

# 碳包覆氧化镍纳米颗粒的制备与电化学性能

张旭东<sup>1,2</sup>, 魏智强<sup>1,2</sup>, 赵文华<sup>2</sup>, 白军善<sup>2</sup>, 朱学良<sup>2</sup>, 姜金龙<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

(2. 兰州理工大学 理学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 采用直流电弧放电等离子体技术制备了核壳结构碳包覆氧化镍纳米颗粒, 并采用 X 射线衍射、高分辨透射电子显微镜、X 射线能量色散分析谱仪和表面物理吸附仪等测试技术对样品的微观结构进行研究。并利用循环伏安法、恒电流充放电以及交流阻抗等技术研究其作为超级电容器电极材料的电化学性能。结果表明: 直流电弧等离子体技术制备的碳包覆氧化镍纳米颗粒具有典型的核壳结构, 内核为面心立方结构的氧化镍纳米颗粒, 外壳为碳层。颗粒形貌主要为立方体结构, 粒度均匀, 分散性良好, 粒径分布在 30~70 nm 范围, 平均粒径为 50 nm, 外壳碳层的厚度为 5 nm。碳包覆氧化镍纳米颗粒具有较高的比容量和良好的电化学活性。

**关键词:** 超级电容器; 碳包覆; NiO; 核壳结构; 电化学性能

**中图分类号:** TM53

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2019)04-1304-06

近几十年来, 随着现代工业的发展和科学技术的进步, 能源危机已成为人类社会可持续发展所面临的严峻挑战。因此迫切需要发展高效清洁新能源材料来代替传统的化石燃料, 以满足世界经济高速持续发展的需求。开发具有高能量密度和高功率密度的新型能源材料和储能器件成为国内外学术界和工业界的热点课题<sup>[1,2]</sup>。超级电容器是介于蓄电池和传统电容器之间的一种新型电化学储能元件<sup>[3]</sup>, 超级电容器具有功率密度高、循环寿命长、无污染、工作温度范围宽等特点, 在各种储能交通装置和电子移动便携设备等领域有着极其广阔的应用前景<sup>[4]</sup>。电极材料是决定超级电容器性能的关键因素, 开发具有特定功效的微纳米结构功能材料是超级电容器电极材料方向研究的重点。近年来对超级电容器电极材料的研究主要集中在各种活性碳材料、过渡金属氧化物材料和导电聚合物材料及其复合电极材料<sup>[5,6]</sup>。纳米氧化镍是重要的新型功能材料, 具有高的比电容和优异的循环可逆性, 但是在充放电过程中体积容易发生改变, 破坏了其优良的纳米结构, 而且容易溶解在电解液中, 导致氧化物电极的充放电稳定性不好, 循环寿命很短<sup>[7-9]</sup>。为了改善氧化镍纳米颗粒的电化学性能, 需要对金属氧化物进行表面修饰。通过碳材料与金属氧化物复合, 可以兼具良好的循环性能和赝电容的高比容量, 碳包覆金属纳

米颗粒是一种具有核壳结构的介孔材料, 这种特殊的介孔结构同时具有碳材料的双电层电容和金属氧化物的赝电容, 能够有效增加电极材料的比表面积, 控制金属氧化物在充放电过程中的体积变化, 有利于电解液的浸润和迁移, 提高超级电容器的电化学性能<sup>[10-12]</sup>。

本工作利用直流电弧等离子体技术制备了碳包覆氧化镍纳米颗粒, 采用 X 射线衍射、高分辨透射电子显微镜、X 射线能量色散分析谱仪和表面物理吸附仪等测试技术对试样的晶体结构、形貌、粒度和孔结构等特征进行了研究。并利用循环伏安法、恒电流充放电以及交流阻抗等技术研究其用作超级电容器电极材料的电化学性能。

## 1 实验

采用自行研制的直流电弧等离子体制备金属纳米粉体的装置获得碳包覆 NiO 纳米颗粒<sup>[13]</sup>。在实验前期, 先进行实验设备的水路、气路和电路各阀门状态检查, 连接好正负电极, 然后将高纯碳粉和镍粉按照一定的比例混合均匀作为反应原料, 放入水冷坩埚中。以高纯氩气作为惰性保护气体, 利用机械泵和扩散泵将真空室多次采用 Ar 进行净化冲洗, 从而降低真空室内杂质气体浓度。然后通入工作气体 (体积比 4:1 的高纯 Ar 和 O<sub>2</sub> 混合气体), 调整反应室气压约为 102 Pa。接

收稿日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51261015); 甘肃省自然科学基金 (1308RJZA238)

作者简介: 张旭东, 男, 1993 年生, 硕士生, 兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州 730050, 电话: 0931-2973780, E-mail: yodongchang@163.com

通直流电源, 引燃电弧, 控制电弧电流和电压在一定的范围。通过正负极电极之间的等离子体高温, 碳和镍混合体在高温下被迅速加热蒸发形成蒸气, 经过融化、蒸发、凝聚、形核、晶体逐渐生长等几个过程, 在冷却收集筒周围, 迅速损失能量而冷却, 凝固形成核壳结构的碳包覆氧化镍纳米颗粒。本实验中样品为在水冷却条件下、电弧电流 120 A、气压为 102 Pa 和 Ar 气氛条件下获得的碳包覆 NiO 纳米颗粒。

采用 Rigaku 公司的 D/Max-2400X 型射线衍射仪 (以阳极 Cu 靶  $K\alpha$  辐射线为辐射源,  $\lambda=0.154\ 056\ \text{nm}$ , 测试管电压为 40 kV, 电流为 30 mA, 扫描范围  $20^\circ\sim 80^\circ$ , 扫描速度  $12^\circ\cdot\text{min}^{-1}$ ) 分析样品的晶体结构。采用 JEM-2010 型高分辨透射电子显微镜 (点分辨率 0.19 nm, 加速电压 200 kV) 观测样品的微观结构和形貌, 并配以日本电子光学公司 KEVEX 型 X 射线能量色散分析谱仪(EDS)分析确定其包覆结构和成分; 采用美国 Micromeritics 公司的 ASAP-2010 型表面物理吸附仪测定样品的孔结构, 在液氮饱和温度条件下对样品进行静态物理吸附, 相对压力在 0.01~0.99 之间测试纳米粉末外部和内部通孔表面对氮气吸附体积, 在不同压力下整个过程由电脑控制, 考察样品对  $\text{N}_2$  吸附和脱附等温线, 根据 BJH 理论模型测试样品的孔结构。

在 CST350 电化学工作站 (武汉科思特仪器公司) 上采用三电极体系对碳包覆 NiO 纳米颗粒进行电化学性能测试。称取碳包覆 NiO 纳米颗粒、导电剂乙炔黑与粘结剂聚四氟乙烯(PTFE)按照质量比 8:1:1 的比例混合均匀后, 加入少量的乙醇进行充分搅拌至其变为糊状浆料, 将其均匀涂覆于  $1\ \text{cm}\times 1\ \text{cm}$  泡沫镍集流体上, 放置室内自然晾干后, 在 10 MPa 的压力下压制成薄片工作电极。最后将制备好的工作电极片在  $60^\circ\text{C}$  下真空干燥 12 h。以碳包覆氧化镍为三电极体系的工作电极, 饱和甘汞(SCE)作为参比电极, 铂电极作为辅助电极, 以  $1\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 KOH 溶液为电解液。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD 分析

为了考察碳包覆氧化镍纳米颗粒的晶相结构, 对所制备样品进行了 XRD 表征。图 1 给出了样品的 X 射线衍射图谱, 从图中发现 5 个明显的特征衍射峰, 在  $2\theta=37.3^\circ$ 、 $43.32^\circ$ 、 $62.88^\circ$ 、 $75.48^\circ$  和  $79.4^\circ$  位置, 它们分别对应于 NiO 的(111)、(200)、(220)、(311)和(222)晶面, 这些主要衍射峰的位置与标准卡片(PDF No.47-1049)块体氧化镍的衍射峰基本一致, 表明所制备的样品中主要成分是氧化镍, 具有面心立方晶格结构。在衍射图谱中除氧化镍晶体的衍射峰外, 同时在  $2\theta=$

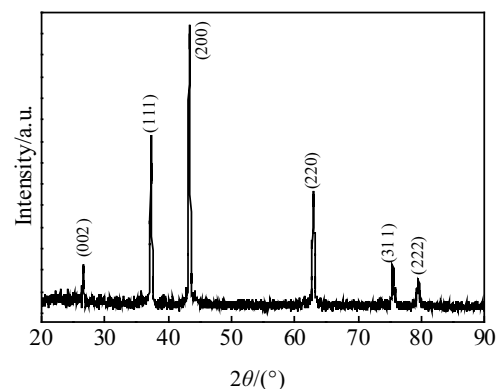


图 1 碳包覆氧化镍纳米颗粒的 XRD 图谱

Fig.1 XRD pattern of carbon-encapsulated NiO nanoparticles

$26.60^\circ$ 位置发现了相应碳的衍射峰, 与石墨结构碳(002)晶面的特征衍射峰对应, 衍射峰的强度比较弱, 说明本方法所制备样品中碳石墨化程度较低, 结晶性不好, 绝大部分是以无定形碳结构的形式存在。XRD 分析表明样品中除了金属氧化镍和碳的特征衍射峰之外, 并没有发现金属氧化物、金属碳化物和铁氧体等其它晶相的存在, 这说明碳包覆金属纳米粒子的主要成分是 fcc 结构的氧化镍和石墨碳。对于具有 fcc 结构的 NiO 纳米粉体, 认为颗粒为单相, 无晶界。

### 2.2 TEM 分析

图 2a 是碳包覆氧化镍纳米颗粒典型的高分辨透射电镜照片。从图 2a 中可以看出大部分颗粒形貌呈规则的立方体结构, 边缘比较清晰, 显示其均匀的成核机制。氧化镍纳米颗粒基本被壳层碳包覆, 具有明显的内外两层的核壳结构, 颗粒间无明显团聚, 形貌很规整, 分散性良好, 说明由于碳包覆层的存在, 氧化镍纳米颗粒被碳包覆之后, 降低了粒子的表面能, 从而抑制了颗粒之间的团聚。颗粒尺寸主要分布在 30~70 nm 范围内, 平均粒度约为 50 nm。

图 2b 为样品局部的高倍放大的 HRTEM 图像, 可以看出氧化镍纳米颗粒外壳被碳层紧密包覆, 具有明显的壳-核结构, 其中外部颜色较浅的薄层是碳包覆膜, 内部核心颜色较深的为氧化镍纳米颗粒, 碳层与氧化镍内核之间的界面层清晰。纳米颗粒内部核的平均直径约为 40 nm, 外壳碳包覆层厚度约为 5 nm。紧贴氧化镍纳米颗粒周围的碳排列不规则, 包覆层的碳并没有出现类似于石墨的层状结构存在, 说明碳层的晶化程度比较低, 主要是无定形结构的碳组成。进一步对样品金属内核局部高倍放大可观察到清晰的晶格条纹, 在一定的区域内呈规则排列, 不存在明显缺陷, 说明纳米颗粒结晶化程度较好<sup>[14]</sup>。经过测量其晶面间

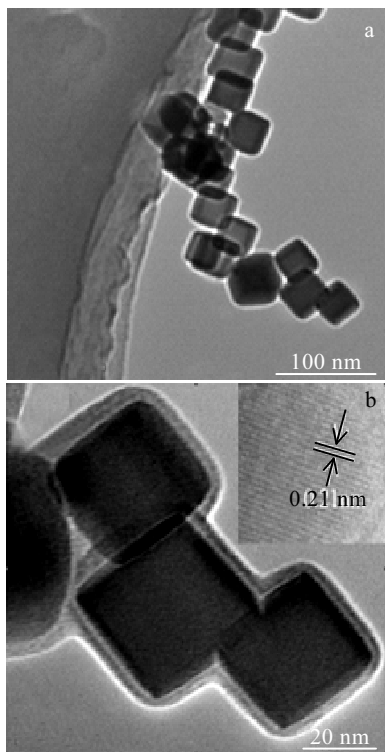


图 2 碳包覆氧化镍纳米颗粒典型的高分辨透射电镜照片  
Fig.2 HRTEM images of carbon-encapsulated NiO nanoparticles

距大约为 0.21 nm, 与 fcc 结构氧化镍的(111)晶面间距接近, 也与 XRD 的结果相符。

### 2.3 EDS 分析

碳包覆氧化镍纳米颗粒的 EDS 能谱如图 3 所示。由图可见, 样品中主要存在 Ni、O 和 C 元素的特征峰。其中在 0.3 keV 位置出现了 C 的特征峰, 在 0.5 keV 位置出现的 O 的特征峰, 在 0.8、7.4 和 8.1 keV 位置出现了 Ni 的特征峰。定量分析表明 Ni 和 O 的原子分数分别约为 11% 和 14%, 剩余的是碳元素约为 75%, 其

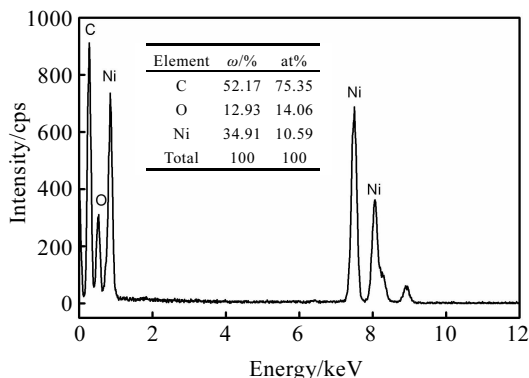


图 3 碳包覆氧化镍纳米颗粒的 EDS 能谱  
Fig.3 EDS spectrum of carbon-coated NiO nanoparticles

中 O 稍有过量, 接近于氧化镍的化学计量比。这也进一步证明了合成产物 NiO 被碳所包覆, 其中内部核心为氧化镍纳米颗粒, 外壳包覆层是碳。EDS 的测试结果也验证了 XRD 所得出的结论。

### 2.4 样品的氮气吸附-脱附等温线

当气体分子与纳米颗粒表面接触时为其表面所吸附, 在液氮低温下(78 K), N<sub>2</sub> 在纳米颗粒表面上的吸附是物理吸附。纳米颗粒表面有剩余的表面自由力场, 而在晶粒的内部, 各点力场被各个方向的作用力所平衡。图 4 是样品 N<sub>2</sub> 吸附-脱附等温线, 此等温线属于典型的 Langmuir IV 型。在相对压力  $P/P_0 < 0.4$  的区间范围内, 碳包覆氧化镍纳米颗粒的 N<sub>2</sub> 吸附随着相对压力的上升增长非常平缓, 等温线比较平坦, 没有出现拐点, 吸附与脱附曲线很接近, 几乎重合, 同时从吸附脱附等温线观察到样品在低压区的吸附量很少, 大约为 10 cm<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup>。根据 Kelvin 理论, 对于微孔结构不发生毛细管凝聚现象, 因此沿等温线的起始部分吸附主要发生在微孔中, 仅限于在壁上形成薄层, 在低压区吸附与脱附曲线不存在滞后现象, 表明碳包覆氧化镍纳米颗粒中存在一定量的微孔, 但是所占比例不高<sup>[13]</sup>。当相对压力  $P/P_0 > 0.4$  时, 吸附量随着相对压力的增大呈陡峭增长, 曲线急剧上升, 脱附线和吸附线存在滞后现象, 出现明显的吸附回线, 从吸附脱附等温线观察到样品在相对高压区的吸附量急剧增加到 60 cm<sup>3</sup>·g<sup>-1</sup>。表明样品本身存在大量的介孔结构, 微孔是少而次要的, 占支配地位的介孔结构导致样品在吸附过程中出现毛细凝聚现象。在低于常压下 N<sub>2</sub> 分子在毛细凝聚作用下, 首先冷凝填充了介孔孔道, 由于 N<sub>2</sub> 脱附是从介孔结构的孔口球形弯月液面开始产生的, 而 N<sub>2</sub> 吸附是从介孔结构孔壁上的环状吸附膜液面上

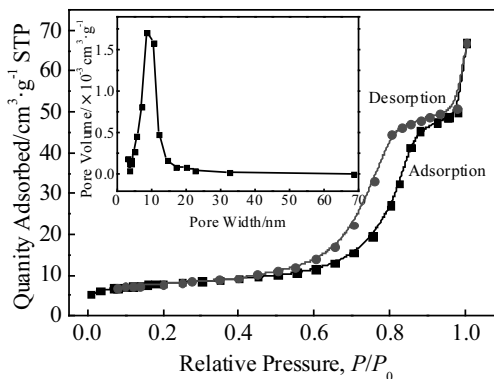


图 4 碳包覆氧化镍纳米颗粒的吸附脱附曲线和孔径分布图 (插图)  
Fig.4 Adsorption-desorption curves and pore size distribution (inset) of carbon-coated NiO nanoparticles

进行, 因此样品  $N_2$  吸附-脱附等温线不相重合, 形成一个 IV 型滞后环<sup>[15]</sup>。

孔结构的产生可能是由不同微晶晶粒堆积而成的聚集体内的空隙所造成的; 也可能是碳壳包覆不彻底, 存在表面结晶缺陷造成局部结构单元破坏, 出现孔结构。依据 BJH 理论模型测试得到碳包覆氧化镍纳米颗粒的孔径分布如图 4 (插图) 所示, 由图可知样品的孔径主要分布在 3~20 nm 范围内, 平均孔径为 9 nm, 说明本方法所制备的样品孔径分布区间较窄, 样品的孔结构主要为介孔, 微孔是少而次要的, 占支配地位的是介孔结构, 孔径分布范围比较单一均匀。这种介孔结构为电解质离子的传输提供了快速的扩散通道, 有利于提高电极材料电容性能<sup>[16,17]</sup>。

## 2.5 电化学性能测试

图 5 为碳包覆氧化镍纳米颗粒电极材料在三电极体系中扫描速率分别为 5、10、20、30、40 和 50  $mV \cdot s^{-1}$  下的循环伏安曲线。测试的电化学窗口为 0~0.5 V。从图 5 中可以看到, 循环伏安曲线都具有明显的氧化还原峰, 各氧化峰和还原峰所对应的比电流差值随着扫描速率的增大而增大, 并具有良好的响应关系。氧化峰随着扫描速率的增大向正方向移动, 而还原峰随之向负方向移动, 偏移幅度都较小。不同扫描速度下的循环伏安曲线形状基本保持不变, 曲线具有较好的对称性。说明电极反应接近于可逆过程, 电极材料的电容主要来源是基于氧化还原反应的赝电容。这种现象可能是电极内阻和电解质离子在材料结构中的缓慢扩散共同引起的<sup>[18]</sup>, 说明碳包覆氧化镍纳米颗粒具有良好的倍率特性, 优异的能量储存和释放性能, 在电化学反应过程中电极具有良好的可逆性和较好的电化学性能。

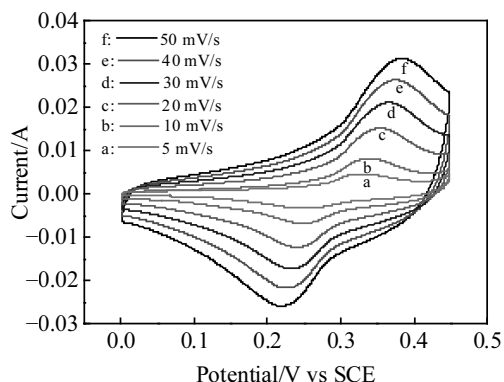


图 5 碳包覆氧化镍纳米颗粒在不同扫描速度下的循环伏安曲线

Fig.5 Cyclic voltammograms of carbon-coated NiO nanoparticles at different scan rates

图 6 为碳包覆氧化镍纳米颗粒在不同电流密度下的充放电曲线和比电容值。从图 6a 可见, 在不同电流密度下的充放电曲线均呈现出良好的对称性, 表明碳包覆氧化镍电极材料在充放电过程中表现出良好的库仑效率, 同时充放电曲线不具有双电层那样完整, 说明电极材料的电容来自于金属氧化物的赝电容和碳材料的双电层电容的组合。在放电曲线中, 不同电流密度下的放电曲线呈现出 2 个变化范围, 在电势小于 0.2 V 时, 电势和相应时间具有线性关系, 具有明显的双电层电容行为特性, 这是由于在放电过程电荷在电解液和电极材料表面分离引起的。在电势大于 0.2 V 时, 电势和时间呈非线性关系, 体现为典型的赝电容行为特性, 电容产生源于电极与电解液界面氧化还原反应或电活性物质的化学吸附脱附作用<sup>[19]</sup>。

通过放电曲线和比电容公式:  $C_m = I \cdot \Delta t / m \cdot \Delta V$ , 可以计算出电极材料在不同电流密度下的比容量值, 其中  $C_m$  ( $F \cdot g^{-1}$ ) 是电极材料的单电极质量比电容,  $I$  表示放电电流(A),  $\Delta t$  表示放电时间(s),  $\Delta V$  是放电过程中的电压差(V),  $m$  表示单个电极片中活性物质的质量(g)。图 6b 为碳包覆氧化镍纳米颗粒在不同电流密度下的比电容值, 由图可见, 在放电电流密度分别为 1、

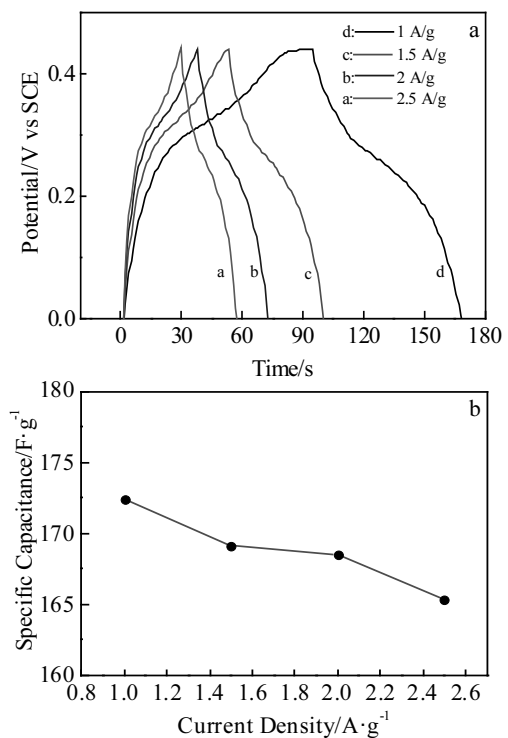


图 6 碳包覆氧化镍纳米颗粒在不同电流密度下的充放电曲线和比电容值

Fig.6 Charge-discharge curves (a) and specific capacitances (b) of carbon-coated NiO nanoparticles

1.5、2 和 2.5 A·g<sup>-1</sup> 时,其对应的比电容值分别为 172.4、169.1、168.5 和 165.3 F·g<sup>-1</sup>。发现电极的比电容随着电流密度增加呈减小趋势,这可能是由于在大电流放电时,电极内阻导致的电势降较大和电活性物质法拉第反应不充分所引起的<sup>[20]</sup>。另外,在比较大的电流密度下充放电时,整个体系的离子迁移速率随着电流密度的增加而增大,电解液中的带电离子在短时间内来不及渗透、扩散和转移出电极材料基体,这就导致电极材料中活性物质得不到最高效率的利用,充放电过程不完整,因此比电容随着电流密度增加而减小。

由图 6b 可见,当电流密度为 1 A·g<sup>-1</sup> 时,比容量最高,达到 172.4 F·g<sup>-1</sup>,在 2.5 A·g<sup>-1</sup> 电流密度下比容量仍保持为 165.3 F·g<sup>-1</sup>,说明碳包覆氧化镍纳米颗粒具有较高的倍率性能。这是由于碳包覆氧化镍纳米颗粒具有较大的比表面积,由纳米颗粒制作的电极,由于颗粒间存在空隙,电解液可以快速渗透到纳米颗粒表面以及颗粒间的空隙,与泡沫镍共同构成三维空间通道,更有利于参与电极表面反应的电解质离子的快速渗透、扩散和转移,提高了电极材料的电化学性能。氧化镍纳米颗粒具有较大的比表面积,作为电极材料在充放电过程中为氧化还原反应提供更多的电解质离子。碳包覆氧化镍纳米颗粒电极材料既具有碳材料的双电层电容行为,还具有金属氧化物的赝电容特性,因此提高了材料的比容量<sup>[15]</sup>。

图 7a 为碳包覆氧化镍纳米颗粒电极材料在交流电压振幅为 5 mV,频率范围为 0.01 Hz~100 kHz 下的交流阻抗谱,其中插图 of 高频区放大图。可见电极材料的交流阻抗图表现出典型的超级电容器电极材料性能,具有良好的电化学电容阻抗特性。交流阻抗曲线由低频区、中频区和高频区三部分组成,其中高中频区的半圆弧代表电荷传递的法拉第过程;而低频区的斜线代表电解液在纳米颗粒所制成的电极中扩散的韦伯阻抗。电极材料的等效电路如图 7b 所示,高频区半圆弧与实轴的截距  $R_s=1.05 \Omega$ ,表示电极材料内阻,由电解质的离子电阻、电极材料自身的固有电阻、电极活性物质与集流体的接触电阻共同组成。中频区的半圆弧直径来拟合等效电路,拟合出溶液阻抗  $R_{ct}$  为  $0.15 \Omega$ ,主要源于电荷转移、电子扩散产生的阻抗;低频区的斜线代表电极材料和电解液发生氧化还原反应时离子的扩散阻抗  $Z_w$ ,直线的倾斜角大于  $45^\circ$ ,说明电极反应过程扩散阻抗较小。由于碳包覆氧化镍纳米颗粒的介孔结构为离子提供了畅通无阻的传输通道,电极反应过程扩散阻抗较小,离子能够向电极中快速扩散,表明电极材料可以直接发生有电荷传递的氧化还原反应,具有良好的电化学活性。

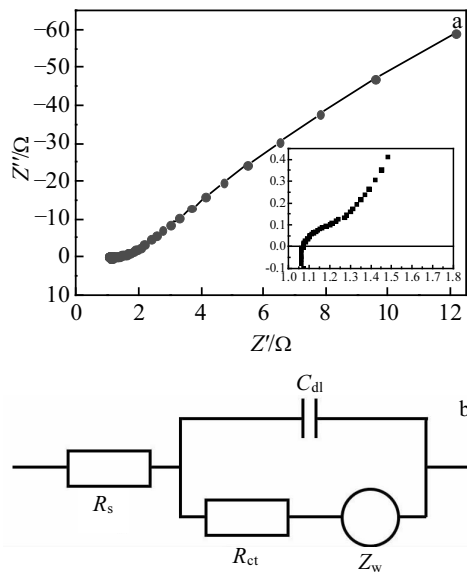


图 7 碳包覆氧化镍纳米颗粒的交流阻抗图和等效电路图  
Fig.7 Nyquist plots (a) and equivalent circuit (b) of carbon-coated NiO nanoparticles

### 3 结 论

1) 直流电弧等离子体法制备的碳包覆氧化镍纳米颗粒具有明显的核-壳结构,内核为 fcc 结构的氧化镍纳米颗粒,外壳为碳保护膜。碳包覆氧化镍纳米颗粒的形貌主要为立方体结构,粒度均匀,分散性良好,颗粒尺寸主要分布在 30~70 nm 范围内,平均粒度约为 50 nm,壳层碳膜厚度为 5 nm。

2) 碳包覆氧化镍纳米颗粒具有介孔结构,由于毛细管凝聚作用,样品的 N<sub>2</sub> 吸附-脱附等温线出现滞后环,作为电极材料在三电极体系中,在 1.0 A·g<sup>-1</sup> 电流密度下,比容量为 172.4 F·g<sup>-1</sup>,具有较高的比容量和良好的电化学活性。

#### 参考文献 References

[1] Xu Pei, Zeng Wei, Luo Shaohong *et al. Electrochimica Acta*[J], 2017, 241: 41  
 [2] He Duanpeng, Niu Jin, Dou Meiling *et al. Electrochimica Acta* [J], 2017, 238: 310  
 [3] Shayeh J S, Sadeghinia M, Siadat S O R *et al. Journal of Colloid and Interface Science*[J], 2017, 496: 401  
 [4] Tajik S, Dubal D P, Gomez-Romero P *et al. International Journal of Hydrogen Energy*[J], 2017, 42(17): 123 84  
 [5] Zhang Y F, Park M, Kim H Y *et al. Journal of Colloid and Interface Science*[J], 2017, 500: 155  
 [6] Zhang Xuan, Luo Jiangshui, Tang Pengyi. *Nano Energy*[J],

- 2017, 31: 311
- [7] Marcinauskas L, Kavaliauskas Z, Valincius V. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2012, 28(10): 931
- [8] Zeng Yaping, Wang Liu, Wang Zhiyong *et al. Materials Today Communications*[J], 2015, 5: 70
- [9] Lv Jinlong, Wang Zhuqing, Liang Tongxiang *et al. Journal of Electroanalytical Chemistry*[J], 2017, 799: 595
- [10] Kim B K, Chabot V, Yu A P. *Electrochimica Acta*[J], 2013, 109: 370
- [11] Bang J H, Lee H M, An K H *et al. Applied Surface Science*[J], 2017, 415: 61
- [12] Lu Xingping, Hu Yating, Wang Li *et al. Electrochimica Acta* [J], 2016, 189: 158
- [13] Wei Zhiqiang, Xia Tiandong, Bai Lifeng *et al. Materials Letters*[J], 2006, 60(6): 766
- [14] Abdou J P, Reynolds K J, Pfau M R *et al. Polymer*[J], 2016, 91: 136
- [15] Li Xiaoping, Li Danping, Xu Jingcai *et al. Materials Research Bulletin*[J], 2017, 89: 280
- [16] Tian Meng, Sun Yueqing, Zhang Chuanfang. *Journal of Power Sources*[J], 2017, 364: 182
- [17] Li Hua, Xiao Deli, He Hua *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23(9): 2657
- [18] Wang Dewei, Wang Qihua, Wang Tingmei. *Inorganic Chemistry* [J], 2011, 50(14): 6482
- [19] Fan Xinzhuang, Lu Yonghong, Xu Haibo *et al. Journal of Materials Chemistry*[J], 2011, 21(46): 18 753
- [20] Liu Maocheng, Kong Lingbin, Lu Chao. *ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2012, 4(9): 4631

## Preparation and Electrochemical Performance of Carbon-encapsulated NiO Nanoparticles

Zhang Xudong<sup>1,2</sup>, Wei Zhiqiang<sup>1,2</sup>, Zhao Wenhua<sup>2</sup>, Bai Junshan<sup>2</sup>, Zhu Xueliang<sup>2</sup>, Jiang Jinlong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2. School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The core shell structure carbon-encapsulated NiO nanoparticles were prepared by DC arc discharging plasma technology. The microstructure of the samples were studied by X-ray diffraction (XRD), high resolution transmission electron microscopy (HRTEM), X-ray energy dispersive spectrometry (EDS) and surface physical adsorption. The electrochemical performances of the composites as the electrode materials for super-capacitors were investigated by cyclic voltammetry, galvanostatic charging-discharging and electrochemical impedance spectroscopy. The results indicate that the carbon-encapsulated NiO nanoparticles prepared by DC arc plasma technology possess typical core shell structure, the core of the particles is NiO with face centered cubic structure, and the outer shell is disordered carbon layer. The particle morphology exhibit cube structure with uniform particle size and good dispersion. The particle size distribution is in the range of 30~70 nm, the average particle size is 50 nm, and the thickness of the carbon shell is about 5 nm. The carbon-encapsulated NiO nanoparticles has high specific capacity and good electrochemical activity.

**Key words:** supercapacitor; carbon-encapsulated; NiO; core-shell structure; electrochemical performance

---

Corresponding author: Wei Zhiqiang, Ph. D., Professor, School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, Tel: 0086-931-2973780, E-mail: zqwei7411@163.com