

杨芳,杨宇博,张乐坤,等.蛭石模板法氮掺杂纳米片的制备及其电化学性能[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(6): 761-768.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250154

YANG Fang, YANG Yubo, ZHANG Leshen, et al. Preparation of N-doped nanosheets by vermiculite template method and its lithium ion capacitor performance[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(6): 761-768. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250154

# 蛭石模板法氮掺杂纳米片的制备及其电化学性能

杨芳<sup>1,2</sup>, 杨宇博<sup>2</sup>, 张乐坤<sup>2</sup>, 杨绍斌<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院, 内蒙古鄂尔多斯 017004;  
2. 辽宁工程技术大学材料科学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

**摘要:** 采用结晶紫作为碳源, 蛭石作为模板, 利用模板蚀刻的方法制备具有层状结构的氮掺杂碳纳米片, 研究了碳化温度(600℃、700℃、800℃、900℃)对氮掺杂纳米片的结构、形貌和电化学性能的影响。研究结果表明: 随着碳化温度增加, 碳化的结晶紫层间距先增大后减小, 其中经700℃碳化的结晶紫形成了蛭石形貌的薄片状层氮掺杂碳纳米片, 比表面积为154.614 m<sup>2</sup>/g; 将700℃碳化的样品组装成锂离子电池, 在0.1 A/g电流密度下进行恒流充放电测试, 可逆容量为410.7 mA·h/g; 在2 A/g电流密度下, 可逆容量为192.9 mA·h/g; 在2 A/g电流密度下循环500次, 容量保持率为87.5%。以700℃碳化的样品为负极, 活性炭为正极组装成锂离子电容器, 功率密度为2 kW/kg, 能量密度为58.17 W·h/kg, 在1 A/g电流密度下循环300次, 容量保持率为56.5%。

**关键词:** 碳纳米片; 蛭石模板法; 氮掺杂; 结晶紫; 锂离子电容器

中图分类号: TB332; TM53

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)06-0761-08

## Preparation of N-doped nanosheets by vermiculite template method and its lithium ion capacitor performance

YANG Fang<sup>1,2</sup>, YANG Yubo<sup>2</sup>, ZHANG Leshen<sup>2</sup>, YANG Shaobin<sup>2</sup>

(1. Ordos Research Institute, Liaoning Technical University, Ordos 017004, China; 2. College of Material Science & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Nitrogen-doped carbon nanosheets with layered structure were prepared by template etching using crystal violet as carbon source and vermiculite as template. The effects of carbonization temperature (600℃, 700℃, 800℃, 900℃) on the structure, morphology and electrochemical properties of nitrogen-doped carbon nanosheets were studied. The results show that with the increase of carbonization temperature, the interlayer spacing of carbonized crystal violet increases first and then decreases. The crystal violet carbonized at 700℃ forms a thin gauze-like nitrogen-doped carbon nanosheets with vermiculite morphology, and the specific surface area is 154.614 m<sup>2</sup>/g. The sample carbonized at 700℃ was assembled into a lithium-ion battery, and the constant current charge and discharge test was performed at a current density of 0.1 A/g. The reversible capacity was 410.7 mA·h/g. At a current density of 2 A/g, the reversible capacity was 192.9 mA·h/g, and the capacity retention rate was 87.5% after 500 cycles at a current density of 2 A/g. The lithium-ion capacitor was assembled with the sample carbonized at 700℃ as the negative electrode and activated carbon as the positive electrode. The power density was 2 000 W/kg, the energy density was 58.17 W·h/kg, and the capacity retention rate was 56.5% after 300 cycles at a current density of 1 A/g.

**Keywords:** carbon nanosheets; vermiculite template method; nitrogen doping; crystal violet; lithium ion capacitor

## 0 引言

随着人类对能源需求的日益增加, 储能技术

的研究已成为能源领域的重要发展方向。其中, 电化学储能能在风电、光伏等可再生能源领域备受关注。当前, 电化学储能系统主要包括锂离子电

收稿日期: 2025-04-15 修回日期: 2025-06-21 接受日期: 2025-06-30 责任编辑: 焦丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(52474295); 辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院校地科技合作培育项目(YJY-XD-2024-B-002)

作者简介: 杨芳(1974-), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要从事新能源材料方面的研究。E-mail: xbyangf@126.com

池<sup>[1-3]</sup>和超级电容器<sup>[4-5]</sup>,前者能量密度高,而后者功率密度高且循环寿命长。锂离子电容器(LIC)<sup>[6-8]</sup>作为一种高功率新型储能器件,具有超级电容器的高功率密度、长寿命的优点,又具有锂离子电池高能量密度的优点,应用前景广阔。

电极是锂离子电池和锂离子电容器的核心组成部分,对器件性能的发挥起到决定性的作用<sup>[9]</sup>。碳材料能量密度高、电化学活性强、循环寿命长,是制备锂离子电池和锂离子电容器负极的主流材料<sup>[10]</sup>。常见的碳材料为石墨烯、碳纳米管和碳纳米片等<sup>[11-13]</sup>。然而,碳材料的堆积形貌导致样品的比表面积较小,不利于样品与电解液之间的锂离子交换,限制了碳材料在锂离子电池和锂离子电容器中的应用。为解决此问题,董伟等<sup>[14-15]</sup>使用化学剥离法、模板法使碳材料在制备过程形成特定的形貌,增大比表面积,增加与电解液的相容性,提高导电性。LIANG等<sup>[16]</sup>采用蒙脱石为硬模板,利用热解工艺制备了元素掺杂的碳纳米片,较大的比表面积和丰富的活性位使其具备优异的电催化性质。JANG等<sup>[17]</sup>采用混和无机盐做模板,通过600℃的碳化工艺制备铁氧体复合的碳纳米片,并以此组装的锂离子电池,实验表明该锂离子电池的电化学性能优异。JIANG等<sup>[18]</sup>采用多巴胺为碳源,制备氮掺杂碳纳米片/ $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 负极材料,并以此组装成锂离子电容器,其能量密度为70.3 W·h/kg。FANG等<sup>[19]</sup>以阳极氧化铝为底物,采用溶剂蒸发、静电吸引和碳化工艺制备了纳米级的聚合物纳米片,增大了样品的比表面积,将其组装成锂离子电池后,在0.1 A/g电流密度下的充放电容量为770 mA·h/g,电化学性能得到提升。由此可见,碳材料的形貌修饰与改性,可以增大样品的比表面积,进而有效地提高电化学性能<sup>[20]</sup>。

本文采用结晶紫为碳源,蛭石为模板,经过高温碳化、酸刻蚀,以期获得具有蛭石层状结构的碳材料,增加碳材料与电解液之间的渗透率,提供更多的 $\text{Li}^+$ 通道,提高锂离子电池和锂离子电容器的电化学性能,为优化此类新型储能元件的性能提供参考。

## 1 实验

### (1) 样品制备

将蛭石原矿在水中清洗,烘干。将烘干的蛭石放入1000℃的马弗炉中煅烧1 min,得到膨胀蛭石。将10 g 结晶紫( $\text{C}_{25}\text{H}_{30}\text{N}_3\text{Cl}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ )作为碳源分散在100 mL去离子水中,超声震荡1 h。

将膨胀蛭石和结晶紫溶液的混合物超声处理5 h,然后在真空环境下浸泡12 h,抽滤收集沉淀后的混合物,并在60℃下烘干。将烘干后的样品置于管式炉中,分别在600℃、700℃、800℃和900℃温度下碳化2 h。冷却后用质量分数为20%的氢氟酸溶液和质量分数为18%的盐酸溶液处理3 h,并在真空烘箱中烘干,标记为CN-X(X表示不同碳化温度)。为验证蛭石作为模板对样品性能的影响,在700℃下制备出不添加蛭石模板的纯结晶紫碳材料,标记为CV-700。

### (2) 锂离子半电池的制备

将制备的样品、导电剂(Super P)和聚偏氟乙烯(PVDF)按质量比8:1:1计量称取,在烧杯中混合,然后与适量的NMP滴混,磁力搅拌2 h,将形成的浆料涂覆于铜箔上,按照电极-隔膜-锂片的顺序组装。在组装过程中,滴加1 mol/L的 $\text{LiPF}_6$ 溶剂(溶剂为碳酸二甲酯(DMC)/碳酸甲乙酯(EMC)/碳酸乙烯酯(EC),体积比为1:1:1),压紧组装成CR2025型扣式锂离子半电池。 $\text{LiPF}_6$ 溶剂中,碳酸二甲酯(DMC)、碳酸甲乙酯(EMC)和碳酸乙烯酯(EC)的体积比为1:1:1。

### (3) 锂离子电容器制备

采用活性炭(AC)电极为正极、所制备样品为负极极片,按照正极-隔膜-负极的顺序进行组装。在组装过程中滴加1 mol/L  $\text{LiPF}_6$ ,压紧组装成CR2025型扣式锂离子电容器。

### (4) 结构表征

采用XRD-6000型X射线衍射仪开展样品物相分析;采用DXR型光谱仪测试样品的石墨化程度;采用JSM-7500F型扫描电子显微镜测试材料形貌;采用JEM-2100F型透射电子显微镜测试样品的精细结构;采用Autosorb-IQ型比表面积仪测量样品的比表面积,并结合Brunauer-Emmett-Teller(BET)法和Barrett-Joiner-Halenda(BJH)模型,计算样品的比表面积和孔径尺寸。

### (5) 半电池和超级电容器电化学性能测试

采用BTS-4008T型测试系统对储能器件进行充放电测试。在不同电流密度下,进行倍率性能测试,半电池测试电压为0.01~3.0 V,锂离子电容器测试电压为0.01~4.0 V;采用电化学工作站(CHI660E, CHI-Instrument)测试电化学阻抗(EIS,测试频率范围为0.01~ $10^5$  Hz)和循环伏安特性谱(CV);采用BTS-5 V/2.2 A型测试仪测试样品的锂离子扩散系数(GITT)。测试数据均在室温且循环稳定后取得。

## 2 结果与分析

### 2.1 结构与形貌分析

5种样品(CV-700、CN-600、CN-700、CN-800、CN-900)的XRD图谱和拉曼光谱见图1。由图1(a)可见,5种样品均在 $23^\circ$ 附近出现典型的馒头状衍射峰,经过XRD卡片比对,该峰对应于无定形碳(002)晶面。纯结晶紫热解碳CV-700未出现其他衍射峰,表明碳材料纯度较高。由图1(b)可见,5

种样品均出现了代表碳材料的D峰( $1360.46\text{ cm}^{-1}$ )和G峰( $1553.27\text{ cm}^{-1}$ ),D峰代表碳原子 $\text{Sp}^3$ 杂化,G峰代表碳原子 $\text{Sp}^2$ 杂化。D峰强度 $I_D$ 与G峰强度 $I_G$ 的比值 $I_D/I_G$ ,可反映 $\text{Sp}^3$ 和 $\text{Sp}^2$ 杂化碳原子的相对贡献,比值越大无定形程度越高。5种样品的 $I_D/I_G$ 分别为0.857、0.932、0.987、0.995和0.995,表明蛭石模板可以对结晶紫的石墨化起到阻碍作用;并且随着温度的增加,石墨的无序程度增加,与XRD表征结果一致。

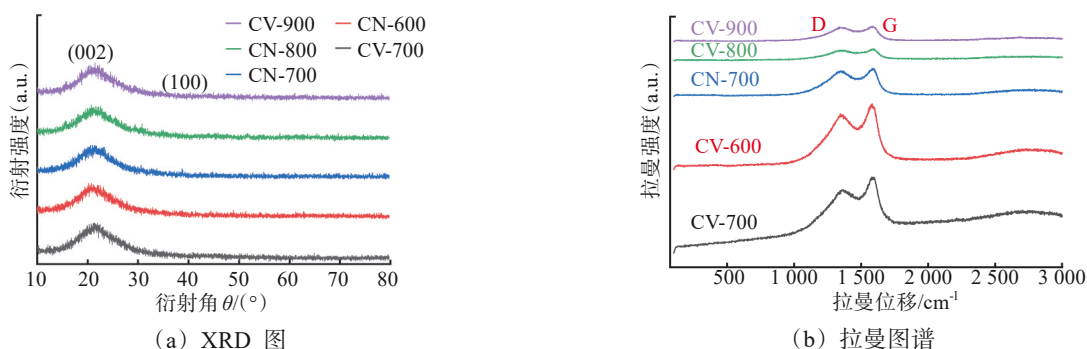


图1 不同碳化温度下制备的碳纳米片图谱

Fig.1 carbon nanosheet patterns prepared at different carbonization temperatures

5种样品的表面形貌见图2,样品CN-700的透射电镜形貌见图3。由图2可见,未添加蛭石作为模板制备的样品CV-700,其微观形貌为不规则、堆叠的片状结构。通过蛭石模板制备的样品形貌均呈现均匀层状结构,且随着碳化温度增加,碳化结晶紫的层间距先增大后减小。样品

CN-700具有较规则、均匀的薄纱状片层结构,层与层之间存在较大孔隙。为了进一步研究样品CN-700的微观结构,采用透射电镜进行观察。由图3可见,CN-700呈现高透明、褶皱形貌,且存在纳米孔结构及大小不一的碳纳米片层无定形碳微晶结构。

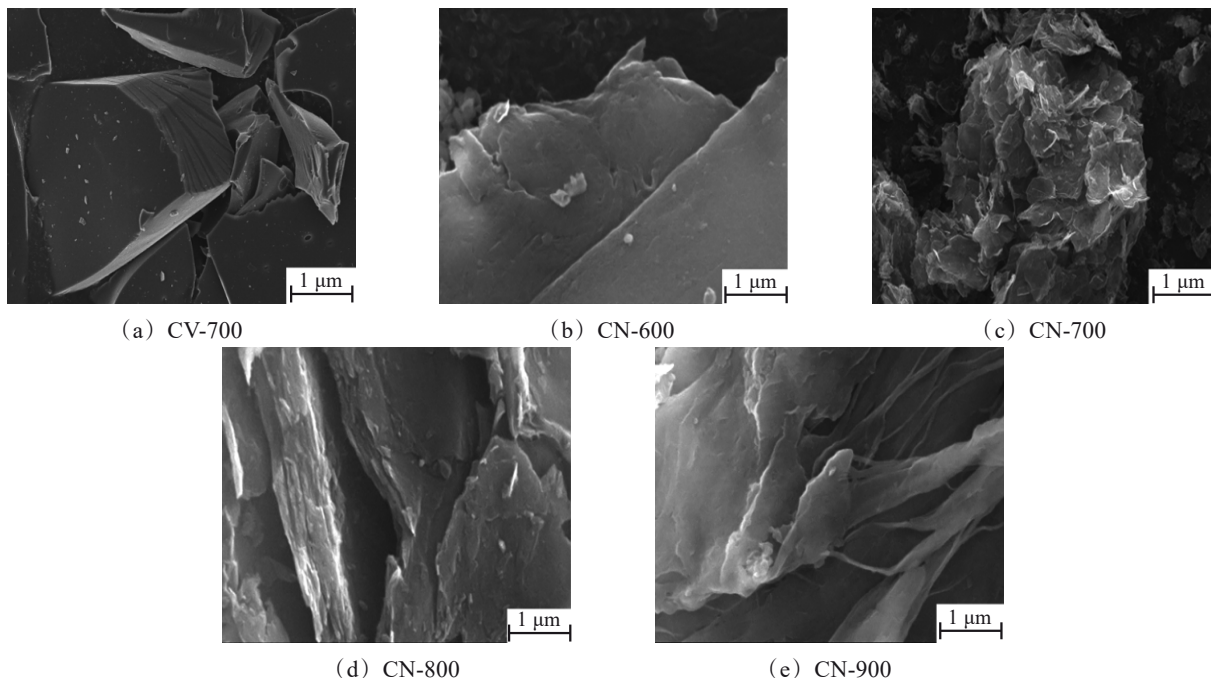


图2 5种样品的扫描电镜形貌

Fig.2 scanning electron microscope morphology of 5 samples

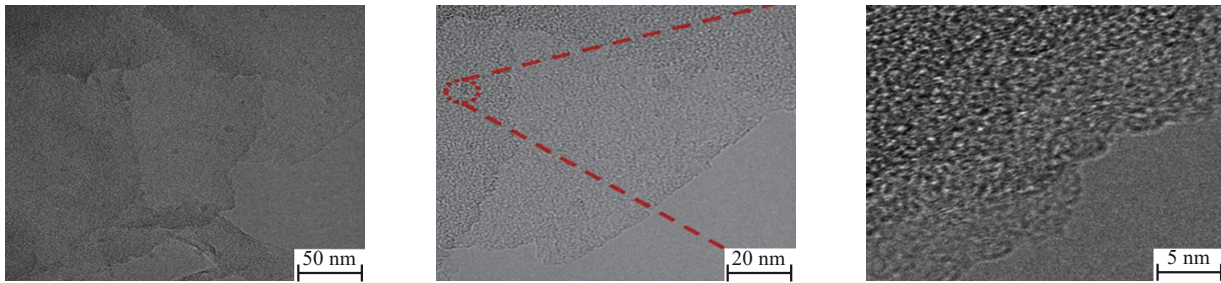


图3 样品 CN-700 的透射电镜形貌

Fig.3 transmission electron microscope morphology of CN-700 sample

4 种样品 (CN-600, CN-700, CN-800 和 CN-90) 的氮气吸脱附曲线和孔径分布见图 4。其中,

$P$  为实际氮气压力,  $P_0$  为氮气的饱和蒸气压。

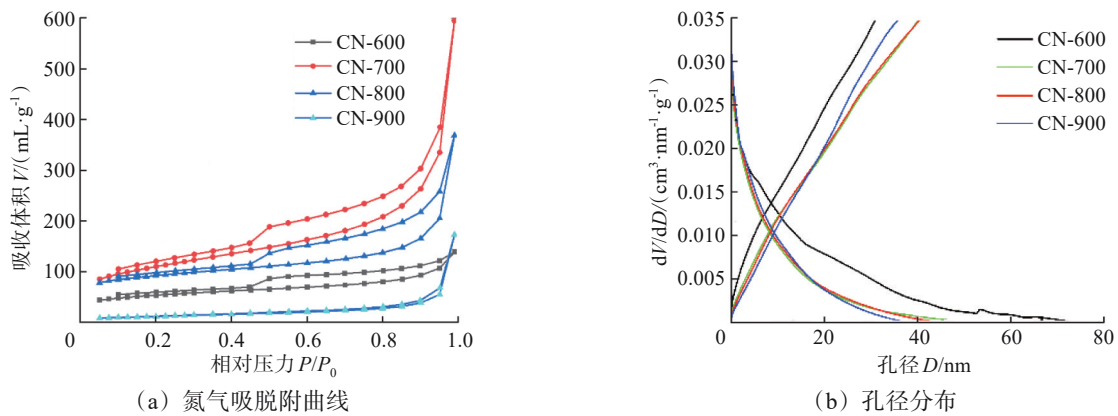


图 4 4 种样品的氮气吸脱附曲线和孔径分布

Fig.4 nitrogen adsorption desorption curves and pore size distributions of four samples

由图 4 (a) 可见, 4 种样品均呈现典型的 IV 型等温线, 具有 H3 型滞后环, 表明碳纳米片以无序堆叠的片层状介孔结构为主导。4 种样品的比表面积分别为  $43.658 \text{ m}^2/\text{g}$ 、 $154.614 \text{ m}^2/\text{g}$ 、 $81.207 \text{ m}^2/\text{g}$  和  $27.488 \text{ m}^2/\text{g}$ 。由图 4 (b) 可见, 随着温度的升高, 4 种模板碳材料的孔体积先增大后减小, 分别为  $0.144 \text{ cm}^3/\text{g}$ 、 $0.791 \text{ cm}^3/\text{g}$ 、 $0.453 \text{ cm}^3/\text{g}$ 、 $0.257 \text{ cm}^3/\text{g}$ , 平均孔径按大小顺序依次为  $3.062 \text{ nm}$ 、 $3.413 \text{ nm}$ 、 $3.056 \text{ nm}$ 、 $3.407 \text{ nm}$ 。

结合图 2 可知, 当热解温度从  $600^\circ\text{C}$  升高至  $700^\circ\text{C}$  时, 蛭石模板法制备的样品有蛭石的层状形貌, 样品的比表面积增大。当温度从  $800^\circ\text{C}$  升高至  $900^\circ\text{C}$  时, 样品中的碳纳米片发生堆叠及结构坍塌, 产生较多碎屑, 使比表面积下降。

## 2.2 电化学性能分析

5 种样品 (CN-600, CN-700, CN-800, CN-900、CV-700) 的充放电曲线见图 5, 不同电流密度下的循环特性和倍率特性分别见图 6 和图 7。

由图 5 可见, 样品 CV-700 的充电曲线呈硬碳型特性, 样品 CN-600、样品 CN-700、样品 CN-800 和样品 CN-900 的充电曲线趋近于直线, 属于

石墨烯类材料的电容性曲线。5 种样品的充放电曲线大致可以分为两个电压区间: 平台区 (低于  $0.1 \text{ V}$ ) 和斜坡区 (高于  $0.1 \text{ V}$ )。其中平台区主要与  $\text{Li}^+$  在碳层间的脱/嵌有关, 斜坡区则主要与  $\text{Li}^+$  在材料表面的吸附相关。5 种样品首次放电容量分别为  $542.3 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$ 、 $1300.2 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$ 、 $808.2 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$ 、 $786.6 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$  和  $441.9 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$ , 首次充电容量分别为  $232.8 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$ 、 $630.4 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$ 、 $361.6 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$ 、 $399.6 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$  和  $179.3 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$ , 首次库伦效率分别为  $42.9\%$ 、 $48.5\%$ 、 $44.7\%$ 、 $45.9\%$  和  $40.5\%$ 。5 种材料的首次库伦效率均较低, 这是由于样品的比表面积较大, SEI 膜形成和微孔中不可逆锂消耗导致不可逆容量损失所致。与 CV-700 相比, 其他 4 种样品库伦效率有所提高, 可能是由于样品的片层状形貌使得不可逆锂减少, 促进了  $\text{Li}^+$  的传输。样品 CN-700 的首次放电比容量和首次库伦效率在样品 CN-600、样品 CN-700、样品 CN-800、样品 CN-900 中表现最优。该 4 种样品从第 2 次充放电循环开始, 曲线变化趋于稳定, 这表明样品的循环稳定性良好。50 次循环后, 放电比容量稳定在  $400 \text{ mA}\cdot\text{h/g}$  左右, 效率接近  $100\%$ 。

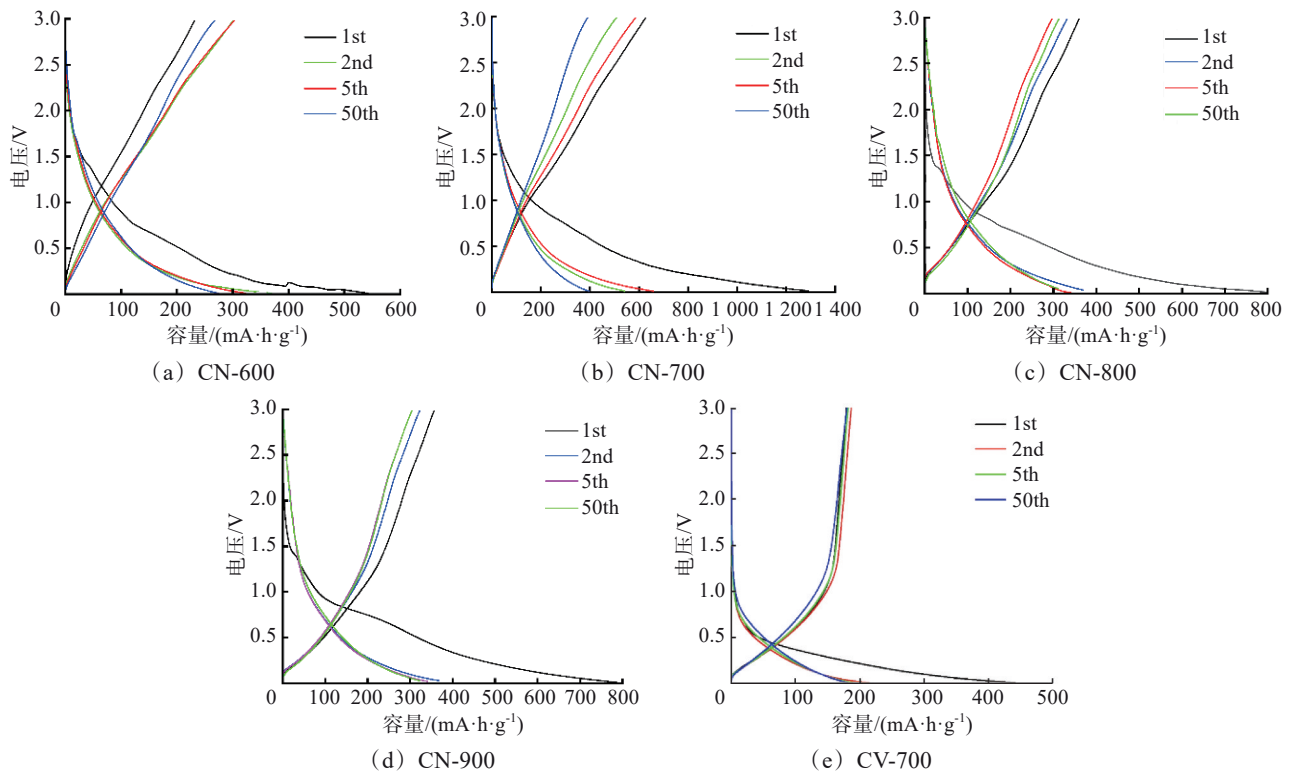


图5 5种样品的恒流充放电曲线

Fig.5 constant current charge-discharge curves of 5 samples

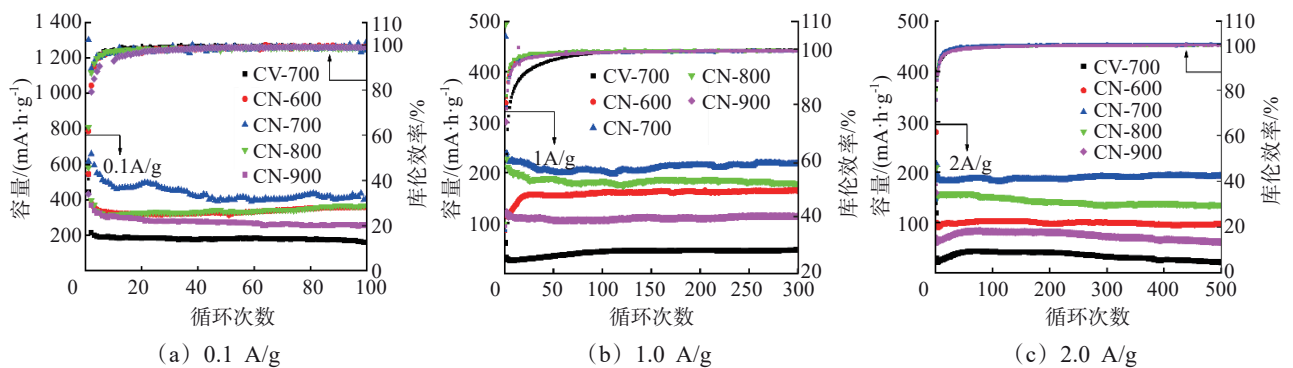


图6 不同电流密度下5种样品的循环特性

Fig.6 cycle characteristics of 5 samples at different current densities

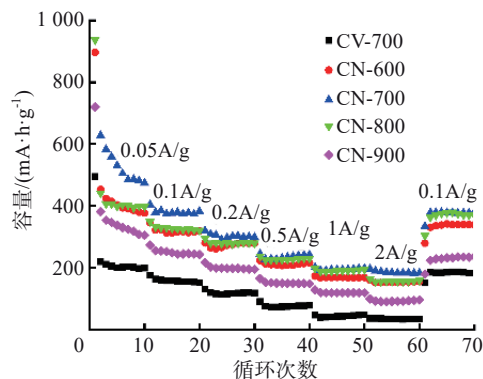


图7 不同电流密度下5种样品的放大倍率特性

Fig.7 magnification characteristics of 5 samples at different current densities

由图6和图7可以看出,5种样品在0.1 A/g的电流密度下循环100次后,可逆放电比容量分别为100.1 mA·h/g、410.7 mA·h/g、358.8 mA·h/g、367.3 mA·h/g和253.5 mA·h/g,容量保持率分别为91%、98.5%、91.2%、98.3%和97.6%。5种样品在1.0 A/g的电流密度下循环300次后,可逆放电比容量分别为46.7 mA·h/g、217.9 mA·h/g、164 mA·h/g、178.7 mA·h/g和112.9 mA·h/g,容量保持率分别为87.9%、97.8%、97.7%、92.1%和91.8%。5种样品在2.0 A/g的电流密度下循环500次后,可逆放电比容量分别为21.3 mA·h/g、192.9 mA·h/g、96.8 mA·h/g、135.5 mA·h/g和60.3 mA·h/g,容量保持率分别为

57%、87.5%、87.2%、75.6%和65%。对比3种电流密度下的循环充放电曲线可见,样品CN-700电极的可逆容量、循环稳定性和倍率性能均最优,这是因为其具有稳定的层状结构,能够有效地协调离子扩散和电子传导过程,从而使其电化

能优于其他电极样品。

5种样品(CV-700, CN-600, CN-700, CN-800和CN-900)的循环伏安曲线、交流阻抗图谱见图8。

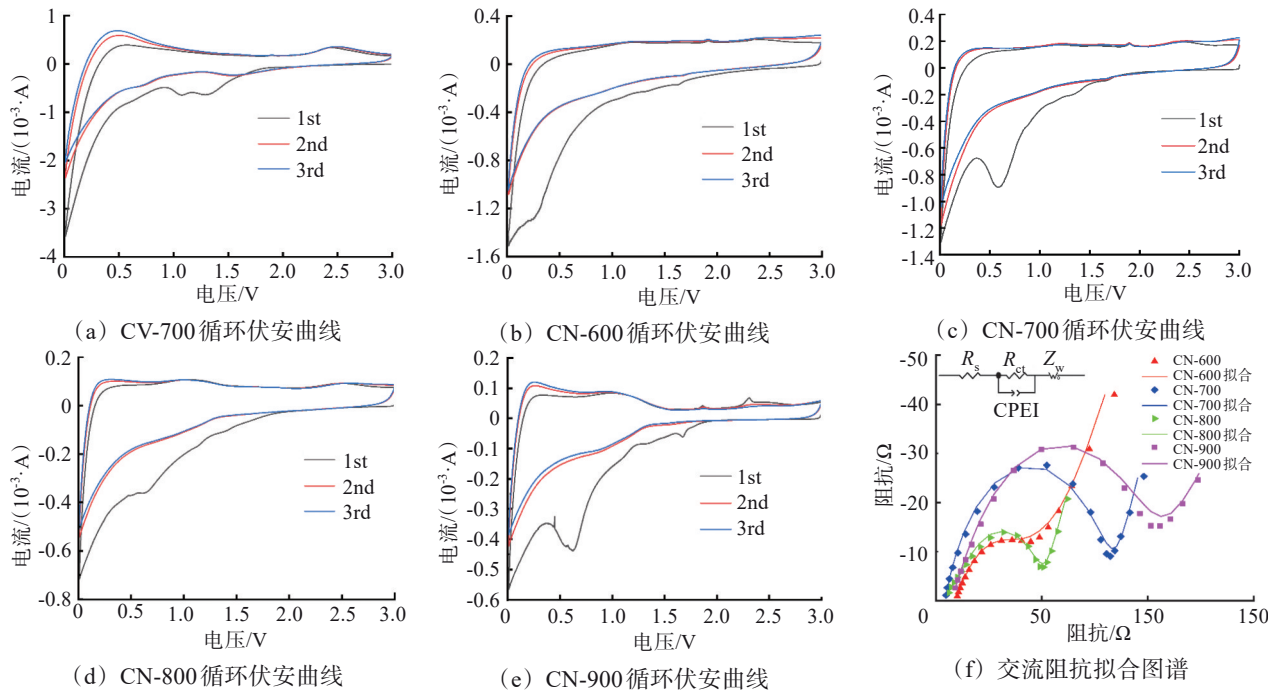


图 8 5种样品的循环伏安曲线、交流阻抗拟合图谱

Fig. 8 cyclic voltammetry curves and AC impedance fitting spectra of 5 samples

由图8(a)~图8(e)可见,5种样品在首次循环中,于0.01 V、0.75 V附近出现2个还原峰,在0.3 V附近出现氧化峰。其中,0.01 V对应的还原峰为碳材料层间的可逆嵌锂过程,0.75 V对应的还原峰主要与SEI膜的形成有关。在后续循环中,还原峰逐渐消失,表明形成了稳定的SEI膜,0.3 V对应的氧化峰为Li<sup>+</sup>从碳纳米片层间的脱出过程。由图8(f)可见,样品CN-700的交流阻抗值最小,这主要是由于样品CN-700在700℃下形成的有序多层碳纳米片结构,提供了良好的导电性。

通过拟合等效电路,计算出4种样品(CN-600, CN-700, CN-800、CN-900)的阻抗拟合值,见表1。

表 1 等效电路拟合电极阻抗参数  
Tab.1 equivalent circuit fitting electrode impedance parameters

| 样品     | 拟合值          |                 |
|--------|--------------|-----------------|
|        | $R_s/\Omega$ | $R_{ct}/\Omega$ |
| CN-600 | 6.20         | 74.52           |
| CN-700 | 4.96         | 49.81           |
| CN-800 | 4.26         | 78.92           |
| CN-900 | 5.99         | 85.21           |

随着温度的升高,4种样品的导电阻抗 $R_s$ 相差不大,电荷转移电阻 $R_{ct}$ 先减小后增大,这是由于随着温度的升高样品的形貌由有序到无序,比表面积减小,使得 $R_{ct}$ 有所下降。

5种样品(CN-600、CN-700、CN-800、CN-900、CV-700)在0.1 A/g电流密度下的GITT曲线、充电和放电过程中扩散系数随电压的变化规律见图9。由图9可见,在充放电过程中, Li<sup>+</sup>扩散系数均处于10<sup>-9</sup>量级。放电时,电压从2.0 V降至0 V,随着放电的持续进行,样品表面的官能团不断吸附Li<sup>+</sup>,导致5种样品的锂离子扩散系数均呈现递减趋势。对比5种样品可见,样品CN-700的锂离子扩散系数在充放电过程中始终处于第一位,这与交流阻抗分析结果一致。在充电过程中,4种样品(CN-600, CN-700, CN-800、CN-900)的扩散系数先迅速减小,然后缓慢降低并趋于平稳,这是因为在Li<sup>+</sup>储存过程中,斜坡区域和放电平台区域的储锂机制不同。

图10为CN-700//AC在锂离子电容器中的电化

矩形,说明锂离子电容器能量储存中既存在电容器的电容行为,也包含锂电池的氧化还原反应过程。但随着扫描速率的增加,循环伏安曲线出现一定程度的极化现象。由图10(b)可见,时间电压曲线对称且呈类三角形,表明CN-700//AC具有良好的可逆性和优异的电容性能。计算可知,在0.1 A/g、0.2 A/g、0.3 A/g、0.5 A/g

和1.0 A/g下,CN-700//AC的比电容分别为53 F/g、36.1 F/g、31 F/g、23.9 F/g和9.1 F/g。由图10(c)可见,在1.0 A/g电流密度下循环300次后,CN-700//AC的库伦效率为56.5%。由图10(d)可见,功率密度分别为199.4 W·h/kg和2 000.0 W·h/kg时,对应的CN-700//AC锂离子电容器的能量密度分别为93.64 W/kg和58.17 W/kg。

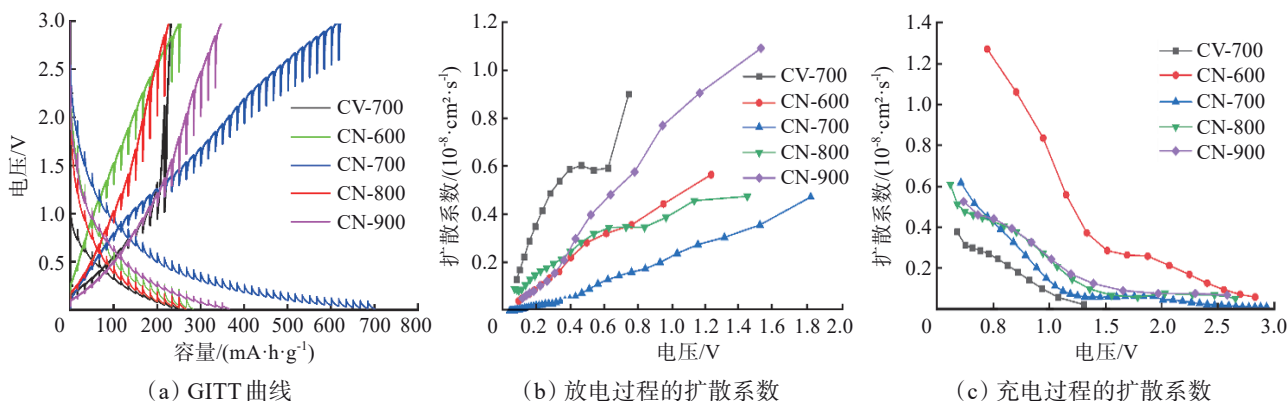


图9 0.1 A/g下5种样本的GITT曲线和充放电的扩散系数

Fig. 9 GITT curves and charge-discharge diffusion coefficients of the 5 samples at 0.1 A/g

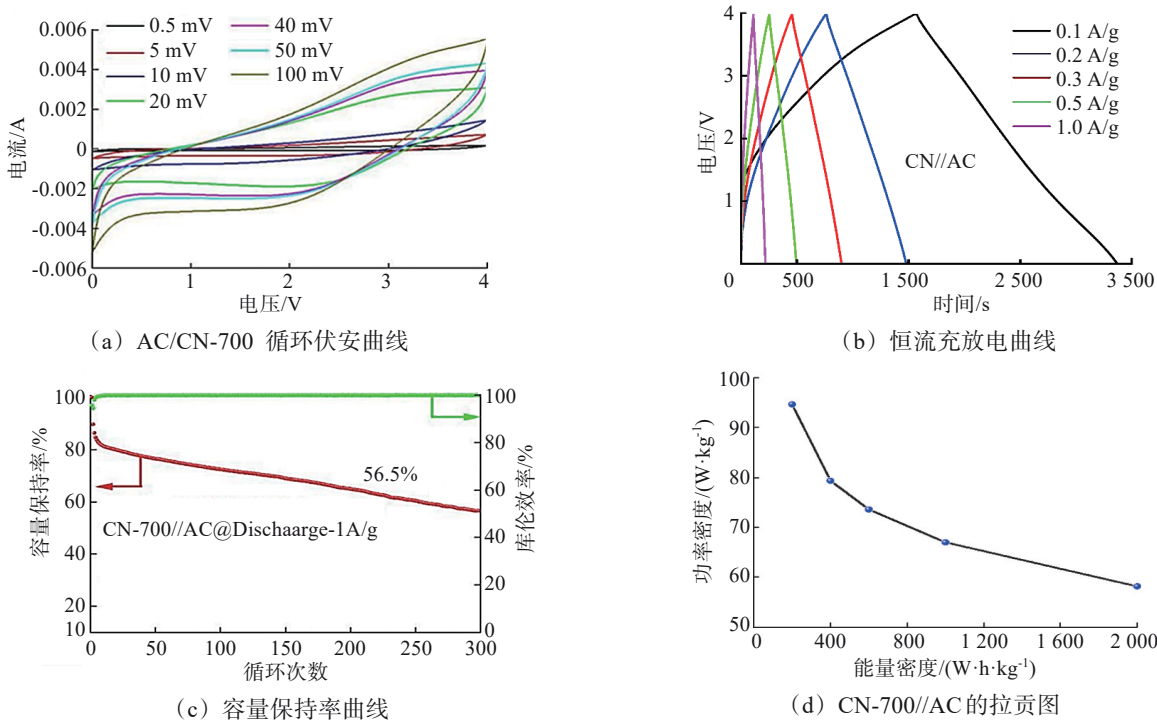


图10 CN-700//AC在锂离子电容器中的电化学性能

Fig.10 electrochemical performance of CN-700//AC lithium ion capacitor

### 3 结论

(1) 在蛭石模板的限域空间下,通过碳化和刻蚀工艺制备的氮掺杂碳纳米片相较于纯结晶紫热解碳,呈现出片层状结构。该碳纳米片的纯度较高,且蛭石模板对于层间有机物结晶紫的石墨

化具有阻碍作用。

(2) 经700℃碳化得到的氮掺杂样品组装成锂离子电池,电化学性能测试表明其具有较好的循环稳定性和倍率性能。

(3) 将700℃碳化得到的氮掺杂样品与商业活性炭AC组装成锂离子电容器,经电化学性能测试

证,该电容器具备良好的电容性能。

### 参考文献(Reference):

- [1] HASA I, ADELHELM P, CAO G Z, et al. Batteries & supercaps: beyond lithium-ion batteries[J]. Batteries & Supercaps, 2021,4:1036-1038.
- [2] 杨绍斌,赵玲敏,赵明远,等.低成本硅纳米管/碳复合材料的制备及储锂性能[J].硅酸盐学报,2022,50(7):1875-1882.
- YANG Shaobin, ZHAO Lingmin, ZHAO Mingyuan, et al. Preparation and lithium storage properties of low cost silicon nanotube/carbon composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(7):1875-1882.
- [3] 田宁,谭雯竹,于吉,等.基于CuO-ZnO的低温固体氧化物燃料电池性能[J].沈阳师范大学学报(自然科学版),2024,42(3):280-284.
- TIAN Ning, TAN Wenzhu, YU Ji, et al. The performance of low temperature solid oxide fuel cells based on CuO-ZnO[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2024,42(3): 280-284.
- [4] LI Y M, HAN X, YI T F, et al. Review and prospect of  $\text{NiCo}_2\text{O}_4$ -based composite materials for supercapacitor electrodes[J]. Journal of Energy Chemistry, 2019,31:54-78.
- [5] LAHEÄÄR A, JÄNES A, LUST E. Electrochemical properties of carbide-derived carbon electrodes in non-aqueous electrolytes based on different Li-salts[J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(25): 9048-9055.
- [6] 张轲,张坤柔,韩宇珠,等. B掺杂Co基氧化物/氢氧化物电极材料的制备及其赝电容性能[J].沈阳师范大学学报(自然科学版), 2023,41(6):482-487.
- ZHANG Ke, ZHANG Kunrou, HAN Yuzhu, et al. Preparation and pseudo-capacitance performance of B-doped Co-based oxide/hydroxide electrode materials[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2023,41(6):482-487..
- [7] YANG F P, FENG X F, GLANS P A, et al.  $\text{MoS}_2$  for beyond lithium-ion batteries[J]. APL Materials, 2021,9:050903.
- [8] ZHANG T F, ZHANG F, ZHANG L, et al. High energy density Li-ion capacitor assembled with all graphene-based electrodes[J]. Carbon, 2015,92:106-118.
- [9] WANG Y, JIANG Q, SHANG J K, et al. Advances in the synthesis of mesoporous carbon nitride materials[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2016,32(8):1913-1928.
- [10] 杨芳,刘晨,杨绍斌,等.用于超级电容器的煤基活性炭电极材料的研究进展[J].硅酸盐学报,2019,47(10):1499-1508.
- YANG Fang, LIU Chen, YANG Shaobin, et al. Research progress on coal-based activated carbon electrode material for supercapacitor [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(10): 1499-1508.
- [11] GONG B J, SONG X D, SHI Y T, et al. Understanding the inhibition of the shuttle effect of sulfides ( $S \leq 3$ ) in lithium-sulfur batteries by heteroatom-doped graphene: first-principles study[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2020,124(6):3644-3649.
- [12] SHAN Z Z, HE Y S, LIU N, et al. Spontaneously rooting carbon nanotube incorporated N-doped carbon nanofibers as efficient sulfur host toward high performance lithium-sulfur batteries[J]. Applied Surface Science, 2021,539:148209.
- [13] WU H L, XIA L, REN J, et al. A multidimensional and nitrogen-doped graphene/hierarchical porous carbon as a sulfur scaffold for high performance lithium sulfur batteries[J]. Electrochimica Acta, 2018,278:83-92.
- [14] 董伟,常启明,王文博,等.  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  纳米片的剥离制备方法研究进展[J].硅酸盐学报,2023,51(7):1868-1882.
- DONG Wei, CHANG Qiming, WANG Wenbo, et al. Research progress in preparing methods of  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  Nanosheets by exfoliation [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023,51(7):1868-1882.
- [15] JI X L, LEE K T, NAZAR L F. A highly ordered nanostructured carbon-sulphur cathode for lithium-sulphur batteries[J]. Nature Materials, 2009,8(6):500-506.
- [16] LIANG H W, WEI W, WU Z S, et al. Mesoporous metal-nitrogen-doped carbon electrocatalysts for highly efficient oxygen reduction reaction[J]. Journal of the American Chemical Society, 2013,135(43):16002-16005.
- [17] JANG B, PARK M, CHAE O B, et al. Direct synthesis of self-assembled ferrite/carbon hybrid nanosheets for high performance lithium-ion battery anodes[J]. Journal of the American Chemical Society, 2012,134(36):15010-15015.
- [18] JIANG S B, DONG S Y, WU L Y, et al. Pseudocapacitive  $\text{T-Nb}_2\text{O}_5/\text{N-doped carbon nanosheets}$  anode enable high performance lithium-ion capacitors[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2019,842:82-88.
- [19] FANG Y, LV Y Y, TANG J, et al. Growth of single-layered two-dimensional mesoporous polymer/carbon films by self-assembly of monomicelles at the interfaces of various substrates[J]. Angewandte Chemie, 2015,127(29):8545-8549.
- [20] 侯磊,韩学锋,邢宝林,等.天然矿物为模板制备功能炭材料的研究进展[J].材料导报,2022,36(12):32-42.
- HOU Lei, HAN Xuefeng, XING Baolin, et al. Research progress on the preparation of functional carbon materials using natural minerals as templates[J]. Materials Reports, 2022,36(12):32-42.