

doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2025.06.003

# Co-Ni-Yb 三元纳米片及其电化学性能研究

王 新<sup>1</sup>, 余 芳<sup>1</sup>, 蒋彩云<sup>1</sup>, 马欣怡<sup>2</sup>, 曹媛媛<sup>2</sup>, 陈昌云<sup>2</sup>

(1.江苏经贸职业技术学院健康学院,江苏南京 211168)

(2.南京晓庄学院环境科学学院,江苏南京 211171)

[摘要] 超级电容器是一种具有优异性质的新型储能器件,但能量密度低和成本较高的缺点阻碍其快速发展,开发高性能、低成本的电极材料是解决这些问题的有效途径.本文通过采用溶剂热法成功制备出不同比例的钴镍复合物(Co-Ni),在此基础上加入稀土元素铈(Yb)成功合成 Co-Ni-Yb 三元纳米复合物,用 X 射线衍射(XRD)、透射电镜(TEM)表征其结构和形貌,且对其进行电化学性能测试(循环伏安法、恒电流充放电、稳定性测试).结果显示 Yb 的加入明显缩短离子和电子传递途径,40:20:3 的 Co-Ni-Yb 具有较好的电化学行为和较高的比电容(326.1 F/g).因此,Co-Ni-Yb 三元纳米片的成功合成为其在储能、催化、传感器等领域的应用开辟了道路.

[关键词] 过渡金属氢氧化物, Yb, 溶剂热法, 循环伏安法, 恒电流充放电

[中图分类号] O646.54 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2025)06-0020-08

## Co-Ni-Yb Ternary Nanosheets and Its Electrochemical Properties

Wang Xin<sup>1</sup>, Yu Fang<sup>1</sup>, Jiang Caiyun<sup>1</sup>, Ma Xinyi<sup>2</sup>, Cao Yuanyuan<sup>2</sup>, Chen Changyun<sup>2</sup>

(1.School of Health, Jiangsu Vocational Institute of Commerce, Nanjing 211168, China)

(2.School of Environmental Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China)

**Abstract:** Supercapacitors are a new type of energy storage device with excellent properties, but the disadvantages of low energy density and high cost hinder its development. Therefore, the development of high-performance and low-cost electrode materials is an effective way to solve these problems. In this paper, different ratios of cobalt-nickel complex (Co-Ni) were successfully prepared by solvent-heating method. Subsequently, the rare earth element ytterbium (Yb) was added on this basis to synthesize successfully Co-Ni-Yb ternary nanocrystals. Their structure and morphology were characterized by X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscopy (TEM), and their electrochemical performance tests were performed (cyclic voltammetry, constant-current charge/discharge, and stability test). The results showed that the incorporation of Yb led to a significant reduction in ion and electron transport pathways. It is noteworthy that the Co-Ni-Yb composite with a ration of 40:20:3 demonstrated enhanced electrochemical behavior and a high specific capacitance (326.1 F/g). Therefore, the successful synthesis of Co-Ni-Yb ternary layered nanocrystals opens the way for their applications in energy storage, catalysis, and sensors.

**Key words:** transition metal hydroxide, Yb, solvothermal method, cyclic voltammetry, constant current charge and discharge

近年来,受气候变暖、不可再生化石能源不断消耗等因素的影响,全球能源结构低碳化转型加速推进.国际社会对保障能源安全、保护生态环境、应对气候变化等问题日益重视,许多国家已将可再生能源作为新一代能源技术的战略制高点和经济发展的重要新领域<sup>[1-3]</sup>.在碳达峰、碳中和背景下,风能、太阳能发电等可再生能源装机规模和发电量持续增长,非化石能源消费占比不断提升<sup>[4-5]</sup>.如,能源研究院《世界能源统计年鉴》报道 2022 年可再生电力(不包括水电)增长 14%,太阳能和风能发电量继续快速增长<sup>[6]</sup>.与此同时,伴随着电子设备和电动汽车在全球范围内的加速发展,大力开发环保、新型、可持续的新型储能系统迫在眉睫.超级电容器是一种电容量高、循环寿命长、功率密度高、快速充放电的高效能、绿色环保的电化学储能器件,但存在能量密度低的问题<sup>[7-8]</sup>.

收稿日期:2024-12-15.

基金项目:江苏省高校优秀科技创新团队项目(2021)、江苏省第六期“333 人才”培养资助项目(2022)、江苏省农业自主创新基金项目(CX(23)3045)、江苏经贸职业技术学院“领军人才”项目、2019 年江苏经贸职业技术学院校级重点课题项目(JSJM19).

通讯作者:陈昌云,博士,教授,研究方向:化学测量学及快检仪器开发. E-mail:cychen@njxzc.edu.cn

新型电极材料可以提高超级电容器的能量密度<sup>[9-10]</sup>。过渡金属氢氧化物具有电化学性质优异、价格便宜、结构多样、工艺简单等特点,因此用过渡金属氢氧化物制备电极材料受到广泛关注,尤其是第一行过渡金属的氢氧化物材料储量丰富、价态多元,具有氧化还原活性,已成为当今研究的趋势<sup>[8,11]</sup>。其中,氢氧化钴 $[\text{Co}(\text{OH})_2]$ 、氢氧化镍 $[\text{Ni}(\text{OH})_2]$ 容易获得、制备简单、氧化还原活性位点丰富,且 $\text{Co}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 理论比电容可分别高达 $3\ 650\ \text{F/g}$ 和 $2\ 082\ \text{F/g}$ <sup>[12-14]</sup>。因此,Co和Ni的氢氧化物是近年来最有望代替贵金属的赝电容电极材料。但是,由于其微观结构不稳定,导致所制备的电极材料的电导率、循环稳定性和倍率性能均较差。研究发现镧系过渡金属允许更快的电子和质子转移,可以增强其复合材料的离子和电子电导率等<sup>[15-16]</sup>。除此之外,镧系元素的添加也可以显著影响复合材料的结构、厚度和电化学性能。如,Zhu等<sup>[17]</sup>将镱(Yb)引入 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 中,获得了较薄的 $\text{Ni}_4\text{Yb}(\text{OH})_{10}\text{NO}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 六方纳米片,用于超级电容器电极材料时纳米片表现出比原始 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 高3倍以上的容量。因此,镧系过渡金属添加于复合材料中用于电化学能量存储器可以增加其容量。

本研究采用溶剂热法首先合成不同比例的Co-Ni层状纳米片,并采用循环伏安、恒电流充放电等测试方法对其电化学性能进行了评价,确定最佳Co、Ni比后,在该Co-Ni复合材料中掺杂镧系元素Yb,制备出了Co-Ni-Yb三元层状纳米复合材料。通过对该复合材料的电化学性能和稳定性评价,确定复合材料中Co-Ni-Yb的最佳比例,从而得到一种高比电容和稳定性的储能材料。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂

乙酸钴 $[\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ ,纯度 $>99\%$ 、乙酸镍 $(\text{C}_4\text{H}_6\text{NiO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O})$ ,纯度 $>99\%$ 、硝酸镱 $[\text{Yb}(\text{NO}_3)_6\cdot 5\text{H}_2\text{O}]$ ,纯度 $>99.99\%$ 、油酸、十八碳烯、十二胺、无水乙醇、正庚烷、异丙醇、氢氧化钾均为分析纯(AR),购买于国药集团化学试剂有限公司。泡沫镍(Ni foam,纯度 $>98\%$ )购买于昆山广嘉源新材料有限公司,导电剂乙炔黑(焦作产,电池级)、超级电容炭(电池级)、聚四氟乙烯(PTFE,分散乳液)购于中昊晨光化工研究院有限公司。

### 1.2 仪器

电子天平(AR124CN),奥豪斯仪器有限公司(常州,中国);电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9202-2A),真空干燥箱(DZF-6021),常州润华电器有限公司(常州,中国);离心机(TG16W),长沙湘智离心机仪器有限公司(长沙,中国);电化学工作站(CHI660D),上海辰华仪器公司(上海,中国);透射电子显微镜(JEM200CX),日本JEOL公司(东京,日本)。

### 1.3 Co-Ni的合成方法

室温下,称取一定比例的 $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ,10 mL十八碳烯,5 mL十二胺,5 mL油酸倒入反应釜中,搅拌15 min使其充分混合,180 °C下反应18 h。待反应结束后打开反应釜,加入适量无水乙醇-正庚烷(体积比1:1)分散,离心分离固体。将固体洗涤后得到产物Co-Ni,在真空干燥箱里真空干燥过夜后,收集产品以待进一步使用。

### 1.4 Co-Ni-Yb的合成方法

按照Co:Ni最佳比例为2:1的制备条件添加Yb,制备流程见图1。合成产物Co-Ni-Yb的比例为40:20:1、

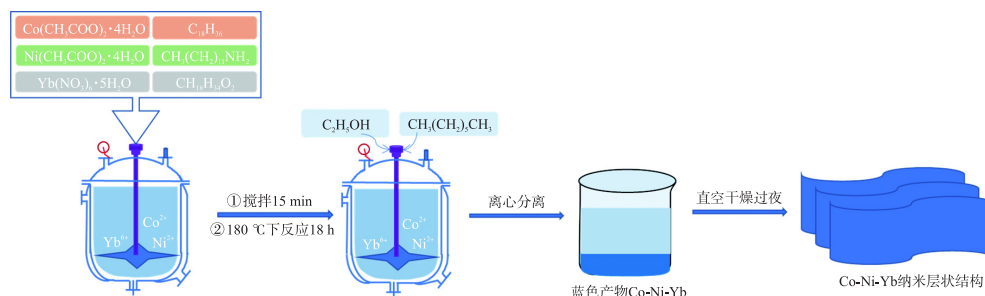


图1 Co-Ni-Yb纳米层状结构制备流程图

Fig. 1 Preparation flow chart of Co-Ni-Yb nanolayer structure

40:20:2, 40:20:3, 40:20:4. 具体制备过程如下: 室温下, 称取一定比例的  $\text{Co}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Yb}(\text{NO}_3)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 10 mL 十八碳烯, 5 mL 十二胺, 5 mL 油酸倒入反应釜中, 搅拌 15 min 使其充分混合, 180 °C 下反应 18 h. 待反应结束后打开反应釜, 加入适量无水乙醇-正庚烷(体积比 1:1)分散, 离心分离固体. 将固体洗涤后得到蓝色产物 Co-Ni-Yb, 在真空干燥箱里真空干燥过夜后, 收集产品以待进一步使用.

### 1.5 电极处理

正极: 泡沫镍剪成 1 cm×5 cm 的长方形, 先用水超声清洗, 再用乙醇超声清洗, 最后烘干. 取 40 mg 的样品 (Co-Ni, Co-Ni-Yb), 7.5 mg 的乙炔黑, 研磨 15 min. 然后加入 3 mL 异丙醇, 接着研磨 15 min. 最后加入 2 滴 PTFE(10%)乳液, 搅拌后滴在事先处理的泡沫镍表面, 50 °C 烘干 2 h 待用.

负极: 取 40 mg 的超级电容碳、7.5 mg 的乙炔黑, 研磨 15 min. 然后加入 3 mL 异丙醇, 接着研磨 15 min. 最后加入 2 滴 PTFE(10%)乳液, 搅拌后滴在事先处理的泡沫镍表面, 50 °C 烘干 2 h 待用.

将处理好的泡沫镍插入 3 mol/L 的氢氧化钾溶液中进行电化学测试(循环伏安法、恒电流充放电、稳定性测试).

### 1.6 电化学测试

Co-Ni-Yb 纳米晶的电化学性能是在二电极体系下通过 CHI660D 型化学工作站测试完成的(循环伏安法、恒电流充放电、稳定性测试).

循环伏安法<sup>[18]</sup>的测试条件: 电压范围: 0~1.5 V; 扫描速度: 10~50 mV/s.

恒电流充放电<sup>[19]</sup>的测试条件: 电压范围: 0~1.5 V; 电流密度: 0.5~5 A/g. 比电容的计算公式如下:

$$C = \frac{I\Delta t}{m\Delta V}, \quad (1)$$

式中,  $m$  为活性物质质量(g),  $\Delta t$  为放电时间(s),  $\Delta V$  为放电电势(V),  $I$  为放电电流(A).

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合材料的结构表征

通过透射电子显微镜(TEM)对 2:1 Co-Ni 和 40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料的形貌和层次结构进行了表征, 结果如图 2. 由图 2(a) 可以看出 Co-Ni 具有层状结构, 2(c) 中 Co-Ni-Yb 同样为层状纳米片, 形状规则. 图 2(b, d) 可以分别估算出纳米片的厚度, 2:1 Co-Ni 复合材料纳米片厚度为 ~100 nm, 40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料纳米片的厚度为 ~70 nm. 这可能是由于稀土元素 Yb 的加入可以使 Co-Ni 纳米片更薄, 从而

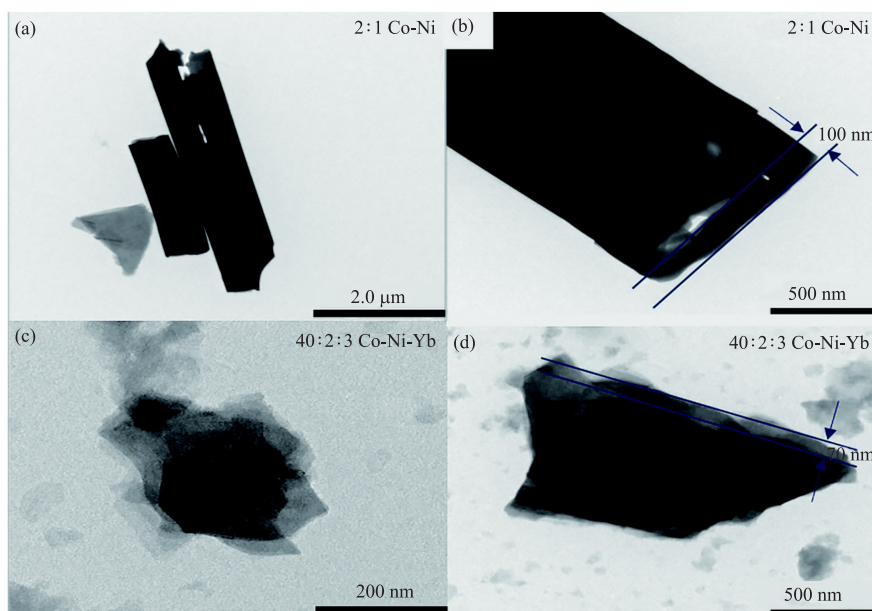


图 2 2:1 Co-Ni 复合材料和 40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料的 TEM 图

Fig. 2 TEM of 2:1 Co-Ni and 40:20:3 Co-Ni-Yb composites

显著缩短离子和电子的传递途径<sup>[16]</sup>,这可能是 Co-Ni-Yb 复合材料电化学性能优于 Co-Ni 的主要原因。

通过 X 射线衍射(XRD)对 40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料组成进行表征,结果见图 3。由图 3 可知,40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料的衍射峰主要由 CoOOH (PDF #26-1107)、Ni(OH)<sub>2</sub>·0.75H<sub>2</sub>O (PDF#38-0715) 和 YbOOH (PDF#19-1432) 构成,表明该材料主要为氢氧化物和碱式氧化物,具有较好的电化学储能潜力,且尖锐的衍射峰表明该材料结晶性较好。对 40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料进行电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测试,可知 Co、Ni 和 Yb 元素含量分别为 18.88%、8.249% 和 0.452%。

## 2.2 Co-Ni 复合材料的电化学性能测试

常温下,把制备好的不同比例 Co-Ni 复合材料插入 3 mol/L 的氢氧化钾溶液中进行循环伏安测试(CV),结果见图 4。根据循环伏安图,可以得出以下结论:电流随着扫速的增加而增加,展现出良好的充放电效应;CV 曲线所围成的面积随着扫速的增加而逐渐变大,且曲线的形状变化较小,表明该物质具有良好的电容特征和良好的可逆性能。不同扫速、不同比例 Co-Ni 复合材料 CV 曲线所围成的面积结果见图 4(d)所示。由图 4(d)可以看出,扫速为 10~50 mV/s 时,2:1 Co-Ni 复合材料的有效面积远远大于 1:2、3:1 Co-Ni 复合材料,如:扫速为 50 mV/s 时,2:1 Co-Ni 复合材料的有效面积分别是 1:2、3:1 Co-Ni 复合材料的有效面积 3.26 倍、2.17 倍,说明 2:1 Co-Ni 复合材料的电化学性能最好。

随后,将不同比例的 Co-Ni 复合材料放在氢氧化钾中进行恒电流充放电测试,结果见图 5。根据恒电流充放电图,可以得出以下结论:电压随着时间的增加呈现先上升后下降的趋势从而形成两个平台,即表明其比电容来自于法拉第赝电容反应。根据公式(1)进行计算得到不同组成的 Co-Ni 复合材料比电容大小,其对比的结果见图 5(d)。由图 5(d)可以看出,2:1 Co-Ni 复合材料的比电容远远大于 1:2、3:1 Co-Ni 复合材料的比电容,如:当电流密度为 0.5 A/g 时,2:1 Co-Ni 复合材料比电容分别是 1:2、3:1 Co-Ni 复合

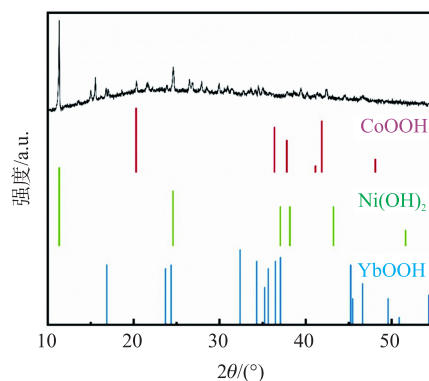


图 3 40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料的 XRD 图  
Fig. 3 XRD of 40:20:3 Co-Ni-Yb composites

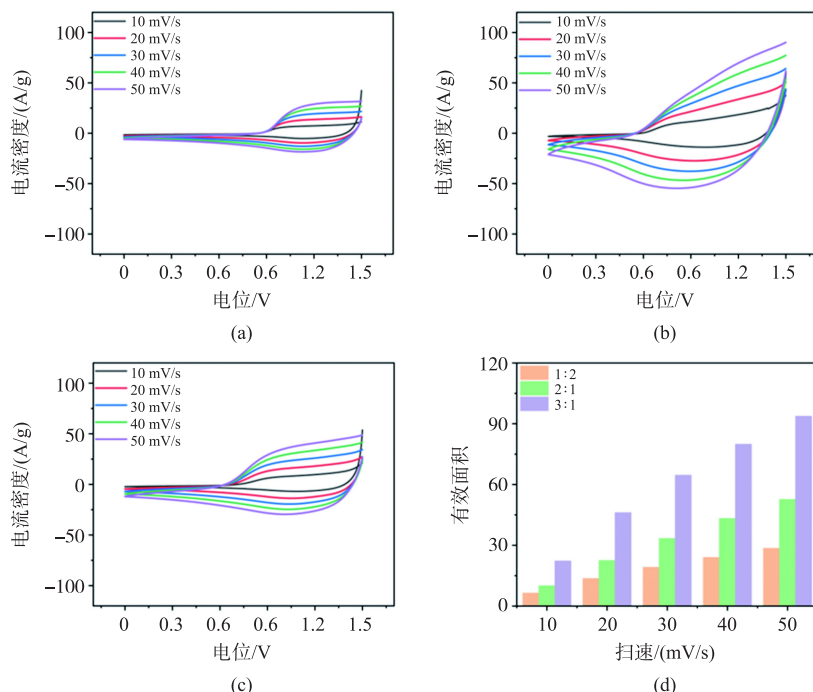


图 4 (a)1:2 Co-Ni 复合材料循环伏安图;(b)2:1 Co-Ni 复合材料循环伏安图;(c)3:1 Co-Ni 复合材料循环伏安图;  
(d)不同比例 Co-Ni 复合材料有效面积对比图

Fig. 4 (a)Cyclic voltammetry of 1:2 Co-Ni composites;(b)Cyclic voltammetry of 2:1 Co-Ni composites;(c)Cyclic voltammetry of 3:1 Co-Ni composites;(d)Companison of absolute areas of Co-Ni composites with different proportions

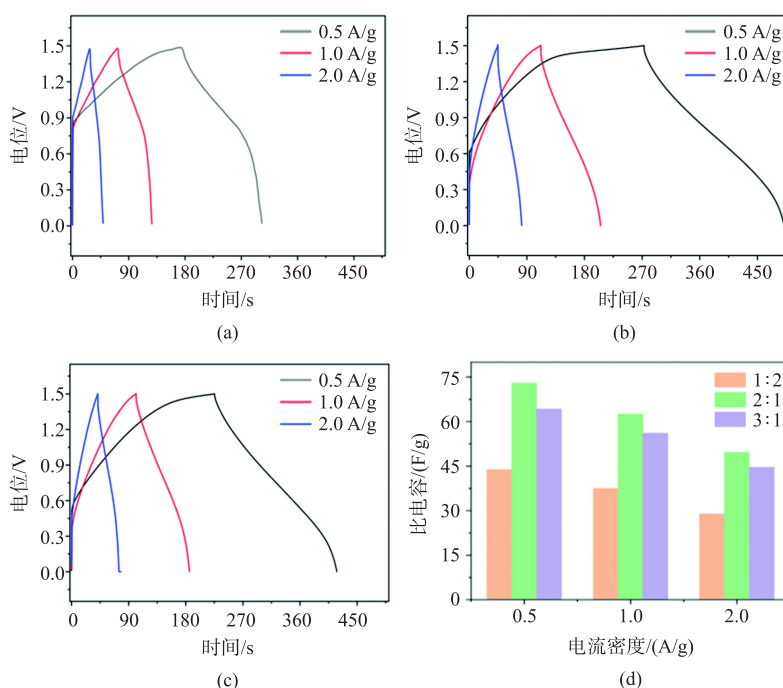


图 5 (a) 1:2 Co-Ni 复合材料恒电流充放电图; (b) 2:1 Co-Ni 复合材料恒电流充放电图; (c) 3:1 Co-Ni 复合材料恒电流充放电图; (d) 不同比例 Co-Ni 复合材料比电容对比图

Fig. 5 (a) Constant current charge-discharge diagram of 1:2 Co-Ni composite; (b) Constant current charge-discharge diagram of 2:1 Co-Ni composite; (c) Constant current charge-discharge diagram of 3:1 Co-Ni composite; (d) Comparison of specific capacitance of Co-Ni composites with different proportions

材料比电容的 1.67 倍、1.14 倍,该结果进一步证实了 2:1 Co-Ni 复合材料的电化学性能最好。因此,我们选择了 Co-Ni 比例为 2:1 的复合材料来掺杂镧系元素 Yb。

### 2.3 Co-Ni-Yb 复合材料的电化学性能测试

常温下,把已制备好的 40:20:1、40:20:2、40:20:3、40:20:4 Co-Ni-Yb 复合材料插入 3 mol/L 的氢氧化钾溶液中进行循环伏安测试(CV),结果见图 6。根据循环伏安图,可以得出以下结论:电流随着扫速的

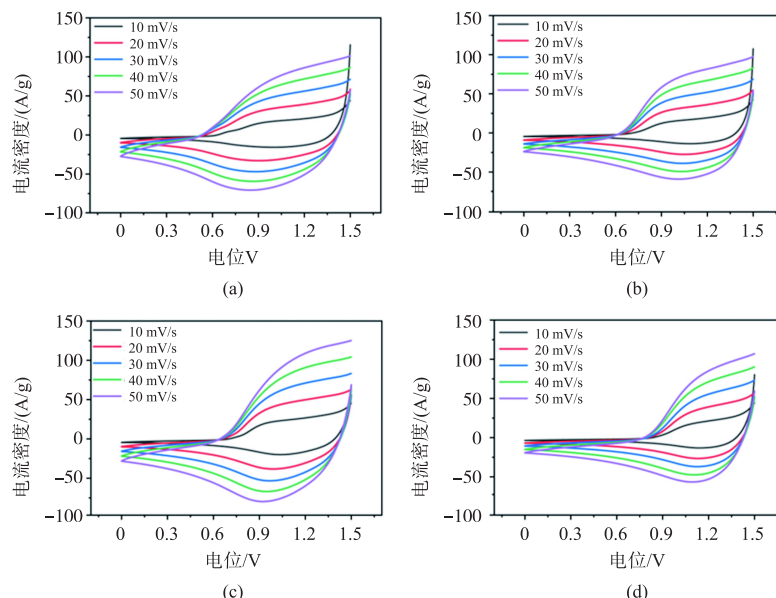


图 6 (a) 40:20:1 Co-Ni-Yb 复合材料循环伏安图; (b) 40:20:2 Co-Ni-Yb 复合材料循环伏安图; (c) 40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料循环伏安图; (d) 40:20:4 Co-Ni-Yb 复合材料循环伏安图

Fig. 6 (a) Cyclic voltammetry of 40:20:1 Co-Ni-Yb composites; (b) Cyclic voltammetry of 40:20:2 Co-Ni-Yb composites; (c) Cyclic voltammetry of 40:20:3 Co-Ni-Yb composites; (d) Cyclic voltammetry of 40:20:4 Co-Ni-Yb composites

增加而增加,展现出良好的充放电效应;CV 曲线所围成的面积随着扫速的增加而逐渐变大,且曲线的形状变化较小,即表明该物质具有良好的电容特征和良好的可逆性能. 不同扫速、不同比例 Co-Ni-Yb 复合材料 CV 曲线所围成的面积不同,图中可以看出,扫速为 10~50 mV/s 时,40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料的有效面积大于 40:20:1、40:20:2、40:20:4 Co-Ni-Yb 复合材料,如:扫速为 50 mV/s 时,40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料的有效面积分别是 40:20:1、40:20:2、40:20:4 Co-Ni-Yb 复合材料有效面积的 1.08 倍、1.26 倍、1.49 倍,说明 40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料的电化学性能最好.

随后,将上述不同比例的 Co-Ni-Yb 复合材料放在氢氧化钾溶液中进行恒电流充放电测试,结果见图 7. 根据恒电流充放电图,可以得出以下结论:电压随着时间的增加呈现先上升后下降的趋势从而形成两个平台,即表明其比电容来自于法拉第赝电容反应. 根据公式(1)进行计算得到不同组成的 Co-Ni-Yb 复合材料比电容大小(见表 1). 相等电流密度下,40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料比电容比其他比例的都要大一些,如:当电流密度为 0.5 A/g 时,40:20:3 复合材料比电容是其它三种复合材料的 2.38 倍、3.38 倍、1.67 倍,该结果进一步证实了 40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料的电化学性能最好.

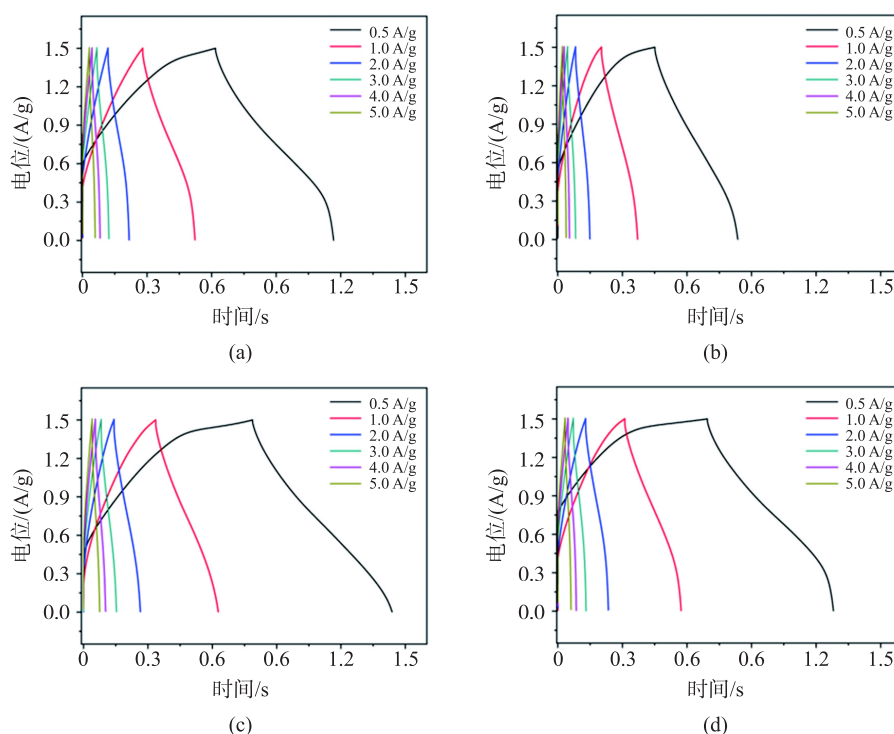


图 7 (a) 40:20:1 Co-Ni-Yb 复合材料恒电流充放电图;(b) 40:20:2 Co-Ni-Yb 复合材料恒电流充放电图;  
(c) 40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料恒电流充放电图;(d) 40:20:4 Co-Ni-Yb 复合材料恒电流充放电图

Fig. 7 (a) Galvanostatic charge-discharge diagram of 40:20:1 Co-Ni-Yb composite; (b) Galvanostatic charge-discharge diagram of 40:20:2 Co-Ni-Yb composite; (c) Galvanostatic charge-discharge diagram of 40:20:3 Co-Ni-Yb composite; (d) Galvanostatic charge-discharge diagram of 40:20:4 Co-Ni-Yb composite

表 1 不同比例 Ni-Co-Yb 复合材料的比电容

Table 1 Specific capacitance of Ni-Co-Ni-Yb composites with different ratios

Co:Ni:Yb	电流密度/(A/g)					
	0.5	1	2	3	4	5
40:20:1	136.9	121.5	100.1	87	72.0	69.6
40:20:2	96.4	84.0	66.0	54	51.0	45.0
40:20:3	326.1	291.9	247.8	216	192.0	180.0
40:20:4	195.2	162.6	136.0	120	101.2	93.4

通过对比发现,当扫速为 10~50 mV/s,40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料闭合部分有效面积是 2:1 Co-Ni 复合材料闭合部分有效面积的 1.17 倍、1.28 倍、1.22 倍、1.20 倍和 1.17 倍(图 8(a)). 此外,发现镧系元素 Yb 的加入使得 Co-Ni-Yb 复合材料的比电容较 Co-Ni 复合材料得到明显提高,当电流密度分别为 0.5 A/g、1 A/g、

2 A/g 时,40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料的比电容是 2:1 Co-Ni 复合材料比电容的 4.47 倍、44.67 倍和 44.99 倍(图 8(b)),该结果进一步证明了镧系元素 Yb 的加入可提高 Co-Ni 复合材料的电化学性能。

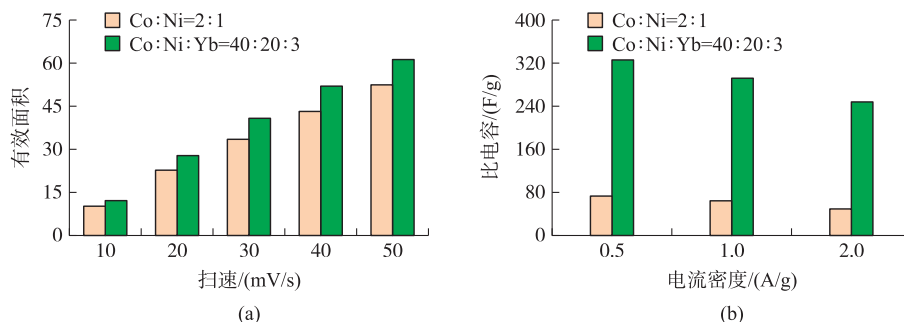


图 8 (a)2:1 Co-Ni 复合材料与 40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料的闭合面积对比图;(b)2:1 Co-Ni 材料与 40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料比电容对比图

Fig. 8 (a) Comparison of the absolute area of 2:1 Co-Ni composite and 40:20:3 Co-Ni-Yb composites; (b) Comparison of specific capacitance between 2:1 Co-Ni composite and 40:20:3 Co-Ni-Yb composites

根据表 1 中比电容数据,选用比电容最大的 40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料进行稳定性测试,结果见图 9. 根据循环稳定性图,得出以下结论:在 0.5 A/g 的电流密度下经过 2 000 次恒电流充放电后,比电容仍然可以达到 245.1 F/g,优于其他文献报道的一些储能电极材料<sup>[20-22]</sup>,且比电容保持率为 75.2%,说明组成为 40:20:3 的 Co-Ni-Yb 复合材料具有良好的稳定性. 鉴于其优异的电化学行为和良好的稳定性,40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料可以作为一种优异的电极材料。

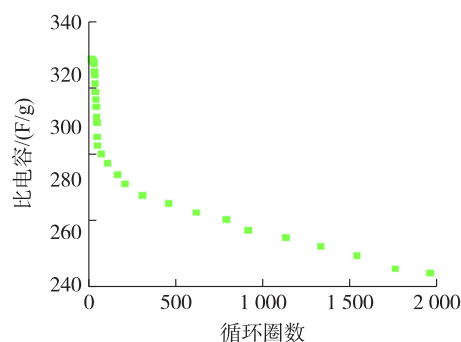


图 9 40:20:3 Co-Ni-Yb 复合材料的循环稳定性测试图  
Fig. 9 Cyclic stability of 40:20:3 Co-Ni-Yb composites

### 3 结论

综上所述,通过控制 Co-Ni 的比例得到比电容最高的 Co-Ni 复合材料,再采用溶剂热法掺杂稀土元素 Yb 成功合成 Co-Ni-Yb 纳米片复合材料;Co-Ni 的复合材料保证丰富的氧化还原活性位点产生的高比电容,Yb 的加入使复合纳米材料层更薄,形状规则;此外,加入 Yb 显著缩短离子和电子传递途径,提高其电化学性能. 40:20:3 的 Co-Ni-Yb 复合材料具有良好的氧化还原活性,在 0.5 A/g 时比容量达到 326.1 F/g;Co-Ni-Yb 层状纳米晶复合材料性能稳定,40:20:3 的 Co-Ni-Yb 复合材料在 2000 次循环后的比电容为 245.1 F/g. 因此,该电极材料可应用于储能、催化、传感器等领域,这项工作将为开发其他复合型电化学储能电极材料提供了灵感。

#### [参考文献]

[1] 章姝,马培博,郑馨竺,等. 绿色低碳转型背景下能源安全评估体系重构与启示[J]. 中国工程科学,2024,26(4):28-39.  
 [2] 赵文智,梁坤,李志欣,等. 从能源大国到能源强国:国际经验与中国路径[J]. 中国工程科学,2024,26(4):9-16.  
 [3] ZHU Y, WU S, LI J, et al. Towards a carbon-neutral community: integrated renewable energy systems(IRES)-sources, storage, optimization, challenges, strategies and opportunities[J]. Journal of energy storage, 2024, 83(1):110663.  
 [4] ZOU C, ZHAO Q, ZHANG G, et al. Energy revolution: from a fossil energy era to a new energy era[J]. Natural gas industry B, 2016, 3(1):1-11.  
 [5] 林卫斌,吴嘉仪. 碳中和愿景下中国能源转型的三大趋势[J]. 价格理论与实践,2021(7):21-23,114.  
 [6] 马晓敏. 《世界能源统计年鉴 2023》中文编译版发布[N]. 中国矿业报,2023-11-23(2).  
 [7] CAO Y, SUN S J, LI W Y, et al. Challenge and technological trends of flexible solid-state supercapacitors[J]. Journal of energy storage, 2024, 97:112837.  
 [8] GAIKWAD P, TIWARI N, KAMAT R, et al. A comprehensive review on the progress of transition metal oxides materials as a supercapacitor electrode[J]. Materials science and engineering: B, 2024, 307:117544.  
 [9] GIRIRAJAN M, BOJARAJAN A K, PULIDINDI I N, et al. An insight into the nanoarchitecture of electrode materials on the

- performance of supercapacitors[J]. *Coordination chemistry reviews*,2024,518:216080.
- [10] WANG Y M. Nanowire materials for supercapacitor electrode: preparation, performance and prospects[J]. *Journal of energy storage*,2024,97:112848.
- [11] HUANG R,XIE Y B. Matching Faradaic reaction of multi-transition metal compounds as supercapacitor electrode materials: a review[J]. *Journal of alloys and compounds*,2024,1002:175367.
- [12] 李彦杰,梁健志,翟泰霖,等. 沉淀剂对纳米氢氧化钴形貌结构及电化学性能的影响[J]. *桂林理工大学学报*,2019,39(4):944-948.
- [13] MONDAL C,GANGULY M,MANNA P, et al. Fabrication of porous  $\beta$ -Co(OH)<sub>2</sub> architecture at room temperature: a high performance supercapacitor[J]. *Langmuir*,2013,29(6):9179-9187.
- [14] 陈景阳. 镍钴基氢氧化物复合材料的制备及其电化学性能研究[D]. 吉林:东北电力大学,2023.
- [15] WEI M R,CHE W,LI H Z, et al. CeO<sub>2</sub> quantum dots doped Ni-Co hydroxide nanosheets for ultrahigh energy density asymmetric supercapacitors[J]. *Applied surface science*,2019,484:551-559.
- [16] DUAN H Y,SHI M,ZHANG M F. Lanthanum oxide nickel hydroxide composite triangle nanosheets for energy density asymmetric supercapacitors[J]. *Frontiers in chemistry*,2021,9:783942.
- [17] ZHU R,DUAN H,ZHAO Z, et al. Recent progress of dimensionally designed electrode nanomaterials in aqueous electrochemical energy storage[J]. *Journal of materials chemistry A*,2021,9:9535-9572.
- [18] ELGRISHI N,ROUNTREE K J,MCCARTHY B D, et al. A practical beginner's guide to cyclic voltammetry[J]. *Journal of chemical education*,2018,95,197-206.
- [19] MOLINA A,GONZALEZ J. Cyclic reciprocal derivative chronopotentiometry with power time currents applied to electrodes coated with electroactive molecular films[J]. *Influence of the reversibility*[J]. *Langmuir*,2003,19:406-415.
- [20] LI G,CAI H,LI X. Construction of hierarchical NiCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@ Ni-MOF hybrid arrays on carbon cloth as superior battery-type electrodes for flexible solid-state hybrid supercapacitors[J]. *ACS applied materials & interfaces*,2019,11(41):37675-37684.
- [21] GOVINDAN R,HONG X,SATHISHKUMAR P, et al. Construction of metal-organic framework-derived CeO<sub>2</sub>/C integrated MoS<sub>2</sub> hybrid for high-performance asymmetric supercapacitor[J]. *Electrochimica acta*,2020,353:136502.
- [22] LIU Y,WANG Y,CHEN Y, et al. NiCo-MOF nanosheets wrapping polypyrrole nanotubes for high-performance supercapacitors[J]. *Applied surface science*,2020,507:145089.

[责任编辑:杜忆忱]