

# 吩嗪-芘共聚物电极新材料的制备及储能性能研究

费强,徐立环,苏畅\*

(沈阳化工大学,辽宁沈阳 110142)

**摘要:**以 5,10-二氢吩嗪和 1,6-二溴芘为原料,通过 Buchwald-Hartwig 芳胺化反应合成出新型聚合物聚(吩嗪-芘)(p-PyPZ),将其作为有机锂电池正极材料,研究其电化学和电池性能。通过 FT-IR 及 XPS 对新型聚合物材料的结构形貌进行表征,并通过电化学循环伏安(CV)法对其性能进行测试。结果表明,聚合物 p-PyPZ 具有多重氧化还原特征,在 3.590/3.447 V 处出现芘结构单元对应的氧化还原特征峰,表明新型共聚物中芘结构单元即作为链接单元,同时参与氧化还原过程,使制备的电极材料具有多电子储能特性。作为锂离子电池正极材料,聚合物 p-PyPZ 表现出优良的循环稳定性。在电流密度为 20 mA/g 的条件下,其稳定放电比容量达到 112.1 mAh/g,经过 50 圈充放电循环后仍能保持在 113 mAh/g。在 20、50、100、200 mA/g 和 500 mA/g 的电流密度下的放电比容量分别稳定在 114.7、109.6、103、96.6 mAh/g 和 92.1 mAh/g。

**关键词:**有机材料;正极; $\pi$ 共轭;吩嗪;芘

中图分类号:TQ152

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)03-0118-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.03.022

## Preparation of phenazine-pyrene copolymer for electrode materials and study on its energy storage performance

FEI Qiang, XU Li-huan, SU Chang\*

(Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

**Abstract:** Taking 5,10-dihydrophenazine and 1,6-dibromopyrene as raw materials, poly(phenazine-pyrene) (p-PyPZ), a novel polymer, is synthesized through the Buchwald-Hartwig arylation reaction, and used as lithium battery cathode materials. Its electrochemistry and battery performance are studied, its structural morphology is characterized by means of FT-IR and XPS, and its performance is tested through electrochemical cyclic voltammetry (CV). The results show that the p-PyPZ polymer has multiple redox characteristics, and the redox characteristic peak corresponding to the pyrene structural unit appears at 3.590/3.447 V, indicating that the pyrene structural unit in the novel copolymer serves as a linking unit and participates in the redox process at the same time, making the prepared electrode material have multi-electron energy storage properties. As a cathode material for lithium-ion battery, p-PyPZ polymer exhibits excellent cycle stability. At a current density of 20 mA·g<sup>-1</sup>, its stable discharge specific capacity reaches 112.1 mAh·g<sup>-1</sup>, which can still remain at 113 mAh·g<sup>-1</sup> after 50 charge-discharge cycles. Its discharge specific capacities are stable at 114.7 mAh·g<sup>-1</sup>, 109.6 mAh·g<sup>-1</sup>, 103 mAh·g<sup>-1</sup>, 96.6 mAh·g<sup>-1</sup> and 92.1 mAh·g<sup>-1</sup>, respectively at current densities of 20 mA·g<sup>-1</sup>, 50 mA·g<sup>-1</sup>, 100 mA·g<sup>-1</sup>, 200 mA·g<sup>-1</sup> and 500 mA·g<sup>-1</sup>.

**Key words:** organic materials; cathode;  $\pi$ -conjugation; phenazine; pyrene

有机正极材料具有资源可持续、价格低廉以及天然丰富的元素(C、H、N、O、S等)等优势,可以作为无极电极材料最理想的替代品<sup>[1-2]</sup>。目前,有机电极材料主要分为导电聚合物<sup>[3-4]</sup>、有机硫化物<sup>[5-6]</sup>、有机自由基化合物<sup>[7]</sup>和共轭羰基化合物<sup>[8-9]</sup>等。在有机自由基化合物中,芳胺类化合物中的N原子作为活性中心可以为电池提供氧化还原电位以及苯环中 $\pi$ 键的共轭作用而具有优异的导电性,同时还可以稳定以N原子的氧化活性中心,以此来设计具有更高电压的有机正极。

吩嗪作为芳胺类化合物的典型代表,具有无毒性、较低的成本以及自身较高的放电电压(通常在3.0 V以上)。与其他种类的有机正极材料相比,吩嗪的多电子氧化还原活性中心会使吩嗪单元在发生氧化还原过程的中间体具有更好的稳定性,从而提高电池的电化学性能。在此基础上再对吩嗪单元进行 $\pi$ 共轭延伸<sup>[10]</sup>,使得体系内电荷密度分散,提高氧化活性电位。此前有文献报道利用苯环<sup>[11-12]</sup>、吩噻嗪、二苯胺<sup>[13]</sup>和三苯胺等对吩嗪单元进行 $\pi$ 共轭延伸。而作为探针与合成材料的芘在这方面同样具

收稿日期:2023-05-18;修回日期:2024-01-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51573099);辽宁省科技厅基金项目(LJ2020004,LJ2020005)

作者简介:费强(1997-),男,硕士生,研究方向为锂离子电池正极材料,1040608639@qq.com;苏畅(1975-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为新能源材料与储能技术,通讯联系人,suchang@syuct.edu.cn。

有优异的能力,其单体的高产率和低成本,可以经济有效地实现大规模生产,同时茈单元的共面分子结构和扩展的  $\pi$  共轭骨架赋予了茈的高度可逆性和掺杂/去掺杂的能力,使茈成为极具前途的有机电极材料。除此之外,在茈单体上存在多个活性位点,可以通过控制聚合物的结构和物理性质来提高 LIBs 的氧化还原活性和电化学性能。

笔者主要对吩嗪单元进行  $\pi$  共轭骨架的延伸,采用的延伸结构为茈。通过 Buchwald-Hartwig 芳胺化反应,将 5,10-二氢吩嗪与 1,6-二溴茈反应制备了新型聚合物聚(吩嗪-茈)(p-PyPZ)。同时对其作为锂电池正极材料时的循环稳定性和倍率性能进行了分析。

## 1 仪器及试剂

主要药品:1,6-二溴茈、醋酸钯与三叔丁基膦,上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产;吩嗪、叔丁醇钠,上海麦克林生化科技有限公司生产;连二亚硫酸钠、二氯甲烷,天津市大茂化学试剂厂生产。

实验仪器:LAND 电池测试系统(CT2001A 型),武汉金诺电子有限公司生产,使用范围为 5 V/10 mA,实验在室温下进行;在 2.0~4.3 V 电压范围下进行恒定电流密度的充放电测试;以 20、50、100、200、500 mA/g 不同的电流密度进行阶梯式充放电性能测试;利用上海辰华 CHI660E 型电化学工作站,在 1.5~4.5 V 的电压范围进行循环伏安(CV)测试,扫描速率为 1 mV/s,测试过程中以锂片作参比电极。在开路电压 2.265 7 V、测试频率为 0.01~100 kHz、振幅为 5 mV 的条件下进行电化学阻抗谱(EIS)测试,测试过程中同样以锂片作参比电极。

表征仪器:利用美国赛默飞世尔公司生产的 Nicolet iS50 型光谱仪进行傅里叶变换显微红外光谱(FT-IR)测试;利用日本电力公司生产的 JSM-IT800 型高低真空扫描电镜观测样品的形貌;利用美国 Thermo Fisher Scientific Inc. 公司生产 ESCALAB 250Xi 光谱仪对样品进行 XPS 测试;利用德国布鲁克公司生产的 D8 Advance 型 X 射线衍射仪进行 XRD 测试;利用德国耐驰仪器制造有限公司生产的 STA 449 F3 型同步热分析仪进行综合热分析。

## 2 实验部分

### 2.1 聚合物 p-PyPZ 的合成过程

聚合物 p-PyPZ 的合成过程如图 1 所示。

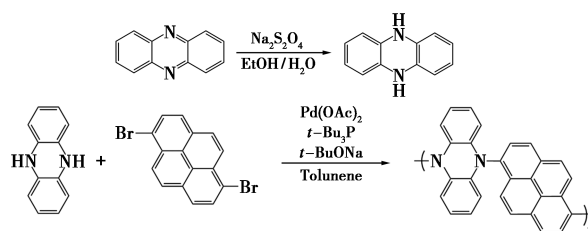


图 1 聚合物 p-PyPZ 的合成步骤

聚合物 p-PyPZ 的合成过程分两步进行,首先制取 5,10-二氢吩嗪:将 1.44 g 的吩嗪(8 mmol)溶解于 30 mL 用氮气吹扫的无水乙醇中,加入到 250 mL 的烧瓶内,氮气环境下剧烈搅拌 15 min。再将 16.70 g(96 mmol)连二亚硫酸钠( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ , 俗称保险粉)溶解在 120 mL 用氮气吹扫的去离子水中,加入烧瓶内。氮气环境下,加热至回流搅拌反应 4 h 左右,直至蓝色固体完全消失。反应结束后,冷水过滤 3 次,得到 5,10-二氢吩嗪(浅绿色固体)。真空干燥箱内 60℃ 干燥,由于该物质化学性质较为活泼,应在干燥后立即用于下一步反应。

用 Buchwald-Hartwig 芳胺化反应合成聚合物 p-PyPZ,具体步骤为:将 1.086 g 的 5,10-二氢吩嗪(6 mmol)、2.160 g 的 1,6-二溴茈(6 mmol)、0.027 g 的醋酸钯(0.12 mmol)、14.41 g 的叔丁醇钠(15 mmol)溶于 120 mL 甲苯中,加入到 250 mL 两口烧瓶内,氮气环境下剧烈搅拌 15 min。将 58  $\mu\text{L}$  的三叔丁基膦(0.24 mmol)溶于 10 mL 的甲苯中,加入烧瓶内,氮气环境加热至 110℃ 搅拌反应 16 h。反应结束后冷却,悬浮在二氯甲烷中,用水洗涤 3 次。过滤后在 60℃ 的真空干燥箱内干燥得到产物。

### 2.2 锂离子半电池的制备

采用纽扣式电池组装方式,采用涂膜法将 50% 制备的电极材料、20% 的导电剂(Super P)、20% 的碳纳米管(盐酸处理)以及 10% 的粘结剂(PVDF)均匀分散在 N-甲基吡咯烷酮(NMP)中,利用研钵制成可拉成丝状的浆料,用涂膜制备器厚度为 120  $\mu\text{m}$  侧均匀地涂在干燥的铝箔上。在 60℃ 真空干燥箱内干燥 24 h,用切片剂切成直径为 15 mm 的圆片状,60℃ 真空干燥 12 h 后备用。

电池组装在充满氩气的手套箱内进行,组装的电池为 CR2032 型,组装条件:水氧值小于 0.01  $\mu\text{L/L}$  以保证锂电池内部环境,箱压为 -4~4 mbar 以确保组装过程的顺利进行。组装顺序为负极壳、弹片、垫片(钢片)、锂片、隔膜、电极极片、正极壳。其中,在弹片与垫片、锂片与隔膜、隔膜与电极极片和极片与

正极壳间滴加规格为 1 mol/L  $\text{LiPF}_6$  [ $V(\text{EC}) : V(\text{DMC}) : V(\text{EMC}) = 1 : 1 : 1$ ] 的电解液。组装完成后,利用封口机将半电池封口以防空气进入,为使电解液充分分散,常温静置 12 h。再对静置后的电池进行电化学测试

### 3 结果与分析

#### 3.1 材料表征分析

##### 3.1.1 红外分析

新型聚合物材料 p-PyPZ 的 FT-IR 谱图如图 2 所示。

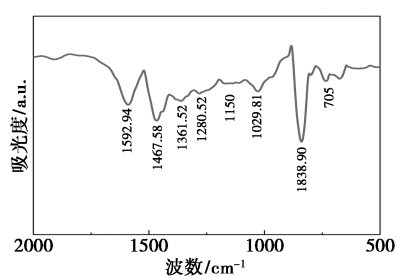


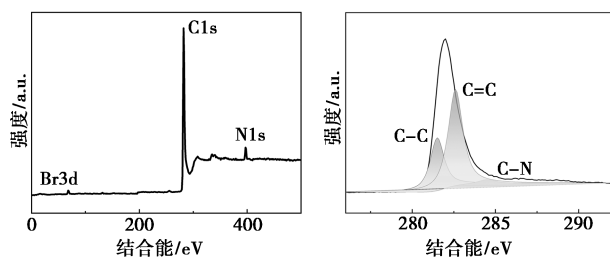
图 2 新材料 p-PyPZ 红外光谱图

从图 2 中可以看出,苯环的骨架振动峰在  $1467.58 \text{ cm}^{-1}$  与  $1592.54 \text{ cm}^{-1}$  处,分别对应苯环中的 C—C 键与 C=C 键,其在萘单元与吩嗪单元上均有体现。而苯环中 C—H 的伸缩振动峰在  $1361.52 \text{ cm}^{-1}$  处,在  $1280.52 \text{ cm}^{-1}$  处的拉伸振动峰为聚合物中苯环与 N 原子之间即 C—N 键的吸收峰,这些为吩嗪单元的主要特征峰。而萘的特征峰主要为  $705 \text{ cm}^{-1}$  和  $1150 \text{ cm}^{-1}$  处的 C—H 键的面外振动峰,以及  $823.47 \text{ cm}^{-1}$  处的 C=C 的振动吸收峰,同时,  $1029.81 \text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰为端基 C—Br 键的振动吸收峰。综上所述,在聚合物中吩嗪单元与萘单元的各位置的吸收峰均被发现,证实聚合物被成功聚合。

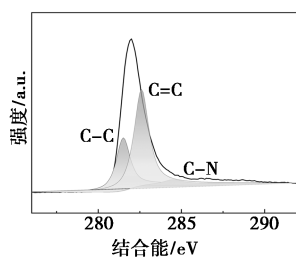
##### 3.1.2 X 射线光电子能谱(XPS)分析

对新材料 p-PyPZ 进行 X 射线光电子能谱(XPS)测试与分析,结果如图 3 所示。

从图 3(a)中可以看出,2 种材料在 282 eV 和 397 eV 处的 2 个主要特征峰为 C 1s 和 N 1s。相比



(a) XPS 全谱图



(b) C 1s 谱图

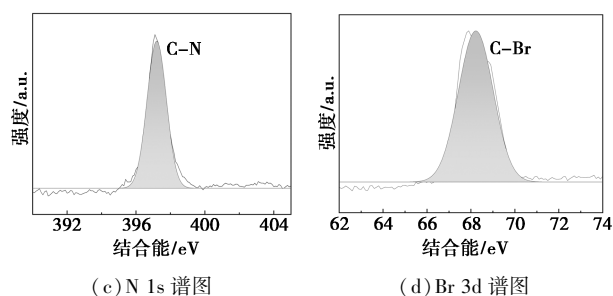
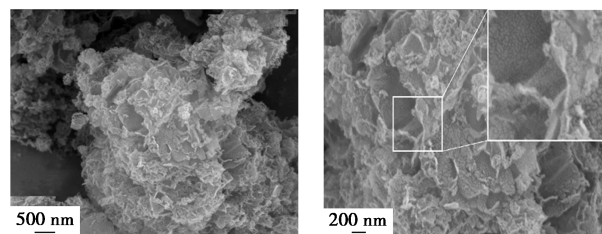


图 3 新材料 p-PyPZ 的 XPS 谱图

于 C 1s 和 N 1s 的峰,在 68 eV 处对应的 Br 3d 特征峰极弱,这是聚合物中端基 Br 引起的,可证实物质已被成功聚合。从图 3(b)、图 3(c)以及图 3(d)中可以看出,p-PyPZ 的 C 1s 光谱经过卷积后显示出 3 个峰,分别为 284.6 eV 处对应的 C—N 键、282.6 eV 处对应的 C=C 键和 281.5 eV 处对应的 C—C 键。p-PyPZ 的 N 1s 光谱只能卷积为 1 个特征峰,因此峰面积都是 100%,峰位置在 397.1 eV 处。同样,Br 3d 光谱也只能卷积为 1 个特征峰,峰位置均在 68.2 eV 处。

##### 3.1.3 扫描电镜(SEM)、X 射线衍射(XRD)及综合热分析

样品 p-PyPZ 的表面形貌 SEM 图如图 4 所示。



(a) 低倍率下的 SEM 图

(b) 高倍率下的 SEM 图

图 4 新材料 p-PyPZ 的 SEM 图

从图 4 中可以看出,新材料 p-PyPZ 呈现片层聚集态,厚度在 10~30 nm,电极材料内具有丰富的孔结构。片状堆积的多孔结构提高了载流子与电极材料的接触面积,有利于电荷的转移,从而提高了电化学和电池性能。

新材料的 XRD 图如图 5 所示。

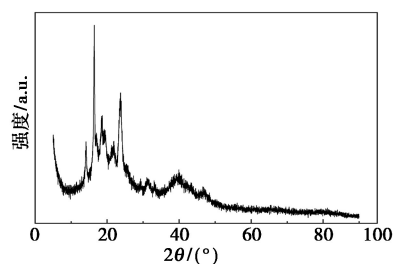


图 5 新材料 p-PyPZ 的 X 射线衍射(XRD)图

从图5中可以看出,该材料在10~50°内具有多重的衍射峰,其中,在30°以上为多重隆峰,表明主体聚合物为非晶机构。同时,在14.2、16.4、18.5°和23.7°处有较为明显的尖锐峰,表明该物质中具有一定的结晶结构。

氮气气氛下新材料 p-PyPZ 的热重 (TG) 和热差 (DTA) 分析如图6所示。

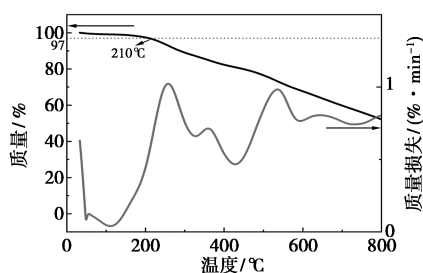


图6 新材料 p-PyPZ 的热重和热差曲线

从图6中可以看出,在10°C/min的升温速率条件下,在210°C前电极材料有较小的质量损失,这是因为其中物理吸附的水分蒸发所致。升高温度开始出现明显失重现象,但是失重幅度较小,这是电极材料中的小分子链发生明显的热解过程,随着温度进一步升高,电极材料质量逐渐下降,这是因为聚合物中的分子链长度不均匀所致。这也证实了在XRD测试中出现尖锐峰的原因。DTA测试曲线与TG测试曲线相互印证。

为了进一步了解吩嗪单元与芘单元作为阴极材料的结构,利用MS模拟软件对新材料部分结构进行模拟,如图7所示。根据前沿分子轨道理论,能量最高的占据分子轨道(HOMO)能级表示高的给电子能力和高的p掺杂活性,能量最低的电子占据轨道为LUMO,HOMO与LUMO之间的能量差为能带隙,窄的能带隙表示高的电导率。

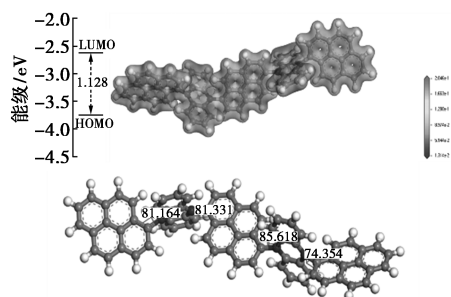


图7 MS模拟新材料 p-PyPZ 的 HOMO 能级图与旋转角度图

从图7中可以看出,p-PyPZ的HOMO能级为-3.756 eV,带隙为1.128 eV,较窄的带隙促进了p掺杂反应过程中电子沿共轭聚合物链的传递。吩嗪

单元与芘单元均为平面结构,模拟图为平面之间的旋转角度,分别为87、81、85°和74°,这为新材料 p-PyPZ 具有的孔结构提供了可能。

### 3.2 电化学性能

#### 3.2.1 循环伏安(CV)测试

聚合物 p-PyPZ 的 CV 图如图8所示。

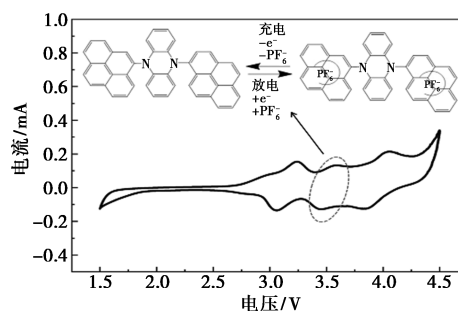


图8 聚合物 p-PyPZ 的 CV 曲线

从图8中可以看出,在测试范围内有3对较为明显的氧化还原峰。而吩嗪作为理想的P型掺杂单元,在吩嗪单元内作为活性中心的N原子会对应2个不同的氧化还原电位。根据Cara N. Gannett等<sup>[14]</sup>利用玻璃碳电极对N,N'-二甲基吩嗪进行循环伏安(CV)测试,吩嗪单元的氧化还原特征峰的位置分别在3.1 V与3.9 V。图8中第1对氧化还原特征峰的位置在3.233/3.037 V,第3对氧化还原特征峰的位置在4.048/3.847 V,这与吩嗪单元分别在3.1 V与3.9 V的氧化还原特征峰的位置接近。说明这都是由于吩嗪单元中的N原子发生的氧化还原反应,相应的N原子得到/失去电子的过程。其中,2对峰的氧化峰与还原峰之间的峰间距分别为0.196 V与0.211 V,并且氧化/还原峰的峰型接近,预示着p-PyPZ在电池性能上将具有更好的稳定性。第2对氧化还原峰位置在3.590/3.447 V,这无疑是聚合物内芘单元的得失电子过程,峰间距为0.143 V。图中插图为芘单元得失电子过程图,表明芘单元具有一定的储能特性。聚合物 p-PyPZ 的3对峰的峰型及峰间距均体现了该材料的稳定性以及良好的动力学,暗示着该材料作为正极材料良好的应用前景。

#### 3.2.2 充放电性能测试

聚合物 p-PyPZ 在20 mA/g 电流密度下的恒定速率循环首次充放电曲线及其充放电过程如图9所示。

从图9中可以看出,由于新材料 p-PyPZ 在循环过程的活化过程使其首次放电容量仅为89 mAh/g。

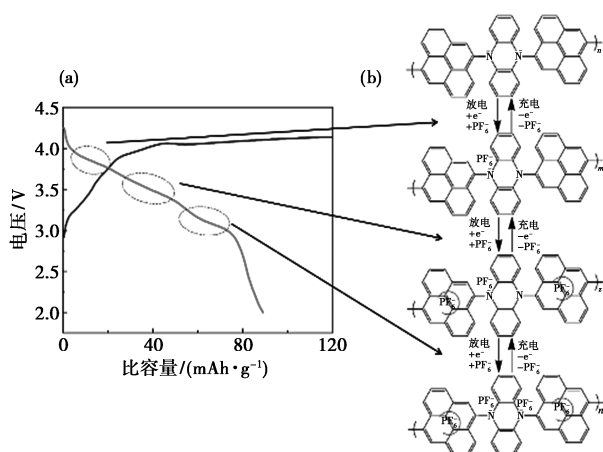
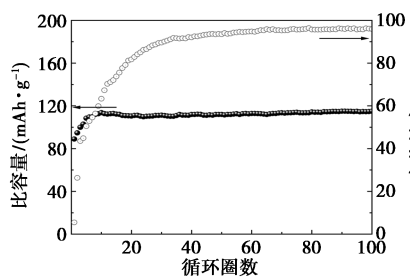


图 9 聚合物 p-PyPZ 在恒定电流下的首次充放电曲线及其充放电过程

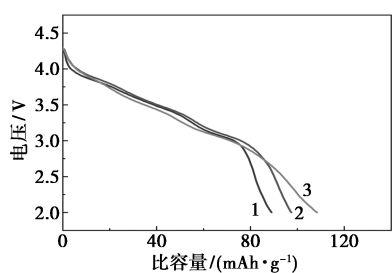
在放电曲线中较为平缓的位置对应着该材料的活性中心发生的氧化还原可逆过程,从中可以看到 3 处较为平缓的放电平台,分别在 3.75 ~ 4.1、3.5 ~ 3.7 V 以及 3.0 ~ 3.2 V,在较高与较低放电电压位置对应的是吩嗪单元内 N 原子的氧化还原过程,其在 3.5 ~ 3.7 V 处的放电平台为聚合物结构内芘的氧化还原过程。这些放电平台与循环伏安(CV)测试结果相一致。

### 3.2.3 循环稳定性及倍率性能研究

聚合物 p-PyPZ 在 20 mA/g 电流密度下的循环稳定性及其活化过程的部分放电曲线如图 10 所示。



(a) 恒定电流密度下的循环稳定性

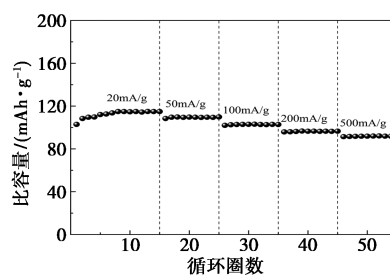


1—1st; 2—5th; 3—10th  
(b) 循环过程中部分圈数的放电曲线

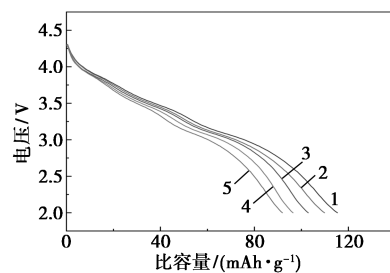
图 10 聚合物 p-PyPZ 在恒定电流密度下的循环稳定性及其放电曲线

从图 10(a) 中可以看出,聚合物 p-PyPZ 的首次放电比容量为 89 mAh/g。随着循环圈数的增加,放电比容量逐渐增加,这是因为活性物质材料在循环过程中逐渐被活化,这个过程中活性材料、隔膜与电解液接触充分,使得载流子更多地扩散到电极材料的活性位点上,能够提供更多的利用率。在第 8 圈时,放电比容量达到 112.1 mAh/g,容量趋于稳定。经过 100 圈循环后放电比容量仍高达 115.0 mAh/g,这是由于引入的芘单元与原吩嗪单元之间良好的共轭作用使得该材料具有极好的稳定性。并且随着循环圈数的增加,库伦效率也在逐渐上升,在循环 50 圈后稳定在 95% 以上。从图 10(b) 中可以看出,随着物质被逐渐活化,各个活性中心的放电平台依然存在,说明每个活性中心都具有良好的可逆性。

聚合物 p-PyPZ 在不同电流密度下的倍率性能及放电曲线如图 11 所示。从图 11(a) 中可以看出,在最初的充放电循环过程中放电比容量呈逐渐上升的趋势,这与循环性能测试结果一致,都是由于在循环过程中活性物质被逐渐活化,因此在 20 mA/g 电流密度下循环 15 圈,后续在不同倍率下均循环 10 圈。在 20、50、100、200 mA/g 和 500 mA/g 的电流密度下聚合物 p-PyPZ 放电比容量分别稳定在 114.7、109.6、103、96.6 mAh/g 和 92.1 mAh/g,在



(a) 聚合物 p-PyPZ 在不同电流密度下的倍率性能



1—20 mA/g; 2—50 mA/g; 3—100 mA/g; 4—200 mA/g; 5—500 mA/g

(b) 不同电流密度下的放电曲线

图 11 聚合物 p-PyPZ 在不同电流密度下的倍率性能及放电曲线

500 mA/g 的电流密度下,容量保持率为 81%。从图 11(b)中可以看出,在不同的电流密度下,聚合物依旧能体现出较为明显的平台特征,说明该材料具有极好的电化学可逆性。这归因于在吩嗪单元与茈单元之间良好的共轭作用以及自身的孔结构,这些都有利于电子的传输,使电极材料具有更好的稳定性。

### 3.2.4 交流阻抗(EIS)测试

初始状态及循环 10 圈后电池的 EIS 测试(插图为 p-PyPZ 的等效电路图)结果如图 12 所示。交流阻抗(EIS)谱图由半圆型的高频区和斜直线的低频区两部分组成,半圆高频区对应着电极与电解质界面的电荷转移电阻,斜直线的低频区域为  $\text{Li}^+$  的扩散行为。

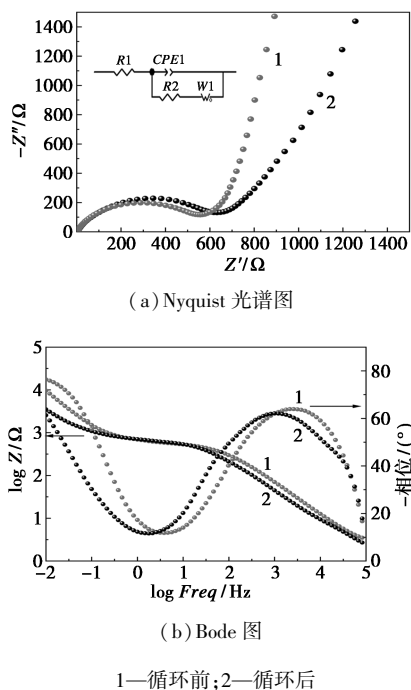


图 12 聚合物 p-PyPZ 初始状态及 10 圈后的 EIS 测试结果(插图为等效电路图)

从图 12(a)中可以看出,初始状态的电荷迁移阻抗为 557.4  $\Omega$ ,循环后的电荷迁移阻抗为 632.2  $\Omega$ 。这是由于经过几次循环之后,电极材料的活性物质与电解液界面逐渐弱化,导致电荷迁移阻抗变大,同时还会产生极化现象。用 Z-view 软件对聚合物的电化学参数进行模拟,组建的等效电路如图 12(a)中插图所示,电路由电解质离子电阻的组合电阻  $R_s$ 、电极与电解质界面上发生的电荷转移电阻  $R_{ct}$ 、双层电容和钝化膜电容  $CPE$  和电极系统中扩散引的 Warburg 电阻  $W_r$  所组成。聚合物循环前后的电化学参数模拟结果如表 1 所示。

表 1 聚合物 p-PyPZ 的等效电路图数据

	$R_{cell}/\Omega$	$R_s/\Omega$	$R_{ct}/\Omega$	$W_r/\Omega$	$CPE/\mu\text{F}$
Before	557.4	2.897	485.6	439.8	$1.13 \times 10^{-5}$
After	632.6	2.276	615.3	248.7	$2.97 \times 10^{-5}$

从表 1 中可以看出,电池的阻抗  $R_{cell}$  主要来源于电荷转移电阻  $R_{ct}$ 。从图 12(b)中可以看出,在低频区,循环前的 p-PyPZ 电荷迁移阻抗值比循环后的更小,这与 Nyquist 的结果一致。循环前后其在低频区的交点值在 50~70° 之间。而在高频区域的交点值趋于零,表明电极材料具有电阻性<sup>[15]</sup>。

## 4 结论

(1)通过 FT-IR 和 XPS 测试证实新材料被成功聚合。通过 SEM 形貌测试观察到电极材料呈现片状堆积的多孔形貌。通过循环伏安(CV)性能测试,在 3.233/3.037 V 和 4.048/3.847 V 的 2 对峰分别对应吩嗪单元内的 2 个 N 原子的氧化还原过程;聚合物 p-PyPZ 在 3.590/3.447 V 处的氧化还原峰对应为茈单元氧化还原反应过程,表明茈结构单元具有一定的储能特性。这得益于吩嗪单元与茈单元之间的  $\pi$ - $\pi$  共轭作用和电子离域效应,同时茈单元的大  $\pi$  键稳定了 N 原子活性中心。

(2)将聚合物 p-PyPZ 作为锂离子电池正极材料,在电流密度为 20 mA/g 的条件下,p-PyPZ 循环稳定后放电比容量达到 112.1 mAh/g,循环 50 圈后仍能保持在 113 mAh/g,在 20、50、100、200 mA/g 和 500 mA/g 的电流密度下的放电比容量分别稳定在 114.7、109.6、103、96.6 mAh/g 和 92.1 mAh/g,在 500 mA/g 电流密度下,容量保持率达到了 81%。通过电化学阻抗(EIS)测试,聚合物 p-PyPZ 具有较好的电荷迁移阻抗,这得益于吩嗪单元与茈单元之间的  $\pi$ - $\pi$  共轭作用及自身的微孔结构。体现出 p-PyPZ 作为新型有机正极材料的应用前景。

## 参考文献

- [1] Li Q, Wang H, Wang H G, et al. A self-polymerized nitro-substituted conjugated carbonyl compound as high-performance cathode for lithium-organic batteries[J]. ChemSusChem, 2020, 13(9): 2449-2456.
- [2] Acker P, Speer M E, Wössmer J S, et al. Azine-based polymers with a two-electron redox process as cathode materials for organic batteries[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(22): 11195-11201.

(下转第 129 页)