不同干燥方式对掺氮碳量子点/还原氧化石墨烯复合材料结构及电化学性能的影响

赵 清,赵彦亮,王玉龙,贾 帅,徐国智,陈永富,郭辉华

(太原工业学院材料工程系,山西 太原 030008)

摘 要:以柠檬酸为碳源,以对氨基苯甲酸为氮源,采用一步水热法合成掺氮碳量子点/还原氧化石墨烯(N-CQDs/rGO)复合材料,重点研究真空干燥与冷冻干燥对其形貌、组成及电化学性能的影响。结果表明,真空干燥导致材料结构致密化,使片层堆叠紧实,造成表面含氮物种的部分损失;冷冻干燥能够有效保持材料原有的蓬松片状结构,保留并暴露含氮官能团,吡咯氮表面氮含量提升至3.66%。电化学性能测试显示,冷冻干燥样品(N-CQDs/rGO-FD)比电容高达126.0 F/g,10 A/g下容量保持率为92.5%,电荷转移阻抗显著降低,离子扩散速率明显提高,全面优于真空干燥样品。冷冻干燥能够优化氮掺杂碳量子点复合材料微观结构与表面化学状态,提升超级电容器电极性能。

关键词:掺氮碳量子点;还原氧化石墨烯;冷冻干燥;超级电容器;电化学性能

中图分类号:TQ127.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0161-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.028

Effect of Different Drying Methods on Structure and Electrochemical Performance of Nitrogen-doped Carbon Quantum Dot/Reduced Graphene Oxide Composites

ZHAO Qing, ZHAO Yanliang, WANG Yulong, JIA Shuai, XU Guozhi, CHEN Yongfu, GUO Huihua

(Department of Materials Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China)

Abstract: Nitrogen-doped carbon quantum dots/reduced graphene oxide (N-CQDs/rGO) composites were synthesized via a one-step hydrothermal method using citric acid as the carbon source and *p*-aminobenzoic acid as the nitrogen source. The effects of vacuum drying and freeze drying on the morphology, composition, and electrochemical performance of the composites were systematically investigated. The results showed that vacuum drying led to densification of the material structure, resulting in compact stacking of the lamellae and causing partial loss of nitrogen-containing species on the surface. In contrast, freeze drying effectively preserved the original loose flaky structure, retained and exposed nitrogen-containing functional groups, with the surface nitrogen content of pyrrolic N increasing to 3.66%. Electrochemical performance tests revealed that the freeze-dried sample (N-CQDs/rGO-FD) exhibited a specific capacitance as high as 126.0 F/g, a capacity retention of 92.5% at 10 A/g, significantly reduced charge transfer impedance, and markedly improved ion diffusion rate, all of which were comprehensively superior to those of the vacuum-dried sample. Freeze drying can optimize the microstructure and surface chemical state of nitrogen-doped carbon quantum dot composites, thereby enhancing the electrode performance of supercapacitors.

Keywords: Nitrogen-doped carbon quantum dots; Reduced graphene oxide; Freeze drying; Supercapacitor; Electrochemical performance

收稿日期 Submitted date 2026-02-18;修回日期 Revised date 2026-03-19;录用日期 Accepted date 2026-04-03

基金项目:山西省基础研究计划项目(202303021212279);太原工业学院大学生创新训练项目(TITDC2025203)

联系人,zhaoqing202135@163.com

引用本文:赵清,赵彦亮,王玉龙,等.不同干燥方式对掺氮碳量子点/还原氧化石墨烯复合材料结构及电化学性能的影响[J].塑料科技,2026,54(8):161-166.

Citation: ZHAO Q, ZHAO Y L, WANG Y L, et al. Effect of different drying methods on structure and electrochemical performance of nitrogen-doped carbon quantum dot/reduced graphene oxide composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 161-166.

超级电容器作为一种新型的储能系统，凭借优异的循环性能、快速的充放电能力及较高的功率密度在电力系统、交通运输和航空航天等领域得到广泛应用[1]。碳基纳米材料，如碳纳米点(CNDs)和碳化聚合物点(CPDs)，具有独特的理化性质，已成为超级电容器、光催化及生物成像等领域的关键基础材料，被广泛应用于先进储能系统中[2-5]。碳量子点(CQDs)是一类尺寸小于10 nm的准球形碳纳米材料，其表面丰富的官能团赋予其良好的功能化潜力。近年来，杂原子掺杂技术的快速发展为碳材料的功能化提供了有效途径。掺杂引入的杂原子可显著提高材料的电导率，增加活性位点，增强电化学活性，使材料在电化学领域展现出广阔的应用潜力[6-10]。ZHAO等[11]采取水热法和KOH活化法制备含氮、含氧碳，研究富氮介孔碳在不同电解质中的超级电容器性能。结果表明，所制备的富氮介孔材料具有良好的电容性能。LIU等[12]通过钠金属辅助吡咯热解制备氮掺杂多孔碳。结果表明，在800 ℃下获得的材料氮含量约为3.3%，该材料作为超级电容器电极，具有倍率性能高和循环寿命长的特点。RASTOGI等[13]利用木香树皮和还原氧化石墨烯(rGO)水热合成一种新型复合材料，研究其在超级电容器中的光物理性能和电化学性能。结果表明：复合材料的比电容为134.68 F/g，在5 000次充放电循环中仍然保持良好。XIE等[14]在网状聚苯胺(PANI)中引入零维氮掺杂碳点(N-CDs)，研究N-CDs@PANI的电化学性能。结果表明，N-CDs具有丰富的官能团和高电子云密度，在引导PANI有序生长的过程中发挥重要作用。此外，N-CDs可以有效改善静电作用，提高比电容。

对氨基苯甲酸(PABA)作为叶酸合成的关键前体，参与叶酸的生成，间接影响DNA的合成与复制[15]。PABA的紫外吸收特性使其成为生产染发剂和防晒霜的重要功能性组分[16]。作为一种无毒且易于吸收的小分子，PABA衍生物已被报道具有抗癌、抗菌、抗病毒、抗氧化和抗炎等多重生物活性[17]，为其在临床试验中的潜在应用提供参考[18]。

真空干燥通常会造成不可复原的团聚。物质在干燥过程中，水分从内部孔道散发，表面张力产生极高的附加压力，导致复合物紧压在一起成为团块[19]。冷冻干燥的实质是将材料中的水先冷冻结冰，水分子形成一层层冰晶，干燥时冰在真空状态下直接从固态冰升华为水蒸气，升华过程不会对复合物的聚集状态产生影响，可以最大程度保留复合物蓬松的结构[20]。

本文以柠檬酸(CA)作为碳源，以PABA作为氮源，加入氧化石墨烯(GO)，采用一步水热法制备得到掺氮碳量子点/还原氧化石墨烯复合物(N-CQDs/rGO)，重点探究真空干燥与冷冻干燥对N-CQDs/rGO复合物形貌、表面官能团、元素组成及电化学性能的影响，为后续规模化生产提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

CA、无水乙醇，分析纯，国药集团化学试剂有限公司；PABA，分析纯，上海麦克林生化科技有限公司；GO，分析纯，苏州碳丰石墨烯科技有限公司。

1.2 仪器与设备

电子天平，FA2004，上海舜宇恒平科学仪器有限公司；超声波清洗机，SB-5200DT，宁波新芝生物科技股份有限公司；真空干燥箱，DZF-6055，上海一恒科学仪器有限公司；冷冻干燥机，SCIENTZ-10N/A，宁波新芝生物科技股份有限公司；扫描电子显微镜(SEM)，7200F，日本电子株式会社；X射线衍射(XRD)，SmartLab 9KW，日本理学株式会社；傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，TENSOR27，德国布鲁克公司；X射线光电子能谱(XPS)，ESCALAB 250Xi，美国Thermo Scientific公司；电化学工作站，CS350H，武汉科思特仪器股份有限公司。

1.3 样品准备

1.3.1 N-CQDs/rGO复合材料的制备

称取0.5 g CA为碳源、0.1 g PABA为氮源，与0.1 g GO一起溶于40 mL去离子水中，超声2 h，放入100 mL聚四氟乙烯(PTFE)反应釜，在180 ℃条件下反应12 h，反复冲洗固体后得到样品，记为N-CQDs/rGO。

1.3.2 N-CQDs/rGO的干燥

分别对N-CQDs/rGO进行真空干燥和冷冻干燥。具体如下：将N-CQDs/rGO置于真空干燥箱中，在80 ℃条件下干燥11 h，将样品记为N-CQDs/rGO-VD (真空干燥)。将N-CQDs/rGO冷冻20 h，再在冷冻干燥机内干燥12 h，将样品记为N-CQDs/rGO-FD (冷冻干燥)。

1.3.3 电极材料的制备

分别将N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD样品与乙炔黑、PTFE按质量比8∶1∶1进行混合，制作工作电极。工作电极在80 ℃条件下真空干燥12 h，用压片机在10 MPa下压制成电极片，用于测试。

1.4 性能测试与表征

SEM测试：使用SEM分析样品的形貌。加速电压为5~10 kV，工作距离为7~10 mm。

XRD测试：扫描范围为10°~80°，扫描速度为0.2 (°)/s，电压为45 kV，电流强度为200 mA。

FTIR测试：采用KBr压片法测试，波数范围为4 000~400 cm^{-1}。

XPS：采用Al Kα单色化X射线源，光斑宽度为500 μm，用于C 1s、N 1s高分辨谱及全谱采集。

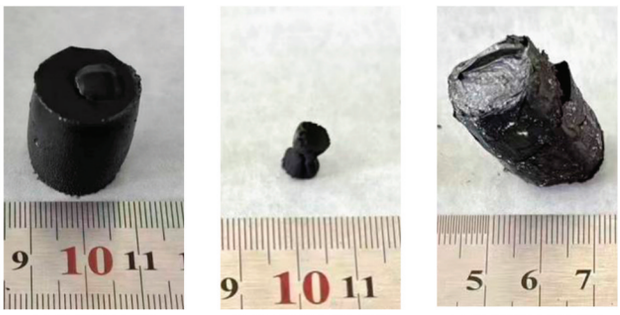
电化学性能测试：采用三电极体系进行电化学性能测试，电解液为6 mol/L KOH，参比电极为Hg/HgO电极。

2 结果与讨论

2.1 N-CQDs/rGO复合材料的表征

2.1.1 表面形貌

图1为样品的直观形貌。从图1可以看出，未干燥的样品呈现蓬松柱状；真空干燥样品体积急剧缩小，呈现块状；冷冻干燥后的样品体积无明显变化，呈现蓬松柱状。

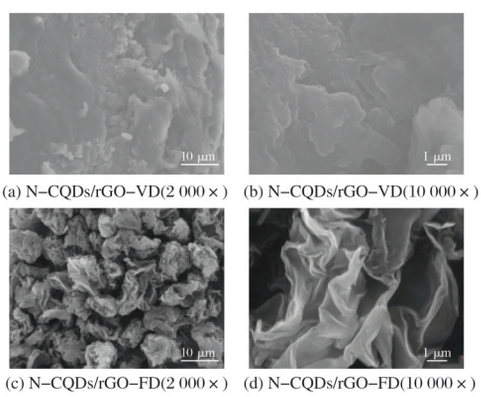


(a) N-CQDs/rGO (b) N-CQDs/rGO-VD (c) N-CQDs/rGO-FD

图1 样品的直观形貌

Fig.1 Intuitive morphology of samples

图2为样品的SEM照片。从图2可以看出，N-CQDs/rGO-VD样品结构致密，呈现块状；N-CQDs/rGO-FD样品结构蓬松，呈现片状，显示出丰富的层状堆积特征，与形貌直观图一致。这表明冷冻干燥可以较好地保持样品的结构完整性，符合不同干燥方式的特点。



(a) N-CQDs/rGO-VD(2 000×) (b) N-CQDs/rGO-VD(10 000×)

(c) N-CQDs/rGO-FD(2 000×) (d) N-CQDs/rGO-FD(10 000×)

图2 样品的SEM照片

Fig.2 SEM images of samples

2.1.2 XRD分析

图3为N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD的XRD谱图。从图3可以看出，N-CQDs/rGO-VD样品在25.9°与42.8°处有明显的宽峰，晶面间距分别为0.34 nm与0.21 nm，与石墨晶格的(002)晶面和(100)晶面相对应。这表明N-CQDs/rGO-VD仍然保持着石墨微晶结构[21]。N-CQDs/rGO-FD样品的(002)峰相较于N-CQDs/rGO-VD样品(002)峰有轻微的左移，在24.5°处出峰且峰形更宽，对应的晶面间距为0.36 nm，说明N-CQDs/rGO-FD样品具有更大的晶面间距，石墨化程度降低。而N-CQDs/rGO-VD样品的sp^2微晶碳堆叠得更为紧致，这与SEM结果一致[22-24]。

2.1.3 FTIR分析

图4为N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD的FTIR谱图。从图4可以看出，N-CQDs/rGO-VD与N-CQDs/rGO-FD样品的FTIR谱基本一致。3 432 cm^{-1}处的吸收峰对应O—H和N—H的伸缩振动，2 929 cm^{-1}处的吸收峰对应C—H的伸缩振动，1 722 cm^{-1}处的吸收峰对应C═O的伸缩振动，1 645 cm^{-1}处的吸收峰对应C═C的伸缩振动[25]，1 412 cm^{-1}处的吸收峰归属于C—N的伸缩振动。在1 000~1 200 cm^{-1}范围内的其他尖峰是由C—O和C—N伸缩振动和—OH弯曲振动引起的[26]。这些含氧、含氮官能团在改善N-CQDs/rGO复合材料浸润性的同时增加了材料表面活性位点的数量。

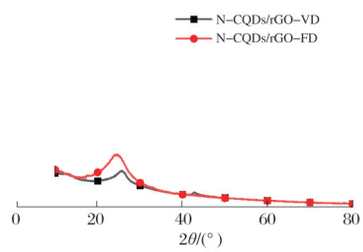


图3 N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD的XRD谱图

Fig.3 XRD patterns of N-CQDs/rGO-VD and N-CQDs/rGO-FD

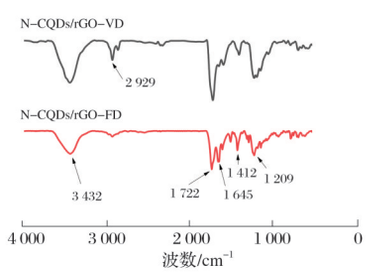


图4 N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD的FTIR谱图

Fig.4 FTIR spectra of N-CQDs/rGO-VD and N-CQDs/rGO-FD

为了进一步探索不同干燥方式N-CQDs/rGO复合材料的元素组成，采用XPS分析其表面状态。图5为N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD的XPS谱图。从图5a和图5b可以看出，N-CQDs/rGO复合材料主要是由碳(C)元素、氧(O)元素和氮(N)元素组成。经计算，N-CQDs/rGO-VD样品中3种元素的含量分别为81.21%、16.87%和1.92%；N-CQDs/rGO-FD样品中3种元素的含量分别为79.93%、16.41%和3.66%。真空干燥条件下，C元素含量升高，N元素含量降低。这可能是因为真空干燥导致材料结构部分致密化，引起表面含氮物种的轻微损失或包埋，XPS探测到的表面碳含量相对更高，氮含量相对更低。

从图5c和图5d可以看出，N-CQDs/rGO-VD在284.4、285.3、286.3、288.7 eV处的4个峰分别与C═C、C—N、C—O和O—C═O键相对应。N-CQDs/rGO-FD峰位置与N-CQDs/rGO-VD相似，这说明二者具有相同的官能团[27]。

从图5e和5f可以看出，N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD的高分辨N 1s谱均可以拟合拆分成吡啶氮、吡咯氮和石墨氮。3种氮物种中的N原子均直接嵌入碳骨架中[28]。吡啶氮和吡咯氮属于p型掺杂，可以引入活性位点和缺陷，增强材料电化学性能[29-31]。石墨氮则属于n型掺杂。冷冻干燥样品中吡咯氮占总氮含量的70.1%，真空

干燥样品中吡咯氮占总氮含量的26.1%。这说明冷冻干燥样品吡咯氮含量明显高于真空干燥样品，冷冻干燥能够更有效地保留吡咯氮结构，片层表面可以使吡咯氮充分暴露。

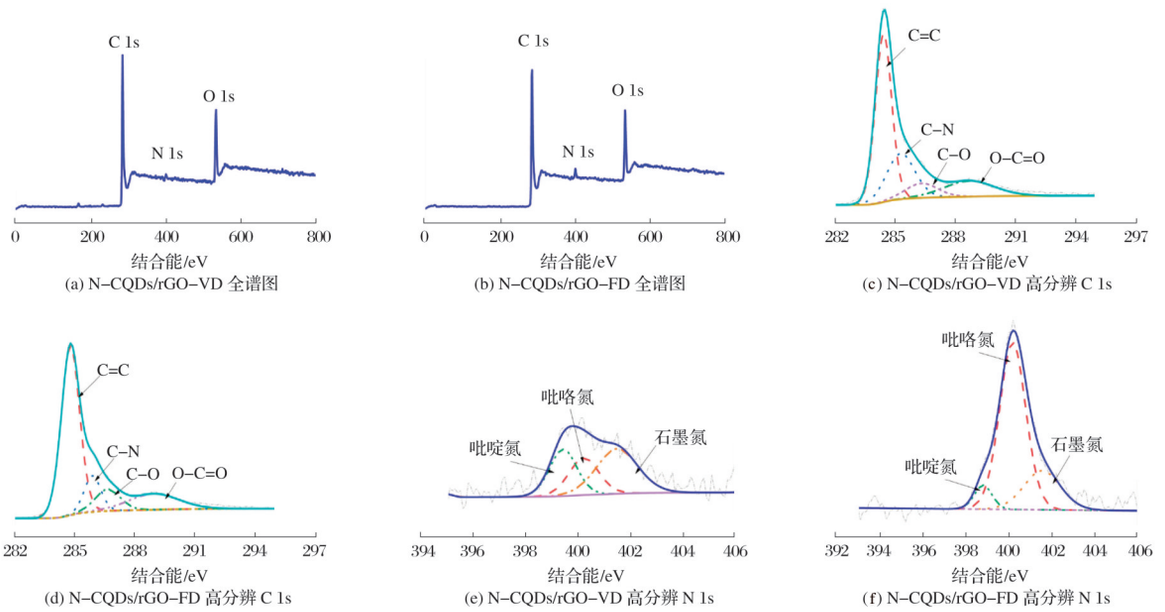


图 5　N-CQDs/rGO-VD 和 N-CQDs/rGO-FD 的 XPS 谱图

Fig.5 XPS spectra of N-CQDs/rGO-VD and N-CQDs/rGO-FD

2.2　干燥方式对 N-CQDs/rGO 复合材料电化学性能的影响

采用三电极体系对N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD的电化学性能进行测试，探究不同干燥方式对复合物电化学性能的影响。图6为N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD电极在扫描速率为50 mV/s时的循环伏安(CV)曲线。从图6可以看出，两种样品CV曲线形状近似矩形，伴有较小的驼峰，说明其电容行为以双电层电容为主导。此外，含N和含O官能团发生法拉第氧化还原反应，导致样品具有赝电容特性[32]。N-CQDs/rGO-FD电极的CV曲线略微大于N-CQDs/rGO-VD电极的CV曲线，说明冷冻干燥的样品具有较大的比电容。

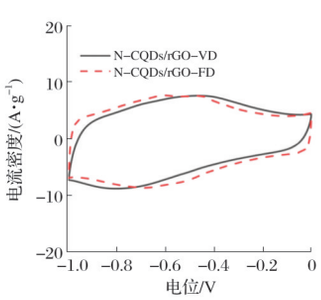


图 6　N-CQDs/rGO-VD 和 N-CQDs/rGO-FD 电极在扫描速率为 50 mV/s 时的 CV 曲线

Fig.6 CV curves of N-CQDs/rGO-VD and N-CQDs/rGO-FD electrodes at a scanning rate of 50 mV/s

图7为N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD电极在电流密度为1 A/g时的恒流充放电(GCD)曲线。利用图7放电时间计算出N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD电极的比电容分别为119.2 F/g和126.0 F/g，与CV分析一致。

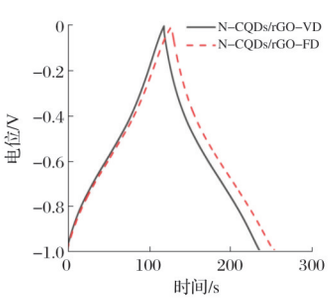


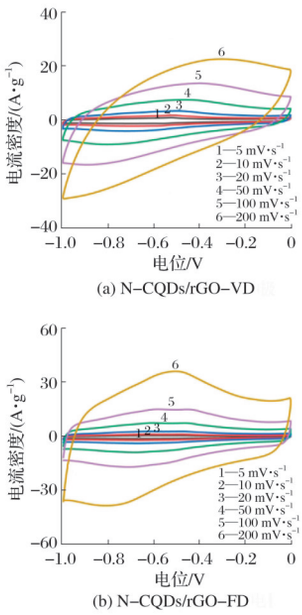
图 7　N-CQDs/rGO-VD 和 N-CQDs/rGO-FD 电极在电流密度为 1 A/g 时的 GCD 曲线

Fig.7 GCD curves of N-CQDs/rGO-VD and N-CQDs/rGO-FD electrodes at a current density of 1 A/g

在不同扫描速率下，对N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD电极进行CV测试。图8为N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD电极的CV曲线。从图8可以看出，扫描速率从5 mV/s增加至200 mV/s时，电流密度均显著增大。两图形状均近似矩形，表明材料具有典型的双电层电容行为。随着扫描速率的增加，曲线形状仍保持较好，说明材料具有良好的倍率性能和快速的电荷传输能力[33]。

在不同电流密度下，对N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD电极进行GCD测试。图9为N-CQDs/rGO-VD和N-CQDs/rGO-FD电极的GCD曲线。从图9可以看出，两种电极的GCD曲线均呈现近似三角形且电压降较小。这反映出以双电层电容为主导的电荷存储机制及良好的电化学可逆性。在相同电流密度下，N-CQDs/rGO-FD电极的放电时间较N-CQDs/rGO-VD电极略长，说明前者的

比电容更高。

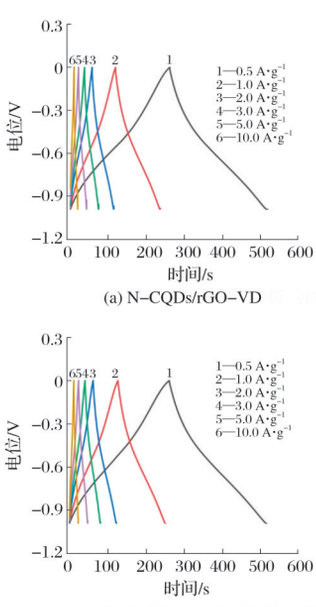


(a) N-CQDs/rGO-VD

(b) N-CQDs/rGO-FD

图 8　N-CQDs/rGO-VD 和 N-CQDs/rGO-FD 电极的 CV 曲线

Fig.8 CV curves of N-CQDs/rGO-VD and N-CQDs/rGO-FD electrodes



(a) N-CQDs/rGO-VD

(b) N-CQDs/rGO-FD

图 9　N-CQDs/rGO-VD 和 N-CQDs/rGO-FD 电极的 GCD 曲线

Fig.9 GCD curves of N-CQDs/rGO-VD and N-CQDs/rGO-FD electrodes

图 10 为 N-CQDs/rGO-VD 和 N-CQDs/rGO-FD 电极的倍率性能。从图 10 可以看出，N-CQDs/rGO-FD 电极的比电容均高于 N-CQDs/rGO-VD 电极。N-CQDs/rGO-VD 和 N-CQDs/rGO-FD 电极在 10 A/g 下的容量保持率分别为 85.8% 和 92.5%。N-CQDs/rGO-FD 电极的比电容下降幅度相对较小，说明其具有更好的倍率性能和结构稳定性。结合 SEM 与 XPS 分析，真空干燥样品较低的氮含量与致密化结构可能限制了电荷传输路径与离子扩散通道，进而导致倍率性能不及冷冻干燥样品。

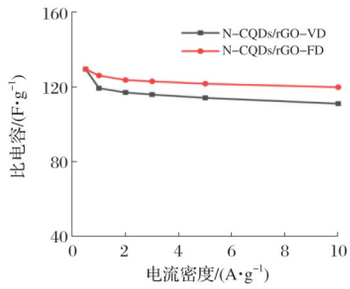


图 10　N-CQDs/rGO-VD 和 N-CQDs/rGO-FD 电极的倍率性能

Fig.10 Rate performance of N-CQDs/rGO-VD and N-CQDs/rGO-FD electrodes

图 11 为 N-CQDs/rGO-VD 和 N-CQDs/rGO-FD 电极的阻抗谱图。对图 11 进行数据拟合，结果显示，N-CQDs/rGO-VD 电极的欧姆电阻为 0.44 Ω，略低于 N-CQDs/rGO-FD 电极的 0.59 Ω，二者欧姆电阻差异较小；而 N-CQDs/rGO-FD 电极的电荷转移电阻(R_{ct})仅为 0.07 Ω，远低于 N-CQDs/rGO-VD 电极的 0.31 Ω。这表明 N-CQDs/rGO-FD 电极界面电子转移速率更快，电化学动力学更优异，反应可逆性更高。低频区阻抗谱显示，N-CQDs/rGO-FD 电极的斜率明显大于 N-CQDs/rGO-VD 电极，曲线更趋近于垂直，反映其具有更低的离子扩散阻力和更高效的离子传输通道。这一优势可归因于氮物种的有效保留与选择性暴露，冷冻干燥方法为材料提供了丰富的活性位点，从而显著改善了电荷转移动力学[6]。综上所述，N-CQDs/rGO-FD 电极在比电容、倍率性能和离子传输等方面均优于 N-CQDs/rGO-VD 电极。

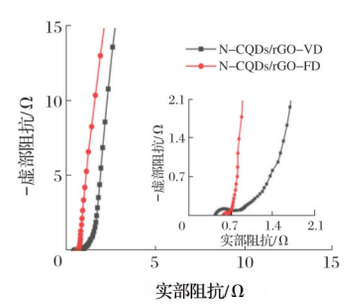


图 11　N-CQDs/rGO-VD 和 N-CQDs/rGO-FD 电极的阻抗谱图

Fig.11 Impedance spectra of N-CQDs/rGO-VD and N-CQDs/rGO-FD electrodes

3　结论

本研究系统比较真空干燥与冷冻干燥对 N-CQDs/rGO 复合材料结构与电化学性能的影响。结果显示，干燥方式影响材料的微观结构。真空干燥在毛细管力作用下导致材料严重收缩、结构致密化；冷冻干燥通过冰晶升华路径，完美保留了水热合成产物原始的蓬松片状形貌。干燥过程对氮物种的保留与暴露具有选择性。XPS 分析证实，冷冻干燥能够更有效地固定并暴露吡咯氮结构，使材料表面氮含量显著提高，氮含量由 N-CQDs/rGO-VD 的 1.92% 提升至 N-CQDs/rGO-FD 的 3.66%，这为法拉第赝电容反应提

供了更多活性位点。N-CQDs/rGO-FD样品因结构与组成优势表现出较为优异的电化学性能，比电容高达126.0 F/g，10 A/g下容量保持率为92.5%，电荷转移阻抗显著降低，离子扩散速率明显提高。因此，冷冻干燥可作为制备高性能氮掺杂碳基超级电容器电极材料的关键优化工艺。

参考文献

[1] GAO C, LIU J J, HAN Y X, et al. An energy-adjustable, deformable, and packable wireless charging fiber supercapacitor[J]. Advanced Materials, 2024, 36(49): 2413292.

[2] ANIL KUMAR Y, KOYYADA G, RAMACHANDRAN T, et al. Carbon materials as a conductive skeleton for supercapacitor electrode applications: A review[J]. Nanomaterials, 2023, 13(6): 1049.

[3] ANIL KUMAR Y, KOYYADA G, RAMACHANDRAN T, et al. Recent advancement in quantum dot-based materials for energy storage applications: A review[J]. Dalton Transactions, 2023, 52(25): 8580-8600.

[4] 裴贺兵, 莫尊理, 郭瑞斌, 等. 石墨烯量子点: 兼具高效和环保的新型超级电容器电极材料[J]. 材料导报, 2020, 34(21): 21093-21098.

[5] 李芮莹, 周颖, 周红军, 等. 生物质衍生纳米碳基材料: 电化学场景下的机遇与挑战[J]. 化工进展, 2025, 44(增刊 1): 288-306.

[6] MOHAMMED S J, MOHAMMED A S, ABDALLA K K, et al. Advances in nitrogen-doped carbon dots for electrochemical energy storage: From synthesis to applications[J]. Materials Advances, 2025, 6 (23): 8740-8773.

[7] AL-MASWARI B M, ELSHARKAWY E R, ALMOTAIRY A R Z, et al. Design of innovative nitrogen-doped carbon quantum dots integrated with magnetic nanocomposite barium ferrite for enhanced supercapacitors electrode performance[J]. Inorganic Chemistry Communications, 2026, 183: 115790.

[8] HASAN M A, ISLAM M M. Nitrogen-doped carbon quantum dots embedded polyoxomolybdate frameworks toward high-performance supercapacitor[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 98: 113015.

[9] 杨又鸣, 王焦飞, 张玉洁, 等. 氮掺杂技术在碳基材料中的应用进展[J]. 环境化学, 2025, 44(1): 41-52.

[10] SHAKU B, MOFOKENG T P, COVILLE N J, et al. Biomass valorisation of marula nutshell waste into nitrogen-doped activated carbon for use in high performance supercapacitors[J]. Electrochimica Acta, 2023, 442: 141828.

[11] ZHAO L, FAN L Z, ZHOU M Q, et al. Nitrogen-containing hydrothermal carbons with superior performance in supercapacitors[J]. Advanced Materials, 2010, 22(45): 5202-5206.

[12] LIU K L, ZHENG X W, WANG K K, et al. Sodium metal-assisted carbonization of pyrrole to prepare N-doped porous carbons for high-rate performance supercapacitors[J]. Carbon, 2019, 153: 265-273.

[13] RASTOGI P, NEGI P, RAWAT B S, et al. Optical and electrochemical analysis of nitrogen-doped carbon quantum dots from Moosa balbeesiaana peels for advanced supercapacitor applications[J]. Carbon Trends, 2024, 16: 100381.

[14] XIE F, ZHOU M C, WANG G Y, et al. Morphology-dependent electrochemical performance of nitrogen-doped carbon dots@polyaniline hybrids for supercapacitors[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(13): 7529-7540.

[15] MEIR Z, OSHEROV N. Vitamin biosynthesis as an antifungal target[J]. Journal of Fungi, 2018, 4(2): 72.

[16] DINARDO J C, DOWNS C A. Dermatological and environmental toxicological impact of the sunscreen ingredient oxybenzone/benzophenone-3[J]. Journal of Cosmetic Dermatology, 2018, 17(1): 15-19.

[17] AL-RUBAIE A Z, AL-JADAAN S A S, AL-WAHED A T A, et al. Synthesis, characterization and biological studies of some new organometallic compounds containing mercury, selenium and tellurium based on *p*-aminobenzoic acid[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2063(1): 012003.

[18] HAROON F, FARWA U, ARIF M, et al. Novel para-aminobenzoic acid analogs and their potential therapeutic applications[J]. Biomedicines, 2023, 11(10): 2686.

[19] 朱敏, 苏奇峰, 匡正霞, 等. 干燥方法对细菌纤维素膜的结构与性能影响[J]. 山东化工, 2021, 50(13): 14-17.

[20] 付浩成, 高文花, 王斌, 等. 不同干燥方式对木质素纳米纤维素纤丝结晶指数以及热稳定性能的影响[J]. 造纸科学与技术, 2019, 38(5): 1-6.

[21] 杨小龙, 王晨溟, 卢振杰, 等. 三维多孔碳纳米管-还原氧化石墨烯复合气凝胶应用于高性能对称超级电容器[J]. 无机化学学报, 2024, 40 (1): 155-163.

[22] CHEN G X, WU S L, HUI L W, et al. Assembling carbon quantum dots to a layered carbon for high-density supercapacitor electrodes[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 19028.

[23] RAWAL S, JOSHI B, KUMAR Y. Synthesis and characterization of activated carbon from the biomass of Saccharum bengalense for electrochemical supercapacitors[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 20: 418-426.

[24] NELSON D J, VASIMALAI N, JOHN S A, et al. Turn-off fluorometric determination of bilirubin using facile synthesized nitrogen-doped carbon dots as a fluorescent probe[J]. Journal of Fluorescence, 2025, 35 (2): 963-974.

[25] 张耀杰, 贾建波, 孙悦, 等. 煤基碳量子点衍生炭的形貌控制及电化学性能[J]. 煤炭转化, 2023, 46(3): 39-48.

[26] LÜ X M, MAN H S, DONG L J, et al. Preparation of highly crystalline nitrogen-doped carbon dots and their application in sequential fluorescent detection of Fe^{3+} and ascorbic acid[J]. Food Chemistry, 2020, 326: 126935.

[27] RAJA T A, VICKRAMAN P, JUSTIN A S, et al. Ultrasonicated graphene quantum dots dispersoid zinc ammonium phosphate hybrid electrode for supercapacitor applications[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2022, 33(9): 7079-7098.

[28] ZHAO P, SHEN B X, YANG M T, et al. Effect of nitrogen species on electrochemical properties of N-doped carbon nanotubes derived from co-pyrolysis of low-density polyethylene and melamine[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 67: 107569.

[29] 彭朝银, 姚耀春, 李银, 等. 杂原子掺杂磷酸铁锂碳包覆层的改性研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(19): 1-8.

[30] LIU Y C, SHI M J, YAN C, et al. Inspired cheese-like biomass-derived carbon with plentiful heteroatoms for high performance energy storage [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30(7): 6583-6592.

[31] 苑雪, 李洪基, 白文慧, 等. 生物质衍生碳基材料在钠离子电池负极中的应用[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(3): 721-742.

[32] 李敬迎. 碳量子点基复合材料的制备及其在对称和混合超级电容器中的应用[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2021.

[33] 贾帅, 李旭, 李迎春. 镍钴金属醇盐自模板衍生三元金属氢氧化物纳米片的制备及电化学性能研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(12): 128-135.