

# 非晶态高熵电极材料的制备及 电化学性能研究

庞青, 刘博宇, 王腾飞, 望红玉\*  
(青海大学机械工程学院, 青海 西宁 810016)

**摘要:**为探究高熵非晶态电极材料的电化学性能,通过电化学沉积法在泡沫镍上沉积非晶态高熵电极材料并进行电化学测试。结果表明,随着沉积元素种类的增多,其面积比电容逐渐增大,但是循环性能以及电压窗口逐步下降。其中沉积元素为 NiCoFeCrAl 时的样品综合电化学性能最好。当电流密度为  $2 \text{ mA/cm}^2$  时,比电容为  $3108.47 \text{ mF/cm}^2$ 。经过 1 000 圈循环充放电后,该电极材料的容量保持率为 51.42%。以 NiCoFeCrAl/NF 为正极,活性炭为负极匹配组装的非对称超级电容器,当功率密度为  $750 \text{ W/kg}$  时,能量密度为  $19.53 \text{ W}\cdot\text{h/kg}$ 。

**关键词:**超级电容器;非晶态;高熵;NiCoFeCrAl/NF;电化学性能

中图分类号:TK02

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)07-0180-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.07.029

## Preparation and electrochemical properties of amorphous high-entropy electrode materials

PANG Qing, LIU Bo-yu, WANG Teng-fei, WANG Hong-yu\*

(College of Mechanical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China)

**Abstract:** Amorphous high-entropy electrode materials are deposited on nickel foam through electrochemical deposition method to explore their electrochemical properties. The results show that with the increase of the types of elements deposited, the area specific capacitance of the materials increases gradually, but their cycle performance and voltage window decline gradually. The sample with NiCoFeCrAl as deposited elements has the best comprehensive electrochemical performance. The specific capacitance of the material is  $3108.47 \text{ mF/cm}^2$  when the current density is  $2 \text{ mA/cm}^2$ . After 1 000 cycles of charge and discharge, the capacity retention rate of the electrode materials is 51.42%. At a power density of  $750 \text{ W/kg}$ , the asymmetric supercapacitor that is assembled with NiCoFeCrAl/NF as the positive electrode and activated carbon as the negative electrode has a energy density of  $19.53 \text{ Wh/kg}$ .

**Key words:** supercapacitor; amorphous; high-entropy; NiCoFeCrAl/NF; electrochemical performance

近年来随着能源短缺、环境污染等问题的出现,社会对清洁可再生能源以及高性能储能器件的需求与日俱增<sup>[1-3]</sup>。超级电容器因其具有较快的充放电速度、较长的循环寿命、成本低、工作环境要求低等优点,受到社会的广泛关注<sup>[4-5]</sup>。能量密度与电极材料的电化学性能息息相关<sup>[6]</sup>。

根据结构可将电极材料分为晶态电极材料与非晶态电极材料。非晶态电极材料因其无序的结构与存在较多的缺陷,从而具有较多的活性位点以及较快的离子传输通道<sup>[7-8]</sup>,因此非晶态电极材料成为当前研究热点。Joseph 等<sup>[9]</sup>通过控制温度来制备非晶态  $\text{ZrO}_2$  纳米棒与晶态  $\text{ZrO}_2$  纳米片。结果表明,

当电流密度为  $2 \text{ A/g}$  时,非晶态  $\text{ZrO}_2$  的比电容为  $1406 \text{ C/g}$ ,而晶态  $\text{ZrO}_2$  的比电容为  $799 \text{ C/g}$ ;当电流密度增加到  $25 \text{ A/g}$  时,非晶态  $\text{ZrO}_2$  的倍率性能为 55%,当晶态  $\text{ZrO}_2$  电流密度增加到  $15 \text{ A/g}$  时,其倍率性能为 47%。可以看出,非晶态电极材料相比于晶态具有较大的比电容、较长的循环寿命。

然而,非晶态一元过渡金属电极材料电导率偏低,比电容不理想<sup>[10-11]</sup>,从而限制了其在超级电容器领域的应用。许多研究者通过制备非晶态多元过渡金属电极材料来改善其电化学性能。例如,Zhang 等<sup>[12]</sup>通过电化学沉积法制备 NiCoP 非晶态纳米片。结果表明,当电流密度为  $2 \text{ A/g}$  时,该电极材料的比

收稿日期:2024-10-11;修回日期:2025-05-03

基金项目:青海省应用基础研究计划项目(2024-ZJ-761)

作者简介:庞青(2001-),女,硕士生,研究方向超级电容器,13897430187@163.com;望红玉(1988-),男,博士,教授,研究方向为吸波材料的设计与研究、纳米材料的制备和表征、超级电容器的制备,通讯联系人,HYuWang26@163.com。

电容为 3 401.3 F/g。当电流密度增加到 30 A/g 时,其倍率性能为 76%。经过 2 000 次循环充放电后,其容量保持率为 81.3%。Lv 等<sup>[13]</sup>探索了  $\text{NiV}_x\text{O}_y$ 、 $\text{CoV}_x\text{O}_y$ 、 $\text{NiCo}_2\text{V}_x\text{O}_y$ (NCOV) 的电化学性能。结果表明 NCOV 非晶态三元过渡金属氧化物的电化学性能最佳,在 2 A/g 时的比电容为 1 449.3 F/g。该电极经过 2 000 次充放电循环后的电容保持率为初始值的 91.4%。非晶态多元过渡金属电极材料由于各元素之间的协同作用,从而被应用于催化<sup>[14]</sup>、电化学<sup>[15]</sup>、吸附<sup>[16]</sup>等领域,但是在超级电容器领域研究较少。

本文在非晶态多元过渡金属电极材料的基础上制备非晶态高熵电极材料,通过电化学沉积法在泡沫镍(NF)上沉积 NiCoFeCr、NiCoFeCrAl、NiCoFeCrAlMg、NiCoFeCrAlMgZn 4 种非晶态高熵电极材料,并探究随着沉积元素种类的增多其电化学性能的变化规律。并且结合不同表征手段对电极材料的结构、形貌、表面化学状态和电化学性能进行分析,从而探究其储能机理。

## 1 实验部分

### 1.1 材料与试剂

NF 购自常德力源材料公司;HCl、无水乙醇、硝酸钴  $[\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ 、硝酸铁  $[\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}]$ 、硝酸铬  $[\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}]$ 、硝酸镁  $[\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$  购自国药集团化学试剂有限公司;KOH 购自上海麦克林生化科技股份有限公司;硝酸镍  $[\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$  购自上海山浦化工有限公司;硝酸铝  $[\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}]$  购自天津市大茂化学试剂厂;硝酸锌  $[\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$  购自天津欧博凯化工有限公司。硝酸盐试剂均为分析纯,实验用水均为去离子水。

### 1.2 样品制备

#### 1.2.1 NF 的预处理

首先,将 NF 依次浸泡在 3 mol/L 的 HCl、乙醇和去离子水溶液中,分别进行超声处理 5 min。然后,在 60℃ 下干燥 12 h,自然冷却至室温。

#### 1.2.2 电极材料的制备

将物质的量均为 1 mmol 的  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  溶于 50 mL 去离子水中,形成 NiCoFeCr、NiCoFeCrAl、NiCoFeCrAlMg、NiCoFeCrAlMgZn 4 种均匀的电沉积溶液。

采用三电极体系在电化学工作站上进行循环伏安(CV)扫描,其中三电极系统分别以 Ag/AgCl 电极、铂电极和预处理后的 NF 电极作为参比电极、对电极和工作电极。在 1 cm×2 cm 的 NF 上进行 10 次 CV 扫描(扫描速率为 5 mV/s,电压范围为 1.2~0.2 V),得到 NiCoFeCr/NF、NiCoFeCrAl/NF、NiCoFeCrAlMg/NF、NiCoFeCrAlMgZn/NF 4 种电极材料。然后用去离子水与无水乙醇清洗所得电极材料,并在 60℃ 下干燥 12 h,自然冷却至室温。

### 1.3 样品表征

用 X 射线衍射仪(XRD,D-max2500PC)对材料进行结构表征,电压为 40 kV,电流为 200 mA,扫描角度范围为 30°~90°。采用场发射扫描电子显微镜(SEM,JSM-7900F,2 kV)和透射电子显微镜(TEM,JM-2100F)对样品的微观形貌进行表征。X 射线光电子能谱(XPS,Thermofisher Nexsa,12 kV,6 mA)用于检测样品表面化学成分与离子价态。

### 1.4 电化学测试

#### 1.4.1 三电极测试

在上海辰华生产的 CHI760E 电化学工作站上进行 CV、恒电流充放电(GCD)、电化学阻抗(EIS)测试以及循环充放电,来表征非晶态高熵电极材料的电学性能。电极材料的电化学测试与评估是在三电极系统中获得,该系统采用铂片电极作为对电极、饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极、沉积的非晶态高熵电极材料为工作电极,6 mol/L KOH 水溶液作为电解液。电极材料的比电容由式(1)、式(2)计算:

$$C_a = (\Delta t) / (A \Delta V) \quad (1)$$

$$C_m = (\Delta t) / (m \Delta V) \quad (2)$$

其中: $C_a$ (mF/cm<sup>2</sup>)、 $C_m$ (F/g)分别为电极的面积比电容与质量比电容; $I$ (A)、 $\Delta t$ (s)、 $m$ (g)和  $\Delta V$ (V)分别为恒定电流、放电时间、活性材料负载质量和与放电曲线相关的有效电位窗口。

#### 1.4.2 两电极测试

两电极测试系统是用于正、负两电极材料匹配组装器件后的电化学测试方法。以非晶态高熵材料作为正极材料、活性炭(AC)为负极、聚乙二醇(PVA)/KOH 充当固态电解质和隔膜,匹配组装超级电容器。PVA/KOH 是将 1 g KOH 和 1 g PVA 在 90℃ 下添加到 20 mL 去离子水中,以获得澄清凝胶状电解质。AC 电极材料是由 AC、乙炔黑和 PVDF 按 8:1:1 的质量比涂敷在 NF 上制备而成。为了充分激发正极电极材料和负极电极材料的电容贡

献,通过式(3)对两个电极中存储的电荷进行电容平衡:

$$C_+ m_+ = C_- m_- \quad (3)$$

其中: $C_+$ 和 $C_-$ 分别为正极和负极的比容量, $F/g$ ;  $m_+$ 和 $m_-$ 分别为正极和负极活性物质的质量, $g$ 。

匹配组装后的超级电容器的能量密度( $E, W \cdot h/kg$ )和功率密度( $P, W/kg$ )由式(4)、式(5)计算:

$$E = (1/7.2)C(\Delta V)^2 \quad (4)$$

$$P = 3600(E/\Delta t) \quad (5)$$

其中: $C$ 为超级电容器的比电容, $F/g$ ;  $\Delta V$ 为有效电位窗口, $V$ ;  $\Delta t$ 为放电时间, $s$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表征

通过简单的电化学沉积技术实现非晶态高熵电极材料的制备。其中 NiCoFeCr/NF、NiCoFeCrAl/NF、NiCoFeCrAlMg/NF、NiCoFeCrAlMgZn/NF 4 种电极材料的负载量分别为 9、11、13、16  $mg/cm^2$ , 可以看到,活性物质负载量随着沉积元素种类的增多而增大。

为了证明制备的电极材料为非晶态,进行了 XRD 与 TEM 测试。图 1(a)为 4 种电极材料的 XRD 图谱。其中 44.43、51.77、76.26°处的衍射峰

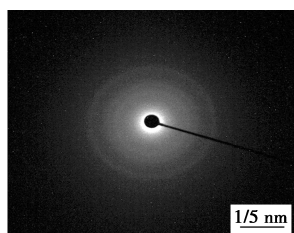
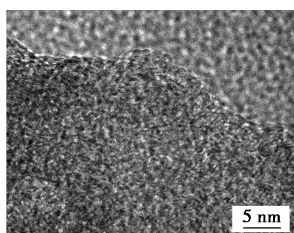
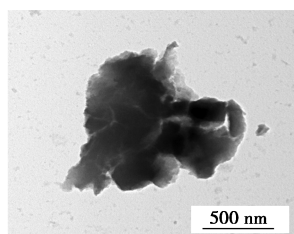
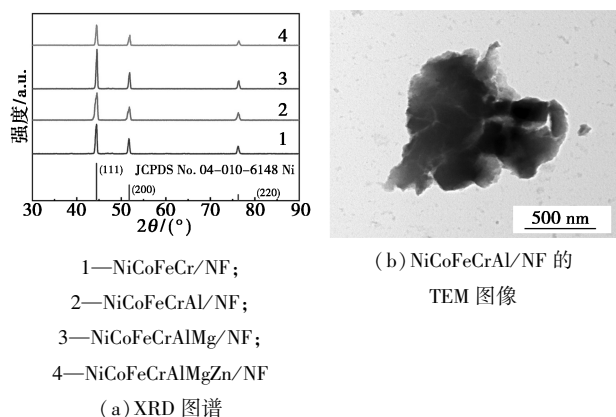


图 1 4 种电极材料的 XRD 以及 NiCoFeCrAl/NF 的 TEM 和电子衍射花样

分别对应 Ni 的标准卡(JCPDS No.04-010-6148)的(111)、(200)和(220)晶面。由于本研究以 NF 为集流体,并且 XRD 图谱除 NF 的衍射峰外并没有其他衍射峰,结合前面沉积活性物质的高负载量可以推断,制备的材料是弱结晶性或是非晶态。从图 1(b)可以看出 NiCoFeCrAl/NF 形貌呈现出规则结构。从图 1(c)可以发现合成的电极材料没有晶格条纹。图 1(d)所示的选区电子衍射花样没有明显的衍射环,证明合成的电极材料为非晶态。

为了观察随着沉积元素种类的增多,非晶态高熵电极材料的形貌变化,进行了 SEM 测试,如图 2 所示。4 种电极材料的微观形貌均不规则,并且出现明显的团聚现象。其中 NiCoFeCr/NF 的团聚体尺寸不均匀,NiCoFeCrAl/NF、NiCoFeCrAlMg/NF 以及 NiCoFeCrAlMgZn/NF 团聚体尺寸较 NiCoFeCr/NF 均匀。虽然高负载的电化学活性物质有助于提升器件的容量,但是同时也会对离子的传输产生不利影响,从而影响其倍率性能。

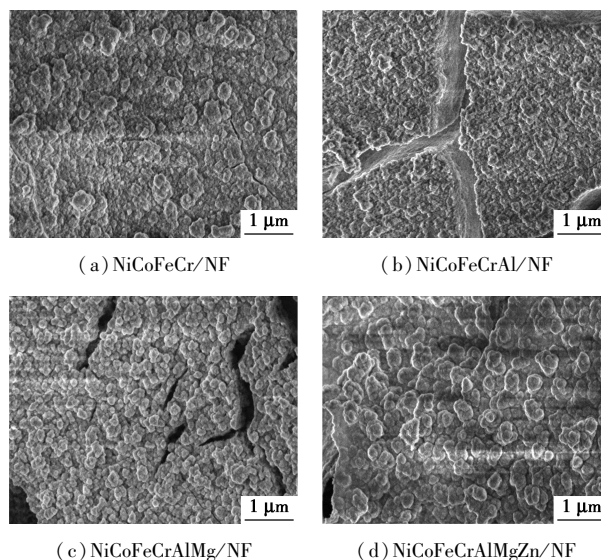


图 2 4 种电极材料的 SEM 图

采用 XPS 研究 NiCoFeCrAl/NF 材料的表面化学成分和化学价态,见图 3。从图 3(a)中可以看出,该电极材料含有 Ni、Co、Fe、Cr、Al 5 种金属元素。从图 3(b)中可以看出,Ni 以  $Ni^{3+}$  的形式存在,电子结合能位置 855.7 eV 和 873.3 eV 分别对应  $Ni^{3+}$  的  $2p_{3/2}$  和  $2p_{1/2}$  电子轨道,电子结合位置为 861.6 eV 和 879.4 eV 是 Ni 的卫星峰<sup>[17]</sup>。从图 3(c)中可以看出,781.5 eV 和 797.3 eV 的两个主要峰值,分别对应  $Co^{2+} 2p_{3/2}$  和  $Co^{2+} 2p_{1/2}$ ,并且伴随着其附近相应的卫星峰(标记为“Sat.”)分别对应 786.0 eV 和 803.0 eV<sup>[18]</sup>。从图 3(d)中可以观察

到, Fe 2p<sub>3/2</sub> 和 Fe 2p<sub>1/2</sub> 两个自旋轨道分别位于 717.5 eV 和 732.2 eV, 在 Fe 2p 精细谱上进行拟合后, 它显示了 Fe<sup>2+</sup> (709.9 eV 和 723.2 eV) 和 Fe<sup>3+</sup> (712.7 eV 和 726.5 eV) 两种价态<sup>[19]</sup>。图 3(e) 中结合能 575.9 eV 和 585.7 eV 衍射峰证实了 Cr<sup>3+</sup> 的存

在<sup>[19]</sup>。由于 Al 2p 与 Ni 3p 重合, 因此从 3(f) 中可以看出 74.6 eV 为 Al 2p 峰, 而 68.5 eV 是 Ni 3p 峰<sup>[20]</sup>。可以看到制备的高熵材料中没有丰富的 Ni<sup>2+</sup> 与 Co<sup>3+</sup>, 因此氧化还原反应的缺乏不利于电化学性能的提升。

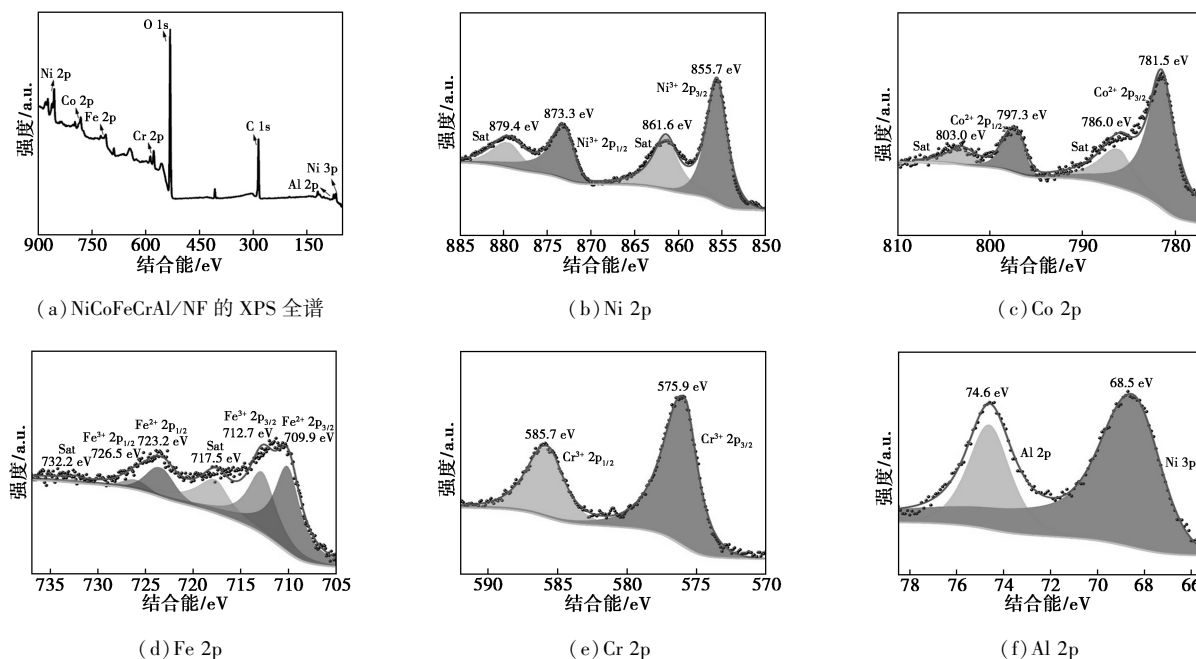


图 3 NiCoFeCrAl/NF 的 XPS 能谱

## 2.2 三电极测试

为了探究随着沉积元素种类的增多, 相应电化学性能的变化规律, 进行了 CV、EIS、GCD 以及循环性能测试, 见图 4。图 4(a) 是 NiCoFeCrAl/NF 在扫描速率为 1~20 mV/s、电压窗口为 0~0.45 V 的 CV 曲线图。从中可以看出, CV 曲线的氧化还原峰很弱, 并且封闭曲线的面积随着扫描速率的增大而增大。图 4(b) 是在扫速为 5 mV/s 的条件下, 4 种电极材料的 CV 曲线对比图。从中可以看出, 随着沉积元素种类的增多, CV 曲线的氧化还原峰越来越明显, 并且封闭面积也越来越大, 其中 NiCoFeCrAlMgZn/NF 的 CV 曲线面积最大, 因此该电极材料对应的比电容也最大。NiCoFeCrAl/NF 的 GCD 曲线如图 4(c) 所示。从中可以看出, GCD 曲线存在明显的充放电平台, 呈现赝电容型电极材料特征, 并且当电流密度为 2 mA/cm<sup>2</sup> 时, NiCoFeCrAl/NF 的比电容为 3 108.5 mF/cm<sup>2</sup>, 当电流密度增加到 10 mA/cm<sup>2</sup> 时, 该电极材料的容量保持率为 43.7%。图 4(d) 为 4 种电极材料的 GCD 曲线对比图。随着沉积元素种类的增多, 相应的面积比电容(质量比电容)分别为 1 407.7 mF/cm<sup>2</sup> (156.4 F/g)、3 108.5 mF/cm<sup>2</sup>

(282.6 F/g)、3 432.7 mF/cm<sup>2</sup> (264.1 F/g) 以及 4 386.6 mF/cm<sup>2</sup> (274.2 F/g), 面积比电容增大, 但是质量比电容并没有正向提升。这是由于随着沉积元素种类的增多, 电极材料的负载量增大, 因此面积比电容增大。但是过多的负载量会导致活性物质堆积, 从而导致死质量的增加, 因此造成质量比电容没有正向增大。4 种电极材料的 EIS 曲线如图 4(e) 所示。随着沉积元素种类的增多, 4 种电极材料对应的  $R_s$  分别为 0.37、0.51、0.61、0.35  $\Omega$ ,  $R_{ct}$  分别为 0.056、0.063、0.047、0.024  $\Omega$ 。阻抗先上升后下降。这是由于负载量的增多导致阻抗的上升, 但是由于 NiCoFeCrAlMgZn/NF 各元素之间的协同作用, 从而导致 NiCoFeCrAlMgZn/NF 的阻抗下降。图 4(f) 为 4 种电极材料的循环性能对比图。从中可以看出, 4 种电极材料经过 1 000 圈循环充放电后, 随着沉积元素种类的增多, 容量保持率分别为 59.48%、51.42%、49.75%、34.47%。循环性能逐步下降, 这是由于随着沉积元素种类的增多电极材料的负载量变大, 较多的负载量会使活性物质的结合减弱, 从而导致活性物质在充放电循环过程中容易脱落<sup>[21]</sup>。

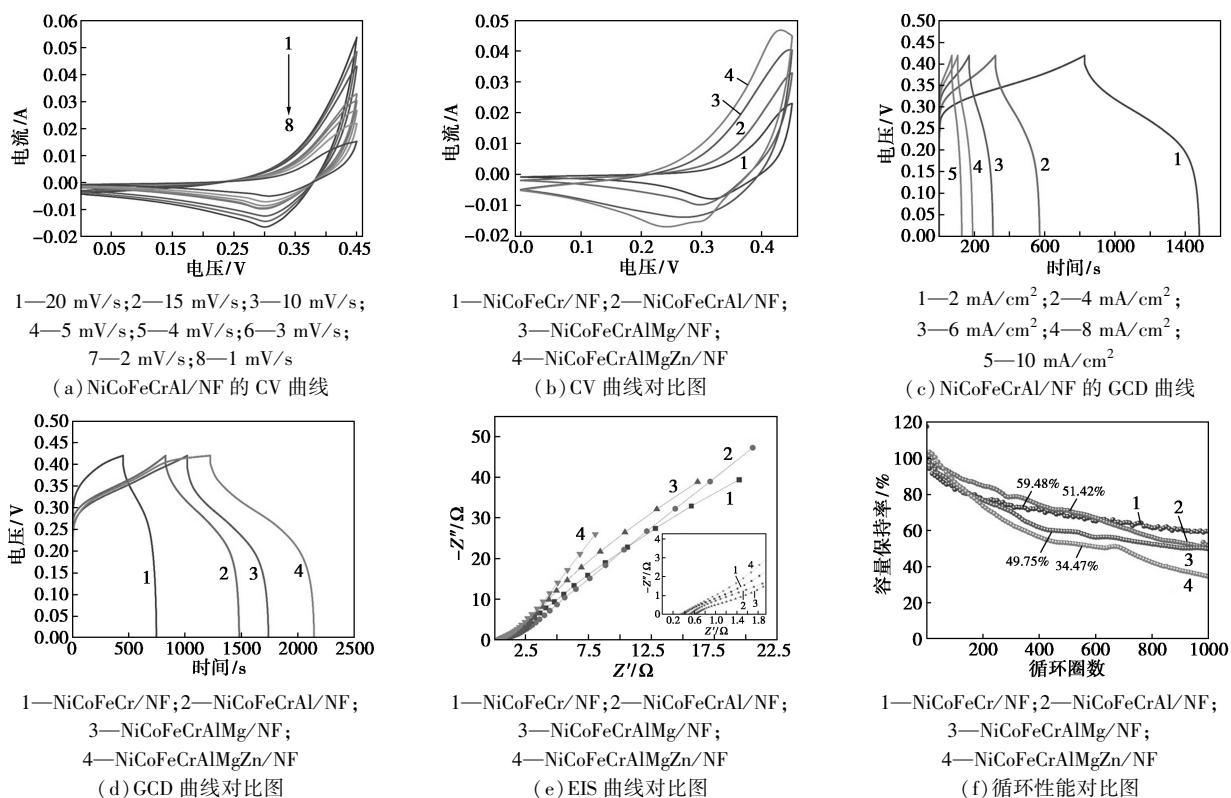
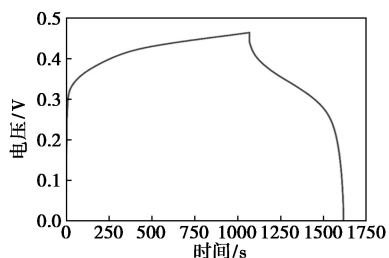
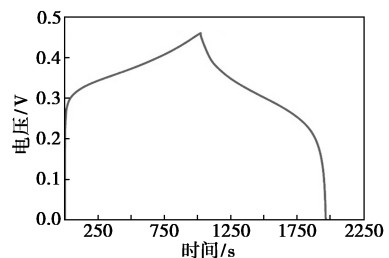


图 4 4 种电极材料的电化学性能

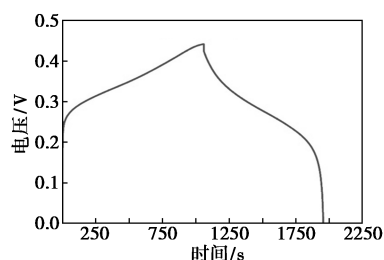
为了探究电压窗口随着沉积元素种类的变化并揭示其原因,进行电压窗口测试与 LSV 测试,见图 5。从图 5(a)~(d)中可以看出,随着沉积元素种类的增多,4 种电极材料的电压窗口分别为 0~0.47、0~0.46、0~0.44 以及 0~0.42 V,电压窗口逐步下降。结合图 5(f)4 种电极材料的 LSV 曲线,随着沉积元素种类的增多,在析氧反应中所需过电位依次降低。这是由于非晶态高熵电极材料具有较高的催化活性,容易导致电解水现象发生<sup>[22]</sup>,从而限制了



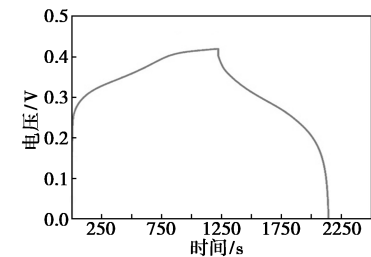
(a) NiCoFeCr/NF 的电压窗口



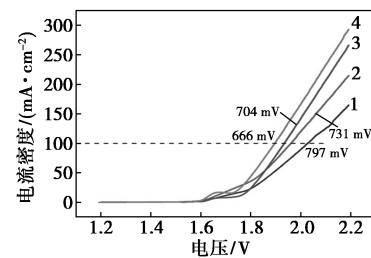
(b) NiCoFeCrAl/NF 的电压窗口



(c) NiCoFeCrAlMg/NF 的电压窗口



(d) NiCoFeCrAlMgZn/NF 的电压窗口



1—NiCoFeCr/NF; 2—NiCoFeCrAl/NF; 3—NiCoFeCrAlMg/NF;  
 4—NiCoFeCrAlMgZn/NF  
 (e) 4 种电极材料的 LSV 曲线

图 5 电极材料的电压窗口以及 LSV 曲线

其电压窗口,根据式(4)可知,电极材料的能量密度与电压窗口成平方的关系,因此低的电压窗口,不利于其能量密度的提升。

### 2.3 两电极测试

为了进一步研究电极材料在实际应用中的潜力,以 NiCoFeCrAl/NF 与 AC 为正负两极组装成图 6(a)所示的非对称超级电容器(NiCoFeCrAl/NF//AC)与图 6(b)所示的电池扣式对称超级电容器,并测其电化学性能。图 6(c)为 NiCoFeCrAl/NF//AC 在电压窗口为(0~1.2)~(0~1.6) V 之间、扫速为 20 mV/s 的 CV 曲线。可以看出,当测试电压达到 1.5 V 时会发生明显极化现象,因此最佳电压窗口为 0~1.5 V。如图 6(d)所示,器件在 1.5 V 电压窗

口下的 CV 曲线随着扫速的增加,曲线图形几乎保持不变。由图 6(e)、(f)可得,该器件内阻约为 2.76 Ω。由图 6(g)可知,在电流密度为 1 A/g 时比电容为 62.48 F/g。当功率密度为 750 W/kg 时,能量密度为 19.53 W·h/kg,如图 6(h)所示。组装的电池扣式对称超级电容器,在电流密度为 3 A/g、经过 10 000 次循环充放电后,容量保持率为 84.8%,库仑效率保持在 96.2%,如图 6(i)所示。

### 3 结论

随着沉积元素种类的增多,活性物质负载量逐步增多,因此相应的面积比电容增大。但是由于过多的活性物质使其与集流体结合不强,从而易脱落,

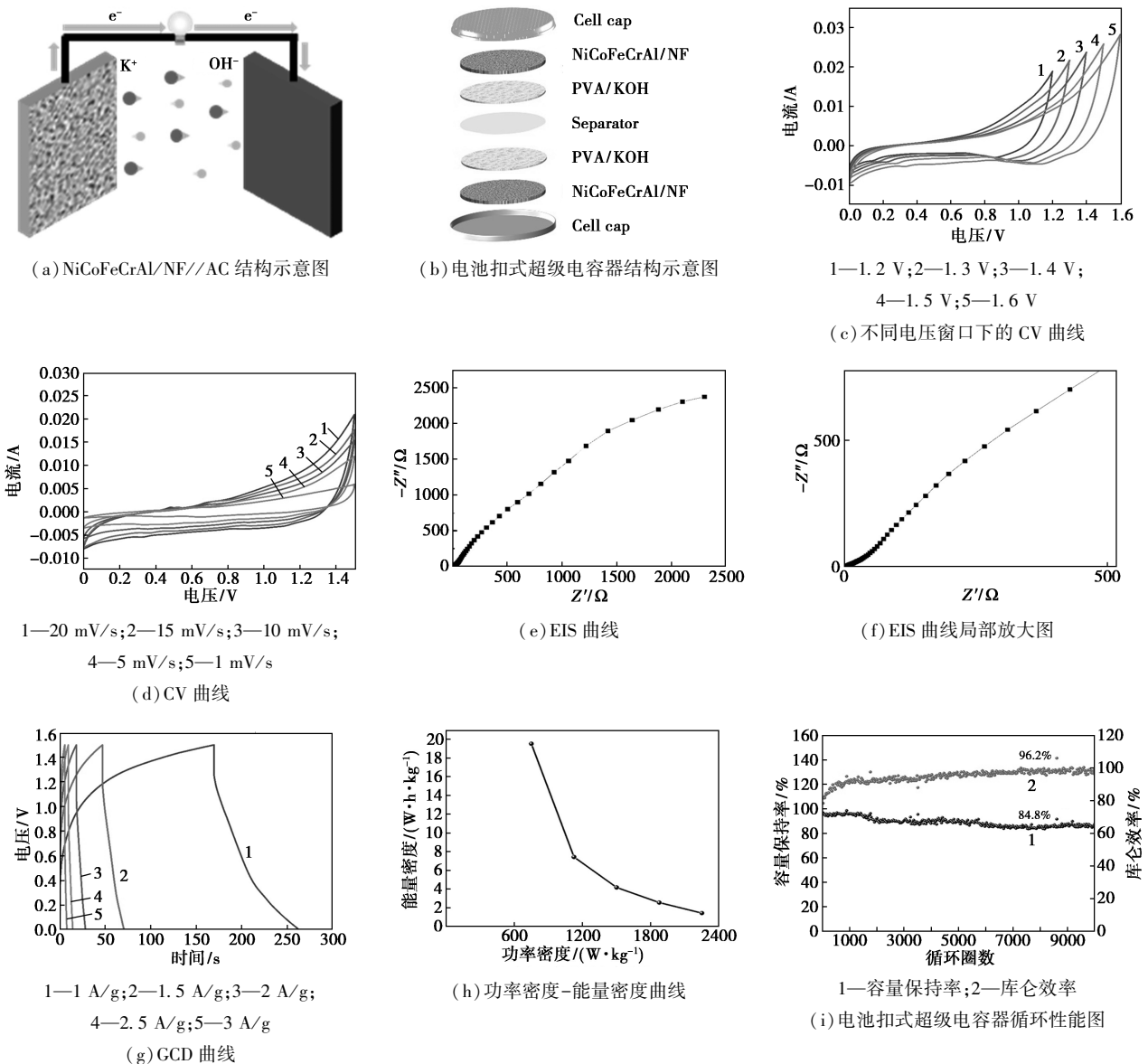


图 6 NiCoFeCrAl/NF//AC 的电化学性能以及电池扣式超级电容器结构示意图与循环性能

导致循环性能下降。并且由于高熵电极材料易发生电解水现象从而导致电压窗口逐步下降。其中 NiCoFeCrAl/NF 电极材料的综合电化学性能最优,该电极材料的电压窗口为 0~0.46 V,并且在 2 mA/cm<sup>2</sup> 的电流密度下,该电极材料具有 3 108.47 mF/cm<sup>2</sup> 的比电容。经过 1 000 次循环充放电后,其容量保持率为 51.42%。将该电极材料与 AC 组装成非对称超级电容器,当功率密度为 750 W/kg 时,能量密度为 19.53 W·h/kg。并且组装的电池扣式超级电容器经过 10 000 次循环充放电后,其容量保持率为 84.8%。本研究为非晶态高熵材料在超级电容器中的应用提供了参考。

### 参考文献

- [1] 常进. Co 掺杂 Ni(OH)<sub>2</sub> 的超级电容器性能及其第一性原理计算研究[J]. 无机化学学报, 2024, 40(9): 1697-1707.
- [2] 赵悦, 张海燕, 陈建飞, 等. 三维碗状结构 CoS<sub>2</sub>/C 复合材料的制备及其在超级电容器中的应用[J]. 材料研究与应用, 2020, 14(1): 19-25, 30.
- [3] Sun A, Qiu Y, Wang Z, *et al.* Interface engineering on super-hydrophilic amorphous/crystalline NiFe-based hydroxide/selenide heterostructure nanoflowers for accelerated industrial overall water splitting at high current density[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 650: 573-581.
- [4] Chen Y, Li Y, Dong Y, *et al.* High-performance aqueous asymmetric supercapacitors with a cathode of MnCo<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanowires sandwiched by NiCoMnS<sub>4</sub> nanosheets on Ni foam[J]. Science China Materials, 2024, 67(3): 816-823.
- [5] Li Y, Li L, Du F. Amorphous S-doped Ni<sub>x</sub>Co<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub> for high-performance asymmetric supercapacitors[J]. Electrochimica Acta, 2022, 434: 141326.
- [6] Sun C, Pan W, Zheng D, *et al.* Low-crystalline FeOOH nanoflower assembled mesoporous film anchored on MWCNTs for high-performance supercapacitor electrodes[J]. ACS omega, 2020, 5(9): 4532-4541.
- [7] Guo T, Hu P, Li L, *et al.* Amorphous materials emerging as prospective electrodes for electrochemical energy storage and conversion[J]. Chem, 2023, 9(5): 1080-1093.
- [8] Zhang J, Li Y, Chen Z, *et al.* Amorphous electrode: From synthesis to electrochemical energy storage[J]. Energy & Environmental Materials, 2023, 6(6): e12573.
- [9] Joseph A, Mathew A, Thomas T. Effect of phase transformation on the electrochemical supercapacitive behavior of thermally exfoliated zirconia[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 77: 109969.
- [10] Chen X, Wang S, Qiao G, *et al.* Fabrication of three-dimensional porous NiO/amorphous Ni(OH)<sub>2</sub> composites for supercapacitors[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(12): 16783-16790.
- [11] Wang J, Rui J, Yin J, *et al.* Phase-controlled synthesis of Co-Mg hydroxide for high-performance hybrid supercapacitors[J]. Ionics, 2021, 27(1): 351-360.
- [12] Zhang Y, Wang Y, Feng Y, *et al.* Amorphous nickel-cobalt phosphate nanosheets optimized by a micron-sized copper particle array with ultrahigh specific capacitance for asymmetric supercapacitors[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 990: 174393.
- [13] Lv X, Huang W, Shi Q, *et al.* Synthesis of amorphous NiCo<sub>2</sub>V<sub>x</sub>O<sub>y</sub> nanosphere as a positive electrode materials via a facile route for asymmetric supercapacitors[J]. Journal of Power Sources, 2021, 492: 229623.
- [14] Li S, Tong L, Peng Z, *et al.* Novel high-entropy layered double hydroxide microspheres as an effective and durable electrocatalyst for oxygen evolution[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2023, 11(25): 13697-13707.
- [15] Hussain I, Lamiel C, Ahmad M, *et al.* High entropy alloys as electrode material for supercapacitors: A review[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 44: 103405.
- [16] Li F, Yoshida K, Van Chuc N, *et al.* Understanding the role of solvents in bottom-up synthesis of multi-element hydroxides[J]. RSC Advances, 2024, 14(1): 75-82.
- [17] Chen X, Wang S, Qiao G, *et al.* Sepiolite/amorphous nickel hydroxide hierarchical structure for high capacitive supercapacitor[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 881: 160519.
- [18] Ji X, Lin Y, Zeng J, *et al.* Graphene/MoS<sub>2</sub>/FeCoNi(OH)<sub>x</sub> and Graphene/MoS<sub>2</sub>/FeCoNiP<sub>x</sub> multilayer-stacked vertical nanosheets on carbon fibers for highly efficient overall water splitting[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1380.
- [19] Cao W, Yang X, Dai W, *et al.* An amorphous FeCoNiMnCr high-entropy alloy supported by 2H-MoS<sub>2</sub> on carbon cloth as a highly efficient and robust electrocatalyst for water oxidation[J]. New Journal of Chemistry, 2023, 47(27): 12670-12677.
- [20] Huang X, Chu B, Han B, *et al.* 2D-on-2D Al-doped NiCo LDH nanosheet arrays for fabricating high-energy-density, wide voltage window, and ultralong-lifespan supercapacitors[J]. Small, 2024, (37): 2401315.
- [21] Xiong S, Weng S, Tang Y, *et al.* Mo-doped Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ultrathin nanosheet arrays anchored on nickel foam as a bi-functional electrode for supercapacitor and overall water splitting[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 602: 355-366.
- [22] Li S Y, Nguyen T X, Su Y H, *et al.* Sputter-deposited high entropy alloy thin film electrocatalyst for enhanced oxygen evolution reaction performance[J]. Small, 2022, 18(39): 2106127. ■