodes

图 3. CoNi-2/1-20、CoNi-2/1-30、CoNi-2/1-40、CoNi-2/1-50 和 CoNi-2/1-60 电极的(a) 活性物质沉积质量曲线、(b) 10 mV/s 下的循环伏安曲线、(c) 1 mA/cm^2 下的恒电流充放电曲线和(d) 1~20 mA/cm^2 下的面积比电容曲线

4. 结论

本文借助循环伏安电沉积技术，在碳纸基底上电沉积了钴镍双金属氢氧化物，研究了沉积液中Co^{2+}/Ni^{2+}浓度配比和活性物质质量对钴镍双金属氢氧化物电化学性能的影响。结果表明，当沉积液中Co^{2+}、Ni^{2+}的浓度比例为 2:1 时，所制备的电极电化学性能最优。当活性物质质量增加时，所制备的电极仍能表现出较好的储能和倍率性能。

基金项目

2024 年沈阳航空航天大学大学生创新创业训练计划项目(D202311141634482619)。

参考文献

[1] 于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 423-434.

[2] 董立霞. “双碳”目标下能源领域低碳转型技术进展[J]. 广州化工, 2023, 51(8): 36-38.

[3] Soloveichik, G.L. (2011) Battery Technologies for Large-Scale Stationary Energy Storage. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, **2**, 503-527. https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116

[4] Service, R.F. (2006) New ‘Supercapacitor’ Promises to Pack More Electrical Punch. *Science*, **313**, 902-902. https://doi.org/10.1126/science.313.5789.902

[5] Miller, J.R. and Simon, P. (2008) Electrochemical Capacitors for Energy Management. *Science*, **321**, 651-652. https://doi.org/10.1126/science.1158736

[6] 权国辉, 张庆莉, 郃金华. 超级电容器电极材料的研究与发展趋势[J]. 电池, 2025, 55(2): 360-367.

[7] Li, T., Li, G.H., Li, L.H., Liu, L., Xu, Y., Ding, H.Y., *et al*. (2016) Large-Scale Self-Assembly of 3D Flower-Like Hierarchical Ni/Co-LDHs Microspheres for High-Performance Flexible Asymmetric Supercapacitors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 2562-2572. https://doi.org/10.1021/acsami.5b10158

[8] Cai, X., Song, Y., Sun, Z., *et al*. (2017) Rate Capability Improvement of Co-Ni Double Hydroxides Integrated in Cathodically Partially Exfoliated Graphite. *Journal of Power Sources*, **365**, 126-133. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.08.039

[9] Meng, Q., Cai, K., Chen, Y. and Chen, L. (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

[10] 牛玉莲, 金鑫, 郑佳, 等. 石墨烯/钴镍双金属氢氧化物复合材料的制备及电化学性能研究[J]. 无机化学学报, 2012, 28(9): 1878-1884.

[11] Zhao, M., Zhao, Q., Li, B., *et al*. (2017) Recent Progress in Layered Double Hydroxide Based Materials for Electrochemical Capacitors: Design, Synthesis and Performance. *Nanoscale*, **9**, 15206-15225. https://doi.org/10.1039/C7NR04752E

[12] 阳昌英, 宋方祥, 陈前林. 双金属镍钴氢氧化物的制备及其电化学性能研究[J]. 功能材料, 2023, 54(10): 10014-10020.

[13] 张中浩, 庆奕良. 一步水热法制备钴镍氢氧化物及其电容性能研究[J]. 广东化工, 2018, 45(7): 53-54.

[14] 薛丹, 袁凡舒, 朱春茂, 等. $Ni(OH)_2$基超级电容器电极材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2024, 43(11): 1022-1029.

[15] Mavis, B. and Akinc, M. (2004) Three-Component Layer Double Hydroxides by Urea Precipitation: Structural Stability and Electrochemistry. *Journal of Power Sources*, **134**, 308-317. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.03.056

[16] 董世豪, 刘岩, 李春, 等. 多孔镍钴层状双金属氢氧化物阵列的制备及其电容性能[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2024, 45(4): 67-84.

[17] 冯艳艳, 黄宏斌, 杨文, 等. 醇-水热法制备钴镍双金属氢氧化物及其电化学性能研究[J]. 化工新型材料, 2019, 47(6): 140-143.

[18] 侯肖君, 彭志凌, 张鸿涛, 等. Ni-Co LDH 的制备以及超级电容器性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(3): 306-314.

[19] 金小青, 曹杰, 胡忠山, 等. 石墨烯/钴镍双氢氧化物复合材料的制备及其超电容特性[J]. 应用化学, 2015, 32(5): 583-590.