

Au纳米颗粒修饰的钴酸镍气凝胶复合电极的制备及电化学性能研究

高宇宏, 张 翱, 陈 欢, 周雪娇*

哈尔滨师范大学物理与电子工程学院学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年10月10日; 录用日期: 2025年11月5日; 发布日期: 2025年11月19日

摘 要

双金属氧化物具有优异的电荷存储性能。本文以双金属氧化物钴酸镍(NiCo_2O_4)为研究对象, 采用新颖的冷冻干燥技术获得超轻 NiCo_2O_4 气凝胶材料, 利用贵金属Au纳米粒子修饰, 获得 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 气凝胶复合电极材料。该复合电极具有大孔道结构, 更有利于电解质离子输运。通过CV, GCD和EIS等电化学技术研究表明, $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 复合电极在6 M氢氧化钾电解液中可提供 $1350 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ 的比电容。并且在电流密度 $10 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 下经过20,000次的充放电循环测试后, 比电容值仍保持初始比电容值的90.65%, 表现其良好的循环稳定性。这种超轻的气凝胶复合电极有望在超轻器件等领域有重要应用。

关键词

NiCo_2O_4 , Au纳米颗粒, 气凝胶电极, 电容性能

Preparation and Electrochemical Performance Study of Cobalt Nickelate Aerogel Composite Electrode Modified with Au Nanoparticles

Yuhong Gao, Xuan Zhang, Huan Chen, Xuejiao Zhou*

School of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: October 10, 2025; accepted: November 5, 2025; published: November 19, 2025

Abstract

Bimetallic oxides have excellent charge storage properties. In this paper, the bimetallic oxide nickel cobalt oxide (NiCo_2O_4) was used as the research object. A novel freeze-drying technology was used

*通讯作者。

文章引用: 高宇宏, 张翱, 陈欢, 周雪娇. Au 纳米颗粒修饰的钴酸镍气凝胶复合电极的制备及电化学性能研究[J]. 材料科学, 2025, 15(11): 2035-2043. DOI: 10.12677/ms.2025.1511216

for ultralight NiCo_2O_4 aerogel material, which was modified by noble metal Au nanoparticles, and $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ aerogel composite electrode material. The composite electrode has a large pore structure, which is more conducive to the transport of electrolyte ions. The specific capacitance of $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ composite electrode in 6 M potassium hydroxide electrolyte was $1350 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ by CV, GCD and EIS. The specific capacitance is still 90.65% of the initial specific capacitance after 20,000 charge-discharge cycles at a current density of $10 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$, showing good cycle stability. This ultra-light aerogel composite electrode is expected to have important applications in ultra-light devices and other fields.

Keywords

NiCo_2O_4 , Au Nanoparticles, Aerogel Electrode, Capacitive 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

能源消耗的增加和过度是现代人对的一大问题, 提高能量的有效存储对于当前的现象具有重要的意义。超级电容器凭借独特的储能机制, 拥有高功率密度, 可实现快速充放电, 在短时间内释放或存储大量能量, 其循环寿命可达数万次, 能适应复杂多变的工作环境[1]-[5]。因此, 作为一种极具有创造性和极具有前景的储能装置, 引起了人们的兴趣。超轻气凝胶是一种具有纳米多孔结构的超轻固体材料, 因其独特的物理特性被誉为“冻结的烟”或“固态空气”。因为它的密度极低, 比表面积大等特性在新能源, 工业环保, 生物医疗等方面有极大的应用。近年来, 过渡金属氧化物复合材料以其良好的各种氧化还原状态的组合、化学组成、优异的电化学活性和超长稳定性, 以及与单一过渡金属氧化物相比的准电容性能[6]-[8], 被深入研究并发展成为非对称超级电容器的阴极。在典型的氧化物家族中, 具有面心立方尖晶石结构的 NiCo_2O_4 因其对环境友好、带隙能量低、丰富的电活性中心和优异的电容值而备受关注, 被认为是一种很有前途的电极候选材料[9]-[11]。令人遗憾的是, 单一的 NiCo_2O_4 电极面临着许多挑战, 除了实用性之外, 还存在电导率低、低倍率稳定性和性能差的问题。

金(Au)虽因成本限制未在超级电容器领域实现规模化应用, 但其独特的物理化学特性使其在特定高性能储能场景中展现出不可替代的价值, 核心优势集中体现在导电性、稳定性等方面, 对超级电容器关键性能的提升具有显著作用[12]-[14]。在复合电极中, 金可作为“导电桥梁”, 强化活性材料与集流体间的电荷传输, 同时自身双电层储能与活性材料赝电容形成协同作用, 进一步提升电极比容量。综上, 金凭借“高导电 - 高稳定 - 高兼容”的特性组合, 成为超级电容器在高功率、长寿命、极端环境、等高端应用场景中的关键备选材料, 为高性能储能器件的研发提供了重要技术支撑。在本研究中, 采用配位化学合成法制备 NiCo_2O_4 材料, 再通过原位还原法将 Au 颗粒沉淀在 NiCo_2O_4 表面上, 由此成功制备了 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 复合材料, 通过循环伏安法(CV)、恒电流充放电(GCD)和电化学阻抗谱(EIS)等的电化学技术对所制备的电极进行测试, 并在相同条件下对比。除此之外, 对复合电极进行充放电循环测试, 考察其电化学稳定性。

2. 实验部分

2.1. 仪器与试剂

六水硝酸钴($\text{Co}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 四水乙酸镍($\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$), 聚偏二氟乙烯(PVDF), N-甲基吡咯

烷酮(NMP), 氢氧化钾(KOH), 氯金酸($\text{AuCl}_3 \cdot \text{HCl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)。

扫描电子显微镜(SEM, SU70, 日本株式会社日立制作所), X 射线衍射仪(XRD, D/max2600, 日本理学株式会社), 真空干燥箱(DZ-IBCIV), 电化学工作站(VMP 3 型), 冷冻干燥机(HHLGJ-65A), 脱色微型圆周摇床(BETS-M1)。

2.2. 材料的制备

2.2.1. NiCo_2O_4 气凝胶的制备

同时将 0.5 mmol 四水乙酸镍与 1 mmol 六水硝酸钴溶解到 10 ml 水的烧杯中, 并放置在磁力搅拌器上搅拌, 之后将 0.06 mmol PVP 加入烧杯一起持续搅拌 12 小时, 随后将上述混合溶液移至离心管, 放在液氮里冷冻, 然后将离心管放在冷冻干燥机里干燥 24 小时。将制备好的 NiCo_2O_4 置于管式炉中, 以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 520°C , 最终获得 NiCo_2O_4 材料。作为对比样, 直接将上述混合溶液放入真空干燥箱中干燥, 之后以同样的温度在管式炉中煅烧, 得到 bulk NiCo_2O_4 样品。

2.2.2. $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 气凝胶电极的制备

采用原位还原法将 Au 长在 NiCo_2O_4 表面, 将 0.02 g SnCl_2 加入 20 ml 水中溶解, 然后 20 mg NiCo_2O_4 加入上述溶液, 持续活化并震荡 12 h, 把 0.2 ml $\text{AuCl}_3 \cdot \text{HCl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 和 3 ml 氨水加入 17 ml 水中, 将活化过的 NiCo_2O_4 放入配好的溶液反应一段时间, 随后用水和乙醇洗涤, 将洗涤后的样品放入真空干燥箱干燥, 就得到了 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 复合材料。

2.2.3. 电化学测量

对于电极制备, 将样品、乙炔黑在研钵中研磨, 然后加入 PVDF 和 NMP 混合, 在超声仪(KQ2200B)中超声 40 分钟, 将一定体积的混合物滴在泡沫镍上, 并在 60°C 下真空干燥。制作的工作电极具有 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ 的面积和约 1~2 mg 的质量负载。电极材料的质量可以通过称量浆料装载前后的泡沫镍来获得。选择泡沫镍作为集流体, 因为其具有优异的导电性。

所有的电化学测试均在 VMP 3 型电化学工作站上进行。通过循环伏安法(CV)和恒流充放电(GCD)方法测试 NiCo_2O_4 、 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 电极的电化学性能, 其中在三电极系统中, 6.0 M KOH 作为水性电解质, 铂箔作为对电极, Ag/AgCl 电极作为参比电极。在 10 MHz~100 KHz 的频率范围内, 用电化学阻抗谱(EIS)研究了奈奎斯特曲线。

3. 结果与讨论

3.1. 样品形貌与结构表征

图 1 是所有样品的 SEM 图像, 可以清晰地观测到样品的形貌特征。图 1(a)为 NiCo_2O_4 材料, 呈现出三维孔洞结构。图 1(b)、图 1(c)为 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 复合材料, 复合材料也呈现三维孔洞结构, 在其表面上直接观测不出金的存在, 但从图 1(d)的 EDX 中能看到金的含量, 说明 Au 纳米颗粒复合在 NiCo_2O_4 材料的表面上, 不会造成导电通路受阻, 保证了结构的完整性和稳定性, 进而保障了它在实际电化学测试中优异的工作效能。

图 2 所示为 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 复合材料的 XRD 衍射图, 由此确定材料的晶体结构。在 2θ 角度为 31.1° , 36.7° , 38.4° , 44.6° , 55.4° 和 59.1° 的衍射峰分别与 NiCo_2O_4 (PDF#20-0781)的(220), (311), (222), (400), (422)和(511)晶面[15]相对应。此外, 还观察到位于 42.8° 和 62.4° 的另外两个峰, 与标准卡 PDF#75-0197 [16]相对比分析是 NiO 的峰, 它可能与烧结温度有关, 在 520°C 下形成了 NiO, NiO 的形成会增加电子传输阻力, 不利于电子转移, 减弱反应速率。同时, 38.3° , 44.6° 和 64.8° 出现了一些峰, 对比 Au 的衍射卡片 (PDF#2-1095), 对应着 Au 的(111), (200)和(220)的晶面特征峰[17]。实验表明 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 复合材料的生成。

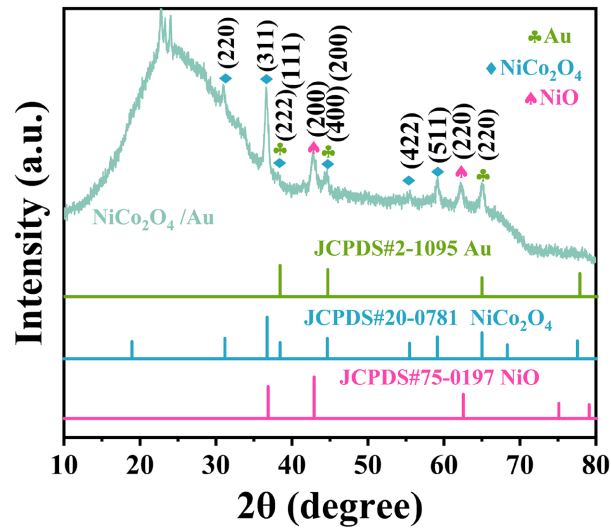


Figure 1. SEM images of (a) NiCo_2O_4 , ((b)-(c)) $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$; (d) EDX of $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$
图 1. (a) NiCo_2O_4 、((b)-(c)) $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 的扫描电子显微镜(SEM)图像: (d) $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 的 EDX

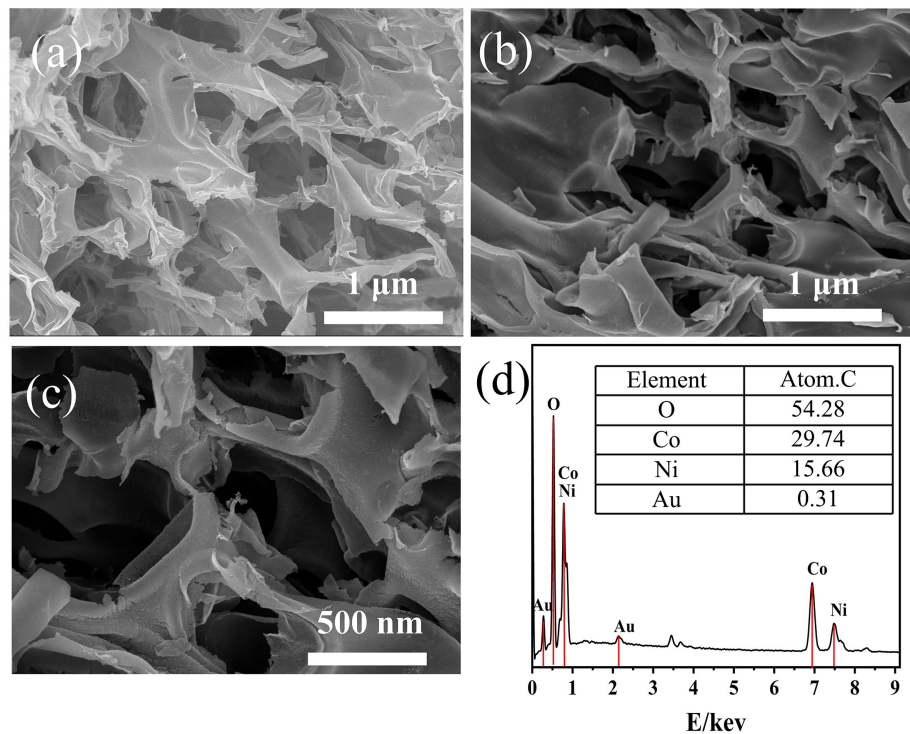


Figure 2. XRD diagram of the as-fabricated samples
图 2. 所制备样品的 X 射线衍射(XRD)图谱

3.2. 电化学性能研究

图 3 的(a)~(d)分别是 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 和 bulk NiCo_2O_4 两种纳米颗粒电极在不同扫描速率的 CV 曲线和不同电流密度下的 GCD 曲线。对比图 3(e), 明显能看出在 $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 电流密度下 NiCo_2O_4 的 GCD 曲线电容大于 bulk NiCo_2O_4 的电容, 表明 NiCo_2O_4 气凝胶的电容性质表现更好。与 NiCo_2O_4 相比, $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 的复合材料的三维孔洞结构有利于离子传输, 加快了离子传输的速率, 有利于储能效率的提高[18]。对于图

3(f), 三种电极在 $5 \text{ mV} \cdot \text{S}^{-1}$ 下的 CV 曲线比电容最大, 意味着在电流密度相对较小的情况下, 离子具备更为充足的条件来实现充分扩散, 进而能够毫无阻碍地渗透进电极的内部结构当中。而这种离子充分扩散的状况, 对于比电容的提升是极为有利的, 有利于比电容的提高。NiCo₂O₄/Au 电极的比电容值更大, 证明了离子充分扩散程度要高于其他两者电极, 说明了 Au 纳米粒子对提高电容起到了重要作用。

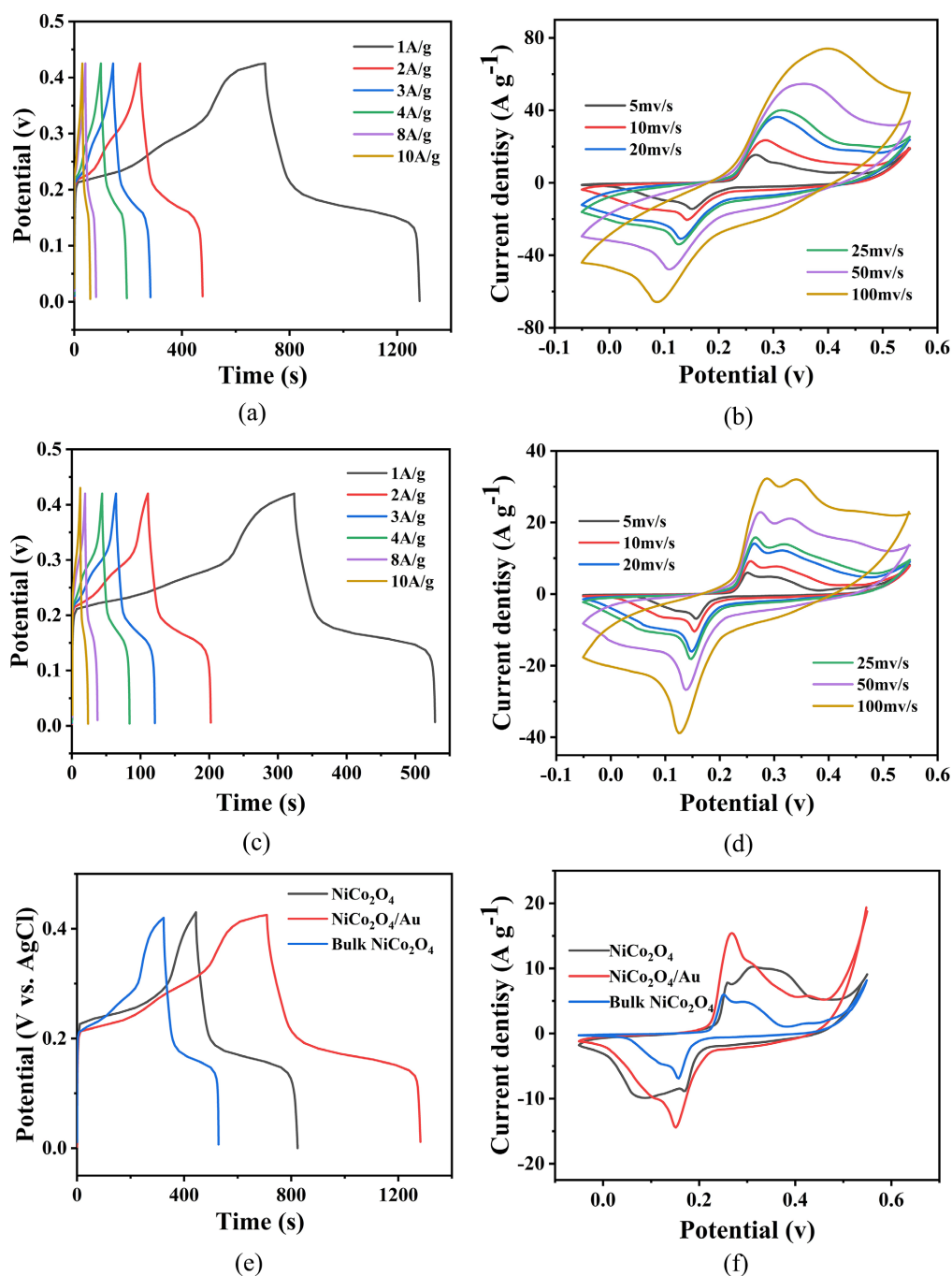


Figure 3. (a) GCD curves of NiCo₂O₄/Au and (c) Bulk NiCo₂O₄ at different current densities: (a) NiCo₂O₄/Au and (c) Bulk NiCo₂O₄ at different scan rates: (e) GCD curves of different samples at $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$: (f) CV curves of different samples at $5 \text{ mV} \cdot \text{S}^{-1}$

图 3. (a) NiCo₂O₄/Au、(c) Bulk NiCo₂O₄ 在不同电流密度下的 GCD 曲线: (a) NiCo₂O₄/Au、(c) Bulk NiCo₂O₄ 在不同扫描速率下的 CV 曲线: (e) 不同样品在 $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 下的 GCD 曲线: (f) 不同样品在 $5 \text{ mV} \cdot \text{S}^{-1}$ 下的 CV 曲线

图 4(a)是 NiCo_2O_4 、 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 和 bulk NiCo_2O_4 的电化学阻抗分析图谱。在高频区域内半圆弧半径对应材料的电荷转移电阻(Rct) [19]。观察可知, $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 复合电极的半圆弧半径显著小于 NiCo_2O_4 电极和 bulk NiCo_2O_4 电极, 这表明由于 Au 的掺杂使 NiCo_2O_4 的电荷转移电阻更低, 从而使电荷转移过程更容易发生, 反应速率也更高。在低频区域, $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 杂化电极直线区域的斜率大于 NiCo_2O_4 电极和 bulk NiCo_2O_4 电极, 这一现象反映出 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 具有更优的电容性能, 且其离子转移速率相较于 NiCo_2O_4 和 bulk NiCo_2O_4 更快。如图 4(b)所示, $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 电极的 Rct 值仅为 $4.974\ \Omega$, 低于 $8.303\ \Omega$ 的 NiCo_2O_4 电极和 $1927\ \Omega$ 的 bulk NiCo_2O_4 电极。这种导电性的提高可能是由于引进了 Au 纳米粒子, Au 纳米粒子的存在增加了电极的电导率, 从而大大改善了电子的输运和收集。综上, 这一结果证实了 Au 纳米粒子能够提升复合材料的离子转移速率, 使得 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 的电化学性能优于 NiCo_2O_4 和 bulk NiCo_2O_4 。

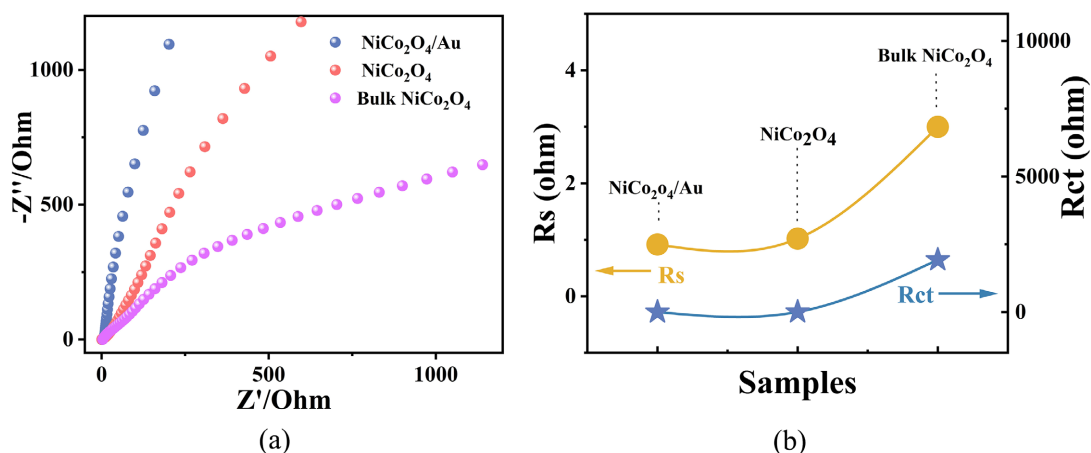
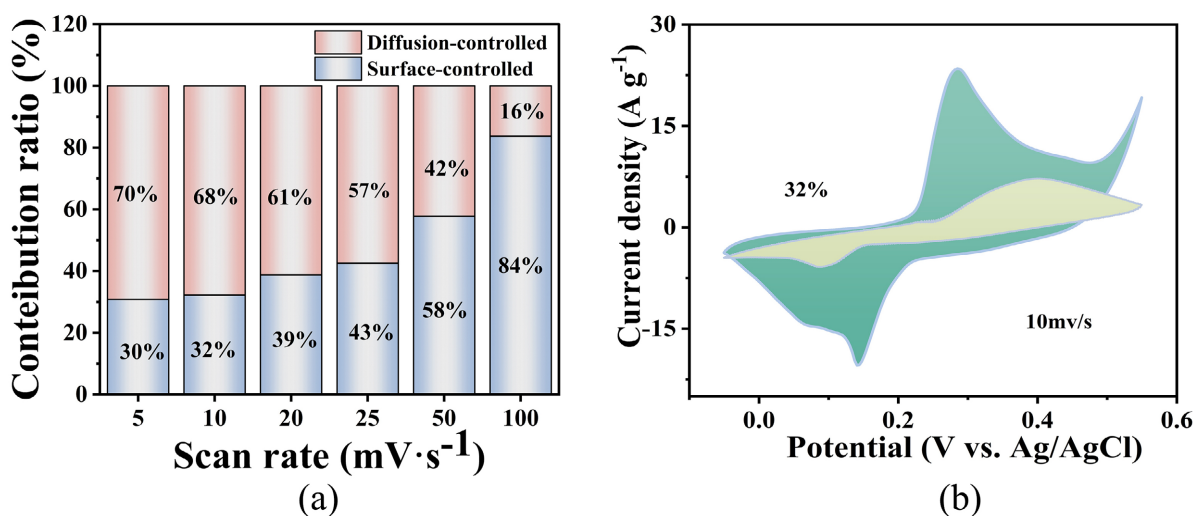


Figure 4. (a) Nyquist plots of the corresponding electrodes and (b) comparison values of R_s and R_{ct}
图 4. (a) 相应电极的奈奎斯特曲线以及(b) R_s 和 R_{ct} 比较值

图 5(a)所示, 在 $5\ \text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 的扫描速率下, 表面电容控制贡献为 33%, 在 $100\ \text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 的扫描速率下, 表面电容控制贡献为 84%, 这表示随着扫描速率的增加, 表面控制电容起主导作用。如图 5(b)-(f)所示, 随着 CV 扫描速度的逐渐增加, 表面控制的区域也随之增大。这种现象表明该材料的法拉第反应速率提高, 传质能力增强。



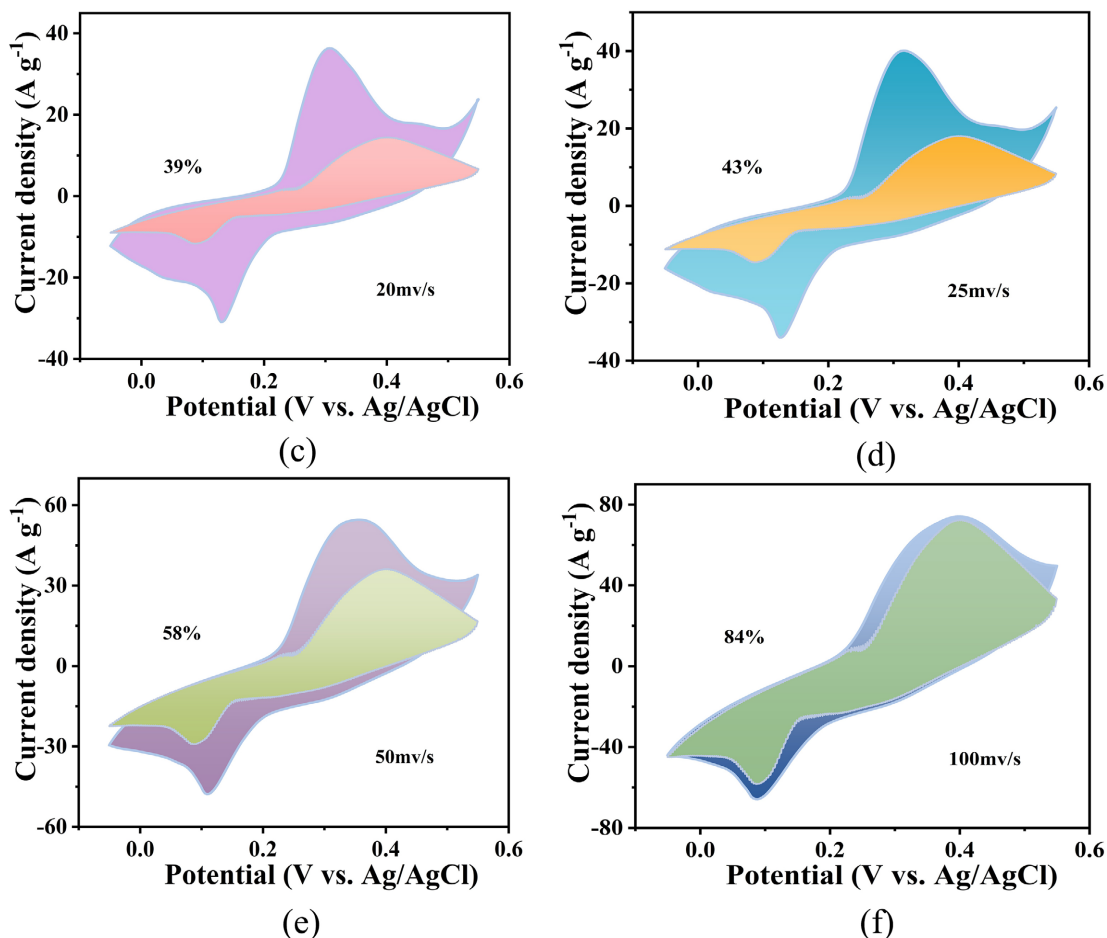


Figure 5. (a) Contributions of diffusion-controlled and surface-controlled capacitances at 5, 10, 20, 25, 50 and 100 $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$; ((b)-(f)) Capacitance contributions of $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ at different scan rates.

图 5. (a) 在 5、10、20、25、50 和 100 $\text{mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 下扩散控制和表面控制电容的贡献: ((b)-(f)) $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 在不同扫描速率下的电容贡献

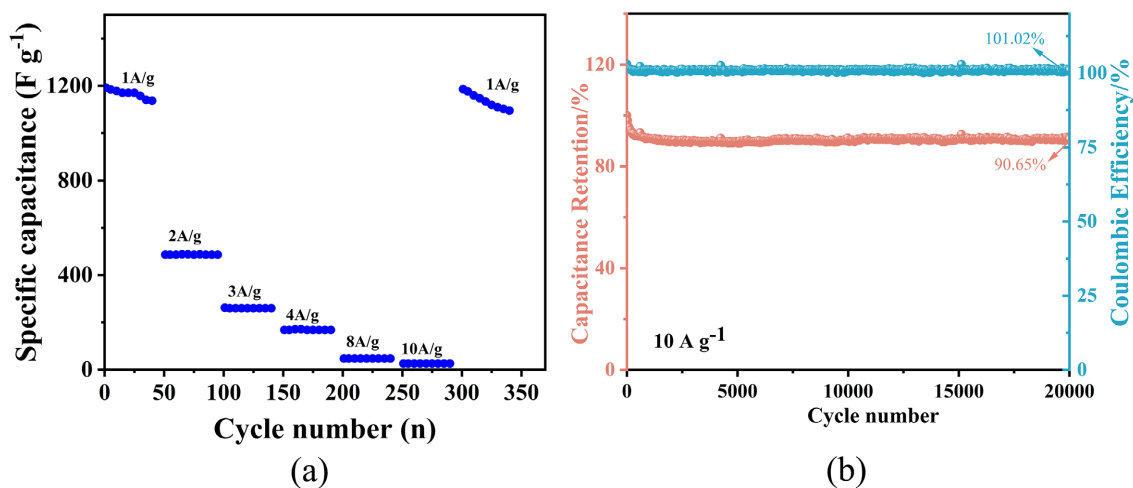


Figure 6. (a) Rate performance of $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ at different current densities; (b) Cycling stability test of $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ at a current of $10 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$

图 6. (a) $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 在不同电流密度下的倍率性能: (b) 在电流为 $10 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 时 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 的循环稳定性测试

如图 6(a)能够看出经过电流密度变换后该电极仍可恢复到原比电容值, 说明该电极拥有出色的倍率性能。如图 6(b)是在电流密度为 $10 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 时测量 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 复合电极的长期循环稳定性测试。电极需要经历大量的充放电循环过程。如果电极的循环稳定性不佳, 那么随着充放电次数的增加, 比电容会快速下降, 导致储能设备的性能也降低。在经过 20,000 次充放电循环后进行对比, 比电容仍保持初始比电容的 90.65%, 说明复合电极的循环稳定性较好。有望在未来的高性能储能器件研发和应用领域得到更为广泛的应用和推广。

4. 结论

本文结合冷冻干燥技术及原位还原法制备了 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 复合气凝胶电极。通过 EIS 阻抗测试表明 $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 的 R_{ct} 电阻为 4.974Ω , 显著低于 NiCo_2O_4 和 bulk NiCo_2O_4 的电阻, 表明 Au 纳米粒子的引入显著提升了电极材料的导电性能及界面电荷转移性能。因此, 电压窗口为 $-0.05 \sim 0.55 \text{ V}$ 时, 电流密度为 $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 下, $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{Au}$ 气凝胶复合材料的比电容高达 $1350 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$, 显著高于单一的 NiCo_2O_4 和 bulk NiCo_2O_4 的电容。此外, 制备的复合气凝胶电极也具有较好的循环性能, 在完成 20,000 次充放电循环测试后, 仍可达初始比电容的 90.65%。这种超轻的气凝胶复合电极在超轻器件等领域有良好的前景。

参考文献

- [1] Yin, S., Hao, Y., He, X., Zhang, X., Wu, K. and Zhang, Y. (2021) Sodium Sulfate Template-Directed Methodology of Rolling up a Two-Dimensional Graphene Nanosheet into a One-Dimensional Nanoscroll and Its Anode Performance in a Lithium-Ion Battery. *ACS Applied Energy Materials*, **4**, 14640-14648. <https://doi.org/10.1021/acsaem.1c03274>
- [2] Cheng, C., Li, X., Liu, K., Zou, F., Tung, W., Huang, Y., et al. (2019) A High-Performance Lithium-Ion Capacitor with Carbonized NiCo_2O_4 Anode and Vertically-Aligned Carbon Nanoflakes Cathode. *Energy Storage Materials*, **22**, 265-274. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.07.034>
- [3] Lei, H., Tan, S., Ma, L., Liu, Y., Liang, Y., Javed, M.S., et al. (2020) Strongly Coupled NiCo_2O_4 Nanocrystal/MXene Hybrid through in Situ Ni/Co-f Bonds for Efficient Wearable Zn-Air Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 44639-44647. <https://doi.org/10.1021/acsaami.0c11185>
- [4] Mu, G., Mu, D., Wu, B., Ma, C., Bi, J., Zhang, L., et al. (2019) Microsphere-Like $\text{SiO}_2/\text{MXene}$ Hybrid Material Enabling High Performance Anode for Lithium Ion Batteries. *Small*, **16**, Article 1905430. <https://doi.org/10.1002/sml.201905430>
- [5] Wang, Y., Sun, J., Qian, X., Zhang, Y., Yu, L., Niu, R., et al. (2019) 2D/2D Heterostructures of Nickel Molybdate and MXene with Strong Coupled Synergistic Effect Towards Enhanced Supercapacitor Performance. *Journal of Power Sources*, **414**, 540-546. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.01.036>
- [6] Gong, J., Yang, J., Wang, J., Lv, L., Wang, W., Pu, L., et al. (2021) A Dual Nico Metal-Organic Frameworks Derived NiCo_2S_4 Core-Shell Nanorod Arrays as High-Performance Electrodes for Asymmetric Supercapacitors. *Electrochimica Acta*, **374**, Article 137794. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.137794>
- [7] Hou, T., Wang, B., Ma, M., Feng, A., Huang, Z., Zhang, Y., et al. (2020) Preparation of Two-Dimensional Titanium Carbide ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) and NiCo_2O_4 Composites to Achieve Excellent Microwave Absorption Properties. *Composites Part B: Engineering*, **180**, Article 107577. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107577>
- [8] Zhou, Y., Li, C., Li, X., Huo, P. and Wang, H. (2021) Construction of High-Performance Electrode Materials of NiCo_2O_4 Nanoparticles Encapsulated in Ultrathin N-Doped Carbon Nanosheets for Supercapacitors. *Dalton Transactions*, **50**, 1097-1105. <https://doi.org/10.1039/d0dt04011h>
- [9] Shinde, S.K., Yadav, H.M., Ramesh, S., Bathula, C., Maile, N., Ghodake, G.S., et al. (2020) High-Performance Symmetric Supercapacitor; Nanoflower-Like $\text{NiCo}_2\text{O}_4/\text{NiCo}_2\text{O}_4$ Thin Films Synthesized by Simple and Highly Stable Chemical Method. *Journal of Molecular Liquids*, **299**, Article 112119. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112119>
- [10] Lv, L., Gong, J., Wang, W., Zhang, H., Pu, L., Wang, J., et al. (2021) Metal-Organic Frameworks Derived Hierarchical $\text{CoSx}@\text{Ni-Co-O}$ Nanosheet Structures for Supercapacitors with Excellent Charge Storage Properties. *Journal of Alloys and Compounds*, **869**, Article 159310. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159310>
- [11] Zhao, J., Zhou, C., Li, Y., Cheng, K., Zhu, K., Ye, K., et al. (2020) Nickel Cobalt Oxide Nanowires-Modified Hollow Carbon Tubular Bundles for High-Performance Sodium-Ion Hybrid Capacitors. *International Journal of Energy Research*, **44**, 3883-3892. <https://doi.org/10.1002/er.5185>

-
- [12] Ma, F., Dai, X., Jin, J., Tie, N. and Dai, Y. (2020) Hierarchical Core-Shell Hollow CoMoS₄@Ni-Co-S Nanotubes Hybrid Arrays as Advanced Electrode Material for Supercapacitors. *Electrochimica Acta*, **331**, Article 135459. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135459>
- [13] Javed, M.S., Shah, S.S.A., Najam, T., Siyal, S.H., Hussain, S., Saleem, M., *et al.* (2020) Achieving High-Energy Density and Superior Cyclic Stability in Flexible and Lightweight Pseudocapacitor through Synergic Effects of Binder-Free CoGa₂O₄ 2d-Hexagonal Nanoplates. *Nano Energy*, **77**, Article 105276. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105276>
- [14] Shewale, P.S. and Yun, K. (2021) NiCO₂O₄/RGO Hybrid Nanostructures on Surface-Modified Ni Core for Flexible Wire-Shaped Supercapacitor. *Nanomaterials*, **11**, Article 852. <https://doi.org/10.3390/nano11040852>
- [15] Chen, G., Yang, Y., Dai, Y. and Wang, W. (2020) Preparation of High-Capacity Carbon-Coated Nickel Cobaltate Hollow Nanospheres Electrode for Supercapacitors. *International Journal of Electrochemical Science*, **15**, 5342-5351. <https://doi.org/10.20964/2020.06.43>
- [16] Gao, J., Liu, Z., Lin, Y., Tang, Y., Lian, T. and He, Y. (2020) NiCO₂O₄ Nanofeathers Derived from Prussian Blue Analogues with Enhanced Electrochemical Performance for Supercapacitor. *Chemical Engineering Journal*, **388**, Article 124368. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124368>
- [17] Gao, J., Li, S., Wang, H., Zhou, Y., Zhang, L., Liu, Z., *et al.* (2021) Carbon Nanotubes Aerogels Dispersed by Thermal Excitation on Ni Foam@NiCO₂O₄ Nanoneedles with Enhanced Properties for Supercapacitor. *Journal of Alloys and Compounds*, **861**, Article 157963. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157963>
- [18] Verger, L., Xu, C., Natu, V., Cheng, H., Ren, W. and Barsoum, M.W. (2019) Overview of the Synthesis of MXenes and Other Ultrathin 2D Transition Metal Carbides and Nitrides. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, **23**, 149-163. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2019.02.001>
- [19] Alhabeab, M., Maleski, K., Anasori, B., Lelyukh, P., Clark, L., Sin, S., *et al.* (2017) Guidelines for Synthesis and Processing of Two-Dimensional Titanium Carbide (Ti₃C₂T_x MXene). *Chemistry of Materials*, **29**, 7633-7644. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b02847>