

The Effect of PEDOT:PSS-Coated on the Electrochemical Performance of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ Cathode Materials

Jian Li^{1,2}, Liangqin Liu¹, Hongming Zhou^{1,2}, Leshan Hu¹

¹Institute of Materials Science and Engineering of Central South University, Changsha Hunan

²Zhengyuan Institute of Energy Storage Materials and Devices of Hunan Province, Changsha Hunan

Email: ziliao2000@126.com

Received: Jun. 29th, 2018; accepted: Jul. 16th, 2018; published: Jul. 24th, 2018

Abstract

The poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) coated $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ cathode material was successfully prepared by wet coating method, and their microstructure and electrochemical properties were studied. The conductive polymer films on the surface of the $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ particles are about 14 nm thick, and the PEDOT:PSS-coated $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ has good electrochemical performance. The first discharge specific capacity was 193.8 mAh/g at 0.1 C, and the capacity retention rate was 90.3% at 1C after 100 cycles. The PEDOT:PSS cladding layer has high electrical conductivity and can improve the electrical conductivity of the material. Therefore, the PEDOT:PSS-coated $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ has high discharge specific capacity, good cycle stability, and good rate performance.

Keywords

$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$, Conductive Polymer, Surface Coating, Electrochemical Performance

导电聚合物PEDOT:PSS包覆对 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料性能的影响

李 荐^{1,2}, 刘良秦¹, 周宏明^{1,2}, 胡乐善¹

¹中南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙

²湖南省正源储能材料与器件研究所, 湖南 长沙

Email: ziliao2000@126.com

收稿日期: 2018年6月29日; 录用日期: 2018年7月16日; 发布日期: 2018年7月24日

摘要

本文采用湿法包覆法成功制备了聚(3,4-亚乙基二氧噻吩):聚(苯乙烯磺酸盐) (PEDOT:PSS) 包覆的 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料, 研究了包覆改性前后材料的微观结构及电化学性能。 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 颗粒表面的聚合物 PEDOT:PSS 包覆层厚度大约为 14 nm, PEDOT:PSS 包覆的 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 具有良好的电化学性能, 在 0.1 C 倍率下首次放电比容量 193.8 mAh/g, 1 C 循环 100 次后容量保持率为 90.3%。PEDOT:PSS 包覆层具有高电导率, 可以提高材料的导电性, 因此 PEDOT:PSS 包覆的 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 具有高放电比容量、好的循环稳定性和良好的倍率性能。

关键词

$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$, 导电聚合物, 表面包覆, 电化学性能

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

锂离子电池(LIB)由于具有高能量密度和长使用寿命而被广泛用于便携式电子设备, 并且在电动汽车和能量存储系统等领域也有广泛的应用前景[1] [2] [3]。在传统的正极材料中, LiCoO_2 具有易于合成、循环性能好等优点, 使其在商用锂离子电池中应用最为广泛。但是其高成本、毒性大等缺点限制了它在电动汽车领域的应用。因此, 富镍层状 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ (NCA)和 $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$ 材料因其比容量高、低成本和低污染等优点而备受关注[4]-[9]。但是, 富镍层状 NCA 和 $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$ 材料高温循环时, 材料中的过渡金属会高电压下与电解质溶液发生副反应, 造成过渡金属的溶解以及电解液的分解。因此, 富镍层状正极材料展现出差的结构和热稳定性, 过充电时其循环稳定性差。为了克服这些问题, 研究者无机氧化物和导电聚合物包覆正极材料方面作了大量的研究[10]-[18]。

研究表明导电聚合物对正极材料进行表面改性, 有利于电荷的传递, 提高正极材料的电化学活性[19] [20]。在各种导电聚合物中, 聚(3,4-亚乙基二氧噻吩):聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)由于其高导电性和良好的电化学稳定性, 备受研究人员的青睐[21]。根据先前的研究报导表明 PEDOT:PSS 包覆可以提高材料的导电性和稳定性。使用导电聚合物 PEDOT:PSS 改性的硫正极, 锂硫电池中硫的利用率和容量保持率明显得到改善[22]。Dae 等人用 PEDOT:PSS 作为空气电极中氧化还原反应基体和粘合剂, 可以抑制碳和电解质之间的副反应并提高锂空气电池的循环性能[23]。PEDOT:PSS 也被引入作为锂离子电池的粘结剂, PEDOT:PSS 作为粘结剂可以提高电极材料的电导率和材料与集流体之间的附着力, 以提高材料的循环性能[24]。Liu 等人通过用 PEDOT 包覆层状 $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ 材料, 其倍率性能和循环性能得到提高[25]。Schougaard 等人通过电化学聚合法制备 PEDOT/LiFePO₄ 复合材料, 以提高材料的倍率性能[26]。鉴于先前的研究, 本文采用高温固相法合成了高容量的 NCA 正极材料, 用简单的湿法包覆制备了 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料, 通过 PEDOT:PSS 对 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 进行表面改性, 改善材料的循环性能及倍率性能。

2. 实验部分

2.1. $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 的制备

$\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}(\text{OH})_2$ 前驱体从金驰能源材料有限公司购入, 将前驱体 $\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}(\text{OH})_2$ 和 $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ (分析纯 AR)按照摩尔比 1:1.03 的比例混合研磨, 装入方形刚玉方舟中, 然后将方舟推入管式炉的恒温区域。接着在流动的氧气气氛中升温至 480°C 预烧 5 h, 750°C 烧结 12 h 得到 NCA 正极材料。

2.2. $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 的表面包覆改性

将 11.5 g PEDOT:PSS 溶液(Aldrich, 1.3 wt%水分散液)分散到 N-甲基吡咯烷酮(NMP)中, 随后加入 5 g NCA 正极材料于分散液中, 并将混合物加热到 60°C 搅拌 4 h。之后将混合物过滤, 在 100°C 下真空干燥 24 h, 得到 3 wt% PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料。

2.3. 电极的制备及电池的组装

将正极材料、炭黑、聚偏氟乙烯按照质量比 8:1:1 的比例进行研磨混合, 然后加入适量的 NMP 溶剂进行混合, 制成混合均匀的浆料。之后将浆料涂布到铝箔上, 置于 120°C 的真空干燥 12 h, 经过裁片得到正极极片。以锂为负极、Celgard 2400 聚丙烯微孔膜为隔膜和 NCA 极片为正极, 以 1.0 M $\text{LiPF}_6/\text{EC} + \text{DMC} + \text{EMC}$ (1:1:1, 体积比)作为电解液, 在充满氩气的手套箱中组装组成的 CR2032 型纽扣电池。

2.4. 表征和测试

未改性的 NCA 和包覆改性的 NCA 正极材料的晶体结构使用 XRD (Rigaku, Rint-2000)进行分析; 通过扫描电子显微镜(SEM, JEOL JSM-6300)和透射电子显微镜(TEM, JEOL JEM-3010)表征未包覆和改性的 NCA 颗粒的形态; 能量色散 X 射线光谱(EDX)被用于表面改性的 NCA 颗粒上的形态评估和表面元素表征; 热分析使用热重分析仪(NETZSCH STA 449C)进行表征:在氮气气氛中, 以 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率从 30 升至 700°C ; 采用红外光谱(Nicolet 6700)表征 NCA 改性前后表面物相的结构变化, 测试范围为 $400\sim 4000\text{ cm}^{-1}$ 。充放电测试采用新威电化学仪, 在 2.8~4.3 V 的电压范围内进行电池的充放电测试; 电化学阻抗谱(EIS)测试在 CHI 660A 电化学工作站上进行, 参数设定为: 频率范围 0.01 Hz~100 kHz, 交流幅值 5 mV, 工作温度为 25°C 。

3. 结果与讨论

3.1. XRD 结构分析

未改性的 NCA 和 3 wt% PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料的 XRD 图(如图 1)所示。表明合成的样品均为 $\alpha\text{-NaFeO}_2$ 结构, 无杂相, 特征峰(108)/(110)和(006)/(102)的分裂明显, $I(003)/I(104)$ 的强度比值大于 1.2, 说明材料具有有序的层状结构和良好的结晶性[27]。对于包覆的样品, XRD 图表明所有衍射峰与原始样品一致, 未发生明显的变化且没有杂质或第二相出现。通过结构精修得出材料的晶格常数 NCA ($a = 2.8621\text{ \AA}$, $c = 14.1551\text{ \AA}$)和 PEDOT:PSS 包覆的 NCA ($a = 2.8623\text{ \AA}$, $c = 14.1564\text{ \AA}$), 表明 NCA 经包覆改性后材料的晶体结构没有发生明显变化。同时也说明 XRD 不能检测出含量少且薄的有机物包覆层。

3.2. FT-IR 和 TG 分析

通过比较未改性的 NCA 和表面改性的 NCA 颗粒的 FT-IR 光谱, 进一步证实了表面改性的 NCA 颗粒上存在聚合物 PEDOT:PSS。如图 2 所示发现未改性的 NCA 和表面改性的 NCA 具有相似的光谱, 同时

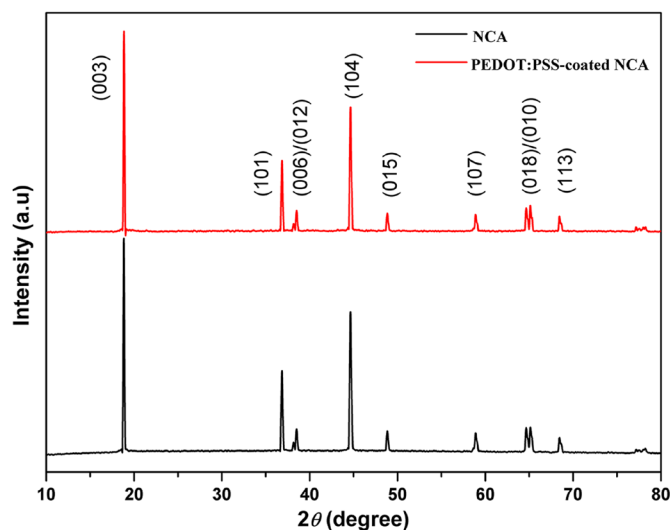


Figure 1. The XRD patterns of pristine and PEDOT:PSS-coated NCA
图 1. 未改性 NCA 和 PEDOT:PSS 包覆 NCA 的 XRD 图

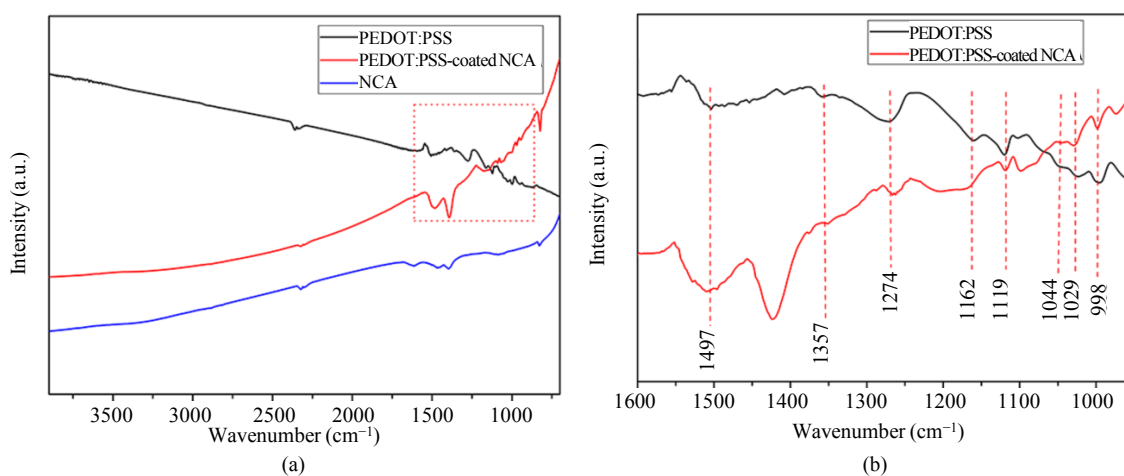


Figure 2. The FT-IR spectra of pristine NCA, PEDOT:PSS, and PEDOT:PSS-coated NCA: (a) full scale and (b) magnified scale
图 2. 未改性 NCA 和 PEDOT:PSS 包覆 NCA 的 FT-IR 图: (a) 全图和(b) 局部放大图

在 566 cm^{-1} 处出现了 NCA 颗粒中 M-O 键(M 为金属元素 Ni、Co、Al)的振动峰, 表明在该温度下 NCA 和 PEDOT:PSS 之间没有发生化学反应[28]。PEDOT:PSS 包覆的 NCA 具有典型的 PEDOT:PSS 吸收峰, 在放大的图中, 波数为 1497, 1357, 1162, 1119 处的吸收峰分别对应 PEDOT:PSS 中的官能团 C=C, C-C, S-O, S-苯键的振动峰。波数在 1274, 1044, 1029, 998 处对应 PEDOT:PSS 中的官能团 C-O-C 的弯曲振动峰, 因此从红外光谱可以证明 PEDOT:PSS 对 NCA 正极材料进行了表面包覆[29]。为了确定 PEDOT:PSS 的包覆质量, 通过热重分析获得如图 3 所示, PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料中实际的 PEDOT:PSS 含量估计为 2.62 wt%, 与理论质量 3 wt% 非常接近。

3.3. 形貌分析

未改性的 NCA 和 3 wt% PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料颗粒的形貌用 SEM 和 TEM 表征。显然, 从图 4(a), 图 4(b)看出这两种样品的形貌没有明显区别, 都是一次颗粒紧密团聚而成的球形或类球形的

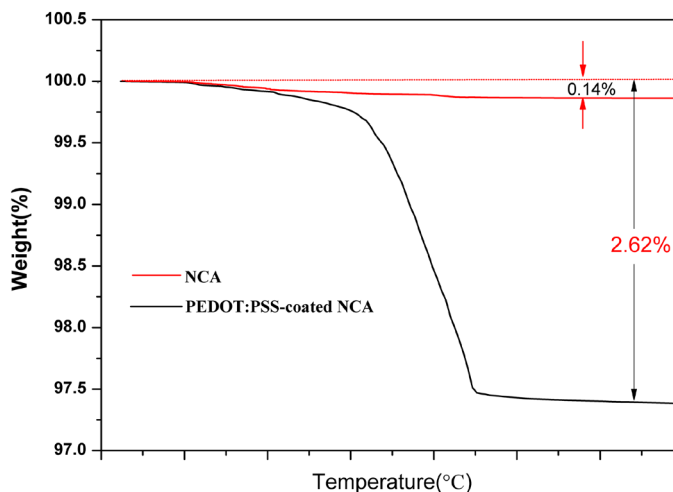


Figure 3. TGA curves of pristine and PEDOT:PSS-coated NCA

图 3. 未改性 NCA 和 PEDOT:PSS 包覆 NCA 的热重图

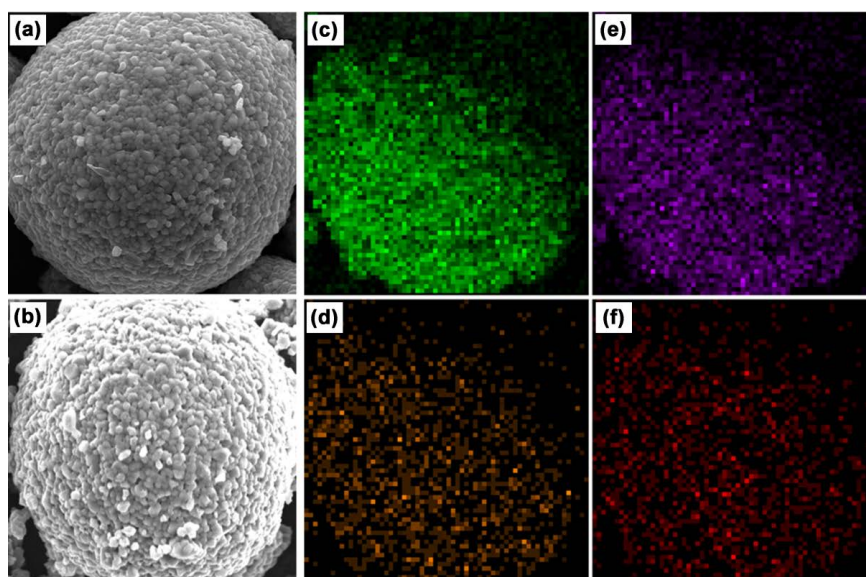


Figure 4. SEM images of (a) pristine NCA and (b) PEDOT:PSS-coated NCA particles and EDX mapping images of (c) Ni, (d) Al, (e) Co and (f) sulfur in the PEDOT:PSS-coated NCA particles

图 4. 未改性 NCA (a)和 PEDOT:PSS 包覆 NCA (b)颗粒的 SEM 图以及 PEDOT:PSS 包覆 NCA 的 EDX 谱图: (c) Ni, (d) Al, (e) Co 和(f) 硫元素

二次颗粒,表明包覆改性没有破坏 NCA 颗粒的形貌。通过 EDX 能谱图检测 PEDOT:PSS 包覆 NCA 颗粒表面 Ni(c)、Co(e)、Al(d)、S(f)元素的分布,从图 4(c)~(f)中可以观察到活性材料 NCA 中 Ni、Co、Al 元素的均匀分布,同时也可以看出导电聚合物 PEDOT:PSS 中 S 元素的均匀分布,这表明导电聚合物 PEDOT:PSS 均匀的包覆在 NCA 正极材料的表面。

图 5 显示了用聚合物 PEDOT:PSS 进行包覆改性之前和之后的 NCA 材料颗粒的高分辨率 TEM 图像。未改性的 NCA 颗粒表面光滑且没有明显的包覆层,如图 5(a)所示。相反,图 5(b)中所示的表面包覆改性的 NCA 颗粒边缘的放大图像,图像显示有均匀包覆的导电聚合物 PEDOT:PSS 薄层,其厚度约为 14 nm。NCA 颗粒表面均匀包覆的导电聚合物 PEDOT:PSS,有利于材料在充放电过程中的电子转移。

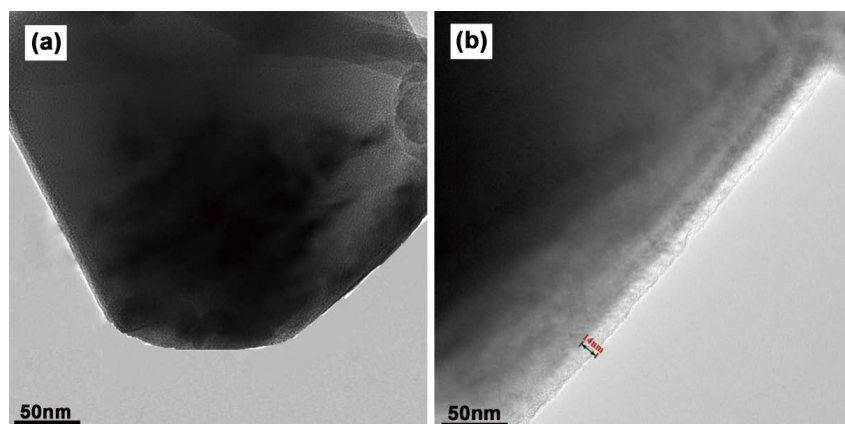


Figure 5. TEM images of (a) pristine NCA and (b) PEDOT:PSS-coated NCA particles
图 5. 未改性 NCA (a)和 PEDOT:PSS 包覆 NCA (b)颗粒的 TEM 图

3.4. 电化学性能分析

通过组装 2032 型电池来测试未改性 NCA 和 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料的电化学性能。图 6(a) 为未改性 NCA 和 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料的首次充放电曲线，从图可知在 0.1 C (1 C = 180 mAh/g)倍率下，由 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料的初始放电容量(193.8 mAh/g)比未改性的 NCA 正极材料的初始放电容量(191 mAh/g)稍高。这主要是导电聚合物 PEDOT:PSS 包覆层降低活性正极颗粒之间的接触电阻并促进材料中的电子传递，因此 PEDOT:PSS 提高了活性材料的可逆容量，所以由导电聚合物 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料表现出较高的放电容量。

在低倍率 0.1 C 下循环 2 圈后，再用 1 C 倍率测试未改性 NCA 和 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料的循环性能，并比较这两种材料的容量保持率如图 6(b)。表面包覆 PEDOT:PSS 的 NCA 正极材料，其循环性能也明显得到改善。PEDOT:PSS 表面改性的 NCA 正极材料在 100 次循环后的容量损失仅为 9.7%，而未改性的材料容量损失为 15%。表面包覆改性的 NCA 正极材料有良好的容量保留率主要因为其颗粒表面上存在导电聚合物薄膜 PEDOT:PSS。表明导电聚合物膜用作保护层覆盖在活性材料颗粒的表面，阻碍了颗粒与电解质的直接接触，缓解电解质在高电压下的氧化分解，从而可以提高材料的结构稳定性。

图 7 为在同一温度下未改性 NCA 和 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料的倍率性能。电池以 0.5 C 倍率充电至 4.3 V，并以 0.2 至 5.0 C 的不同倍率进行放电。从图 7 可以看出未改性 NCA 和 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料放电容量之间的关系。使用导电聚合物 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 在高倍率下其放电容量明显高于未改性的 NCA 正极材料，如使用导电聚合物 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料在 5 C 倍率下放电比容量为 155.6 mAh/g，而未改性的 NCA 电极在相同的倍率下其容量为 148.7 mAh/g。这表明通过在正极材料表面包覆导电聚合物，为正极材料提供了良好的导电网络，因此其电子导电性得到改善，这有利于电荷转移反应，降低了材料在高倍率下的极化，从而提高了材料倍率性能。

交流阻抗(EIS)提供有关电极电化学反应动力学及电极界面结构信息。为了解导电聚合物 PEDOT:PSS 包覆层 NCA 正极材料电池交流阻抗特性的影响，测试了电池循环前后的交流阻抗。图 8(a)为在室温下，循环前未改性 NCA 和 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料的交流阻抗图谱，主要由在高频区的半圆弧和低频区的斜率为 45°的直线组成，这分别反映的是电荷传递电阻和 Li⁺在正极材料内部的迁移能力。可以从图 8(a)可以得出导电聚合物 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 的电极和电解质之间的电荷转移电阻(R_{ct})为 42.4 Ω，而为改性的 NCA 材料的 R_{ct} 为 58.27 Ω，表明导电聚合物 PEDOT:PSS 的包覆使得材料的电荷转移电阻降低，从而提高了材料的电化学性能。图 8(b)为在倍率 1 C 下，循环 100 圈后未改性 NCA 和 PEDOT:PSS

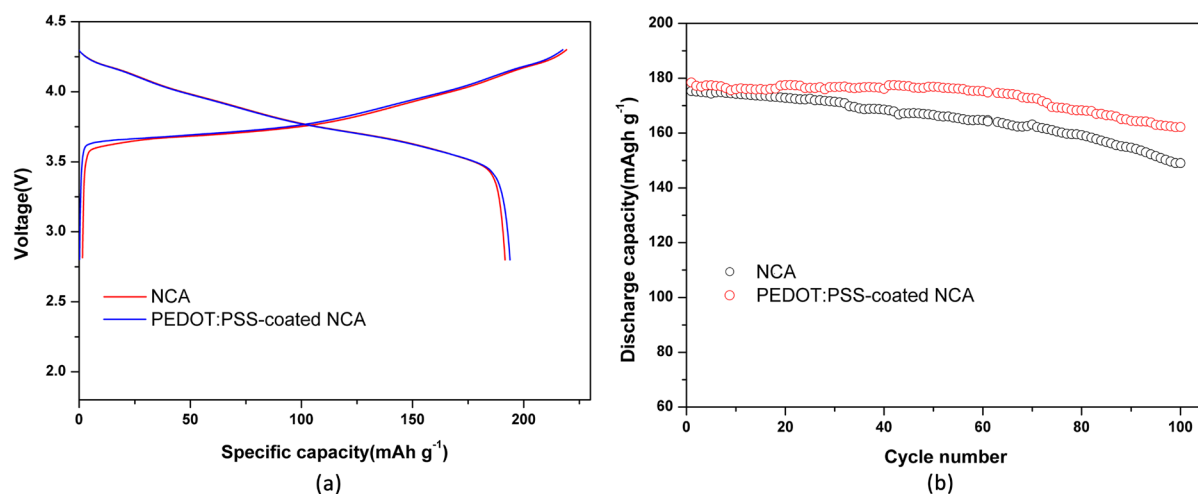


Figure 6. (a) Initial charge and discharge curves of pristine NCA and PEDOT:PSS-coated NCA materials at 0.1 C rate; (b) Cycling behavior of pristine NCA and PEDOT:PSS-coated NCA materials at 1 C rate

图 6. (a) 0.1 C 倍率下未改性 NCA 和 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料的首次充放电曲线; (b) 1 C 倍率下未改性 NCA 和 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料的循环性能曲线

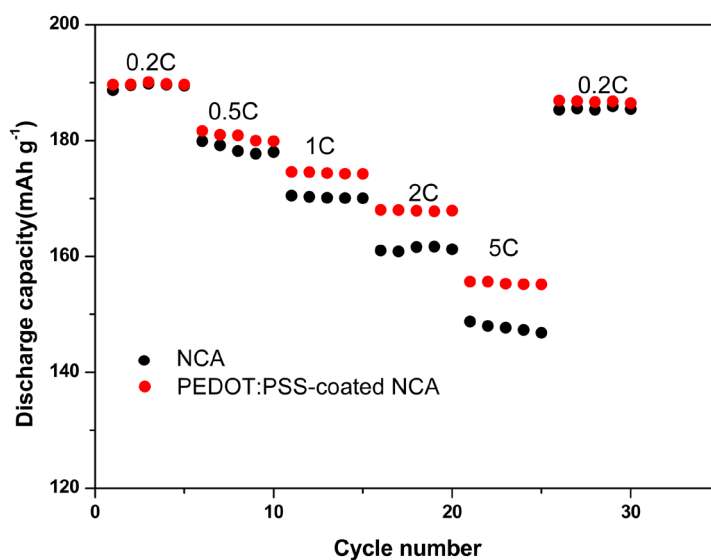


Figure 7. The rate capability for pristine NCA and PEDOT:PSS-coated NCA materials

图 7. 未改性 NCA 和 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料的倍率性能

包覆的 NCA 正极材料的交流阻抗图谱。从图中可以看出两个明显的半圆，根据之前的交流阻抗研究，高频区域内的半圆为 Li⁺离子通过电极上的表面膜(Rf)迁移而产生的电阻，而在中低频范围内的半圆为电极和电解质之间的电荷转移电阻(Rct) [30] [31]。表面包覆 PEDOT:PSS 的 NCA 材料的电池的表面膜电阻 (137.8 Ω)和电荷转移电阻(220.7 Ω)均低于未改性的 NCA 材料的表面膜电阻(202.4 Ω)和电荷转移电阻 (493.3 Ω)。这说明导电聚合物包覆层有效的抑制了电解质的有效分解，阻碍了绝缘 LiF 的沉积。材料表面上的导电聚合物层 PEDOT:PSS 也将在较低导电性的 NCA 颗粒之间形成良好的导电网络，有助于电子转移并且保护了 NCA 颗粒免受 HF 的侵蚀。这些结果表明，通过导电聚合物 PEDOT:PSS 对 NCA 正极材料的表面包覆，能有效的降低材料循环过程中的界面电阻。

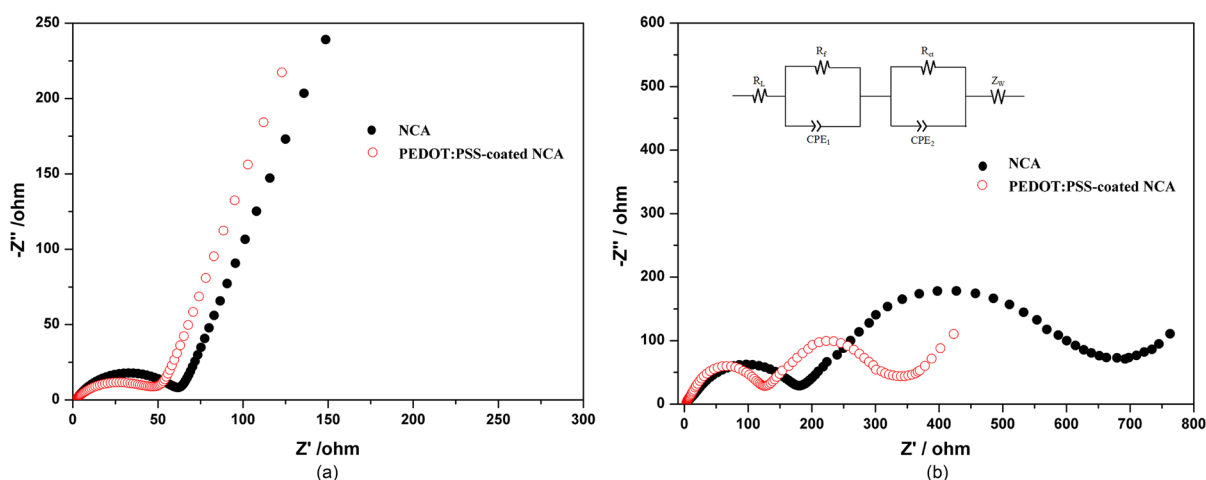


Figure 8. AC impedance spectra of pristine NCA and PEDOT:PSS-coated NCA materials: (a) before cycle; (b) after 100 cycles

图 8. 未改性 NCA 和 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料的交流阻抗图谱：(a) 循环前；(b) 循环 100 次之后

4. 结论

用高温固相法合成具有高放电比容量的 NCA 正极材料，并通过湿法包覆法合成了 PEDOT:PSS 包覆的 NCA 正极材料。表面包覆 PEDOT:PSS 的 NCA 正极材料与未改性的 NCA 材料相比，其具有更高的初始放电比容量和更稳定的循环性能。由于导电聚合物 PEDOT:PSS 具有高的电子电导率，包覆在 NCA 正极表面上形成的良好的导电网络，增强了其高倍率性能。因此，用导电聚合物 PEDOT:PSS 对 NCA 正极材料进行表面包覆，提高了材料的可逆容量、循环稳定性和倍率性能。

参考文献

- [1] Bruce, P.G., Scrosati, B. and Tarascon, J.M. (2008) Nanomaterials for Rechargeable Lithium Batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, **47**, 2930-2946. <https://doi.org/10.1002/anie.200702505>
- [2] Etacheri, V., Marom, R., Elazari, R., Salitra, G. and Aurbach, D. (2011) Challenges in the Development of Advanced Li-Ion Batteries: A Review. *Energy & Environmental Science*, **4**, 3243-3262. <https://doi.org/10.1039/c1ee01598b>
- [3] Yang, Z., Zhang, J., Kintner-Meyer, M.C.W., Lu, X., Choi, D., Lemmon, J.P. and Liu, J. (2011) Electrochemical Energy Storage for Green Grid. *Chemical Reviews*, **111**, 3577-3613. <https://doi.org/10.1021/cr100290v>
- [4] Sun, Y.-K., Kim, D.-H., Jung, H.-G., Myung, S.-T. and Amine, K. (2010) High-Voltage Performance of Concentration-Gradient $\text{Li}[\text{Ni}_{0.67}\text{Co}_{0.15}\text{Mn}_{0.18}]\text{O}_2$ Cathode Material for Lithium-Ion Batteries. *Electrochimica Acta*, **55**, 8621-8627. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.07.074>
- [5] Wu, N., Wu, H., Yuan, W., Liu, S., Liao, J. and Zhang, Y. (2015) Facile Synthesis of One-Dimensional $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ Microrods as Advanced Cathode Materials for Lithium Ion Batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, **3**, 13648-13652. <https://doi.org/10.1039/C5TA02767E>
- [6] Xiong, X., Wang, Z., Yan, G., Guo, H. and Li, X. (2014) Role of V_2O_5 Coating on LiNiO_2 -Based Materials for Lithium Ion Battery. *Journal of Power Sources*, **245**, 183-193. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.133>
- [7] Liu, W., Oh, P., Liu, X., Lee, M.J., Cho, W., Chae, S., Kim, Y. and Cho, J. (2015) Nickel-Rich Layered Lithium Transition-Metal Oxide for High-Energy Lithium-Ion Batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, **54**, 4440-4457. <https://doi.org/10.1002/anie.201409262>
- [8] Jo, M., Noh, M., Oh, P., Kim, Y. and Cho, J. (2014) A New High Power $\text{LiNi}_{0.81}\text{Co}_{0.1}\text{Al}_{0.09}\text{O}_2$ Cathode Material for Lithium-Ion Batteries. *Advanced Energy Materials*, **4**, Article ID: 1301583. <https://doi.org/10.1002/aenm.201301583>
- [9] Wang, D., Li, X., Wang, W., Wang, Z., Guo, H. and Ru, J. (2015) Improvement of High Voltage Electrochemical Performance of $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ Cathode Materials via Li_2ZrO_3 Coating. *Ceramics International*, **41**, 6663-6667. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.100>
- [10] Fan, Y., Wang, J., Tang, Z., He, W. and Zhang, J. (2007) Effects of the Nanostructured SiO_2 Coating on the Perfor-

- mance of $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ Cathode Materials for High-Voltage Li-Ion Batteries. *Electrochimica Acta*, **52**, 3870-3875. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.10.063>
- [11] Cho, Y., Lee, Y.-S., Park, S.-A., Lee, Y. and Cho, J. (2010) $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ Cathode Materials Prepared by TiO_2 Nanoparticle Coatings on $\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}(\text{OH})_2$ Precursors. *Electrochimica Acta*, **56**, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.08.074>
- [12] Chen, Z., Qin, Y., Amine, K. and Sun, Y.K. (2010) Role of Surface Coating on Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Materials Chemistry*, **20**, 7606-7612. <https://doi.org/10.1039/c0jm00154f>
- [13] Du, K., Xie, H., Hu, G., Peng, Z., Cao, Y. and Yu, F. (2016) Enhancing the Thermal and Upper Voltage Performance of Ni-Rich Cathode Material by a Homogeneous and Facile Coating Method: Spray-Drying Coating with Nano- Al_2O_3 . *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 17713-17720. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b05629>
- [14] Mauger, A. and Julien, C. (2014) Surface Modifications of Electrode Materials for Lithium-Ion Batteries: Status and Trends. *Ionics*, **20**, 751-787. <https://doi.org/10.1007/s11581-014-1131-2>
- [15] Lai, Y.-Q., Xu, M., Zhang, Z.-A., Gao, C.-H., Wang, P. and Yu, Z.-Y. (2016) Optimized Structure Stability and Electrochemical Performance of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ by Sputtering Nanoscale Zn Film. *Journal of Power Sources*, **309**, 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.01.079>
- [16] Lee, K.-S., Sun, Y.-K., Noh, J., Song, K.S. and Kim, D.-W. (2009) Improvement of High Voltage Cycling Performance and Thermal Stability of Lithium-Ion Cells by Use of a Thiophene Additive. *Electrochemistry Communications*, **11**, 1900-1903. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2009.08.012>
- [17] Sinha, N.N. and Munichandraiah, N. (2009) Synthesis and Characterization of Carbon-Coated $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ in a Single Step by an Inverse Microemulsion Route. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **1**, 1241-1249. <https://doi.org/10.1021/am900120s>
- [18] Lepage, D., Michot, C., Liang, G., Gauthier, M. and Schougaard, S.B. (2011) A Soft Chemistry Approach to Coating of LiFePO_4 with a Conducting Polymer. *Angewandte Chemie International Edition*, **50**, 6884-6887. <https://doi.org/10.1002/anie.201101661>
- [19] Cao, J., Hu, G., Peng, Z., Du, K. and Cao, Y. (2015) Polypyrrole-Coated LiCoO_2 Nanocomposite with Enhanced Electrochemical Properties at High Voltage for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, **281**, 49-55. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.174>
- [20] Xiong, X., Ding, D., Wang, Z., Huang, B., Guo, H. and Li, X. (2014) Surface Modification of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ with Conducting Polypyrrole. *Journal of Solid State Electrochemistry*, **18**, 2619-2624. <https://doi.org/10.1007/s10008-014-2519-7>
- [21] Casado, N., Hernández, G., Veloso, A., Devaraj, S., Mecerreyes, D. and Armand, M. (2016) Pedot Radical Polymer with Synergetic Redox and Electrical Properties. *ACS Macro Letters*, **5**, 59-64. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.5b00811>
- [22] Li, Y., Yuan, L., Li, Z., Qi, Y., Wu, C., Liu, J. and Huang, Y. (2015) Improving the Electrochemical Performance of a Lithium-Sulfur Battery with a Conductive Polymer-Coated Sulfur Cathode. *RSC Advances*, **5**, 44160-44164. <https://doi.org/10.1039/C5RA05481H>
- [23] Yoon, D.H., Yoon, S.H., Ryu, K.S. and Park, P.J. (2016) PEDOT:PSS as Multi-Functional Composite Material for Enhanced Li-Air-Battery Air Electrodes. *Scientific Reports*, **6**, 19962-19970.
- [24] Sandu, G., Ernould, B., Rolland, J., Cheminet, N., Brassinne, J., Das, P.R., Filinchuk, Y., Cheng, L., Komsysiaka, L., Dubois, P., Melinte, S., Gohy, J.-F., Lazzaroni, R. and Vlad, A. (2017) Mechanochemical Synthesis of Pedot: Pss Hydrogels for Aqueous Formulation of Li-Ion Battery Electrodes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 34865-34874. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b08937>
- [25] Liu, X., Li, H., Li, D., Ishida, M. and Zhou, H. (2013) Pedot Modified $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ with Enhanced Electrochemical Performance for Lithium Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, **243**, 374-380. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.037>
- [26] Trinh, N.D., Saulnier, M., Lepage, D. and Schougaard, S.B. (2013) Conductive Polymer Film Supporting LiFePO_4 as Composite Cathode for Lithium Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, **221**, 284-289. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.08.006>
- [27] Woo, S.-U., Yoon, C.S., Amine, K., Belharouak, I. and Sun, Y.-K. (2007) Significant Improvement of Electrochemical Performance of AlF_3 -Coated $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ Cathode Materials. *Journal of the Electrochemical Society*, **154**, A1005-A1009. <https://doi.org/10.1149/1.2776160>
- [28] Wang, Z., Sun, Y., Chen, L. and Huang, X. (2004) Electrochemical Characterization of Positive Electrode Material $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ and Compatibility with Electrolyte for Lithium-Ion Batteries. *Journal of the Electrochemical Society*, **151**, A914-A921. <https://doi.org/10.1149/1.1740781>
- [29] Groenendaal, L., Jonas, F., Freitag, D., Pielartzik, H. and Reynolds, J.R. (2000) Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) and

Its Derivatives: Past, Present, and Future. *Advanced Materials*, **12**, 481-494.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(200004\)12:7<481::AID-ADMA481>3.0.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(200004)12:7<481::AID-ADMA481>3.0.CO;2-C)

- [30] Bai, Y., Wang, X., Zhang, X., Shu, H., Yang, X., Hu, B., Wei, Q., Wu, H. and Song, Y. (2013) The Kinetics of Li-Ion Deintercalation in the Li-Rich Layered $\text{Li}_{1.12}[\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}]_{0.89}\text{O}_2$ Studied by Electrochemical Impedance Spectroscopy and Galvanostatic Intermittent Titration Technique. *Electrochimica Acta*, **109**, 355-364. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.06.134>
- [31] Liu, T., Garsuch, A., Chesneau, F. and Lucht, B.L. (2014) Surface Phenomena of High Energy $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2/\text{Graphite}$ Cells at High Temperature and High Cutoff Voltages. *Journal of Power Sources*, **269**, 920-926. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.051>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2331-012X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: amc@hanspub.org