中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 9 期: 2319 ~ 2322
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
精选文章导读

基于Y型分枝碳管三维互连网格膜电极的小型化高性能滤波电容器

陈干[1,2], 韩方明[1,2*], 孟国文[1,2*], 魏秉庆[3*]

1. 中国科学院合肥物质科学研究院固体物理研究所材料物理重点实验室, 纳米材料与纳米技术安徽省重点实验室, 合肥 230031
2. 中国科学技术大学材料科学与工程系, 合肥 230026
3. Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, Newark DE 19716, USA
* E-mail: fmhan@issp.ac.cn; gwmeng@issp.ac.cn; weib@udel.edu

1 研究背景

滤波电容器作为交流-直流电能转换的核心元件, 用于保证输出直流电的质量与电子电路的可靠性. 传统的铝电解电容器广泛应用于滤波, 但其比电容量低、体积庞大, 难以满足电子设备集成化、小型化的发展趋势. 双电层电容器(EDLCs)具有高功率密度和长循环寿命, 体积与面积比电容量均远高于铝电解电容器, 有望成为下一代理想的小型化滤波电容器.

要将双电层电容器成功应用于滤波电路, 遇到的最大挑战是: 在同一电极结构内同时实现高的面积比电容(存储大量电荷)和快速的频率响应(快速充放电)[1]. 这就需要对电极结构进行精巧构思与合理设计. 高的面积比电容依赖于电极中大的电化学活性表面积, 这可通过在电极内引入微孔或表面纳米级粗糙度来实现; 而快速的频率响应则要求离子能够在电极内无阻碍地高速迁移至电极表面, 这需要电极内部具有开放、贯通的介孔与大孔通道. 而传统的多孔碳基材料电极中的弯曲孔道结构严重限制了离子的传输动力学, 无法满足滤波对高频率响应的要求[2].

基于三维互连多孔阳极氧化铝(3D-AAO)模板制备的碳管三维互连网格膜(3D-CT)电极, 如图1(a)所示, 为解决离子传输瓶颈提供了新思路[3]. 这种电极具有直通孔道和良好的导电网络, 显著提升了频率响应性能. 为了提高面积比电容, 研究人员又构建了大管中套小管的“管中管”结构碳管的三维互连网格膜电极(3D-CNT@CT)[4]、表面粗糙碳管的三维互连网格膜电极(3D-RCT)[4]、类似于“俄罗斯套娃”结构的多壳层碳管的三维互连网格电极(3D-TLCT)[5]以及由细直径碳管紧密排列的三维互连网格膜电极(3D-CACT)[6]等, 有效提升了碳管三维互连网格膜3D-CT电极的比表面积和滤波电容器的比电容.

2 本文工作

设计与研发能够协同优化离子传输动力学与电荷存储容量的新型电极结构, 是实现高性能、小型化滤波电容器的关键途径. 本文创新性地提出了一种新颖的分级多孔结构电极设计理念, 并成功制备了Y型分枝碳管的三维互连网格膜电极, 进而构筑了同时具有高面积比电容和优异频率响应性能的双电层滤波电容器.

本文提出了一种制备3D-AAO模板的新技术, 采用含微量铜杂质的铝箔, 通过精确控制的阶梯降低阳极氧化电压的方法, 在初始形成的大孔径垂直孔道内, 依据阳极氧化铝中孔的自组织形成规律, 分阶段诱导

英文全文见: Chen G, Han F M, Meng G W, et al. Hierarchically porous 3D Y-branched carbon tube grids for high-performance filter capacitors. Sci China Tech Sci, 2025, 68: 1420201, https://doi.org/10.1007/s11431-024-2850-6

© 2026《中国科学》杂志社

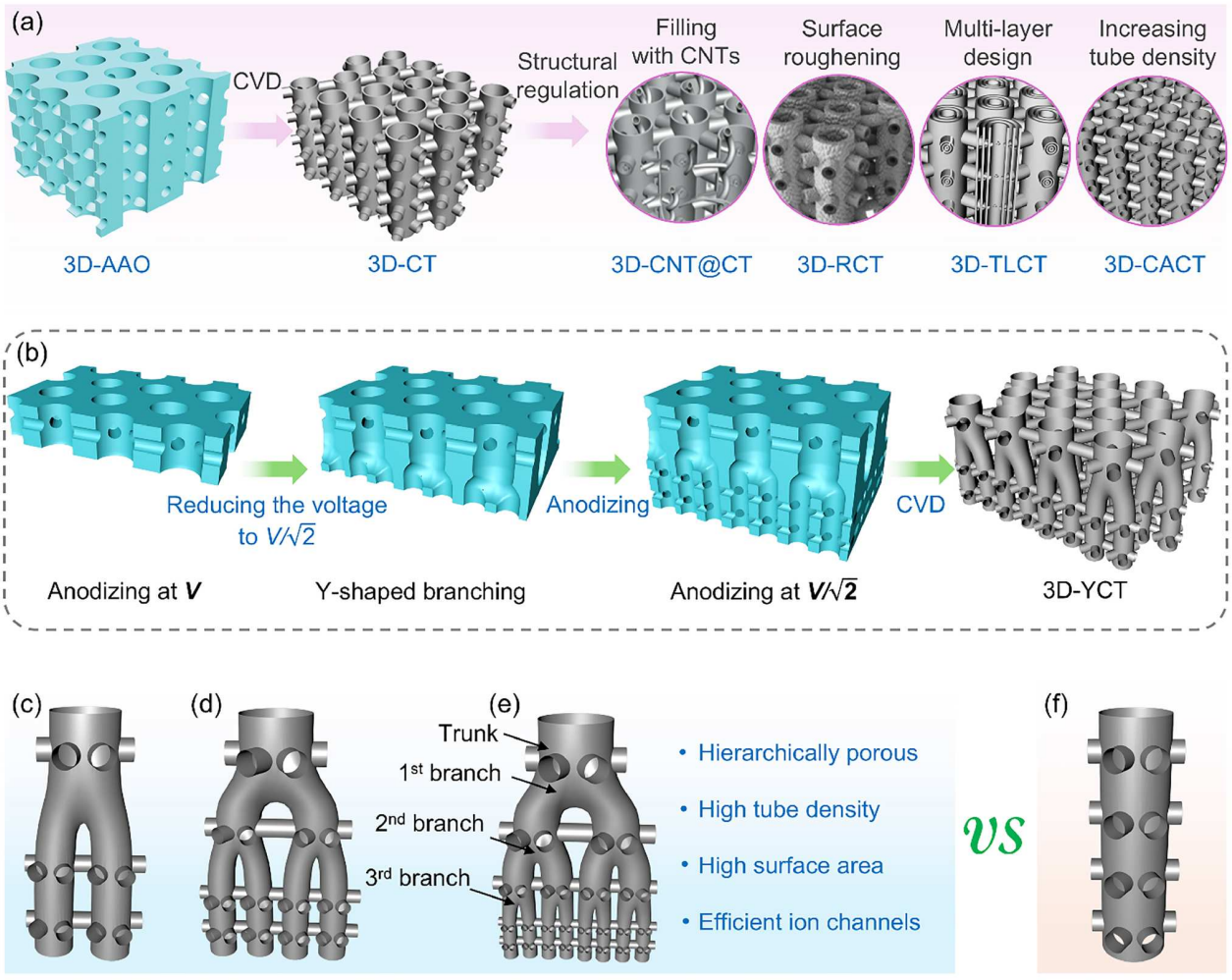


图 1 (网络版彩图) (a) 由3D-AAO模板制备的3D-CT、3D-CNT@CT、3D-RCT、3D-TLCT和3D-CACT示意图; (b) Y型分枝三维互连多孔氧化铝模板及制备对应形貌Y型分枝碳管三维互连网格膜电极(3D-YCT)的流程; (c) 三维互连一代Y分枝、(d) 二代Y分枝、(e) 三代Y分枝及(f) 未分支3D-CT示意图

Figure 1 (Color online) (a) Schematics of the 3D-CT, 3D-CNT@CT, 3D-RCT, 3D-TLCT, and 3D-CACT derived from 3D-AAO templates. (b) Preparation of 3D-YCT using a 3D-AAO template with a Y-shaped branching structure. Schematics of the (c) single-, (d) double-, (e) triple-generation 3D-YCT, and (f) un-branched 3D-CT.

产生多代Y型分枝孔, 构建出垂直孔分级体系. 随后, 通过选择性湿化学刻蚀去除镶嵌于孔壁中的杂质铜颗粒, 获得了Y型分枝孔被横向孔相互连通的三维互连多孔阳极氧化铝(图1(b)). 以该新型多孔阳极氧化铝为模板, 以乙炔为碳源进行化学气相沉积, 利用模板孔的空间限域诱导作用, 在模板的孔道内生长碳管, 去除模板后, 得到了结构可控的Y型分枝碳管的三维互连网格膜(3D-YCT)电极(图1(c)~(f)). 该结构中的大直径孔道(主干碳管)作为离子的快速输运通道, 而细分出的中、小孔道(分枝碳管、横向碳管)的比表面积大, 用于存储电荷, 形成了"高速主干道-密集分流支路"的理想快速离子传输与存储大量电荷的新体系. 通过系统调控分枝代数、各阶段阳极氧化时间等关键参数, 实现了对碳管的直径与密度的精确调控, 并优化了粗、细碳管在垂直方向上的高度比例(图2(a)~(c)), 实现了离子迁移动力学与电荷存储空间的协同提升.

将制备的Y型分枝碳管的三维互连网格膜3D-YCT

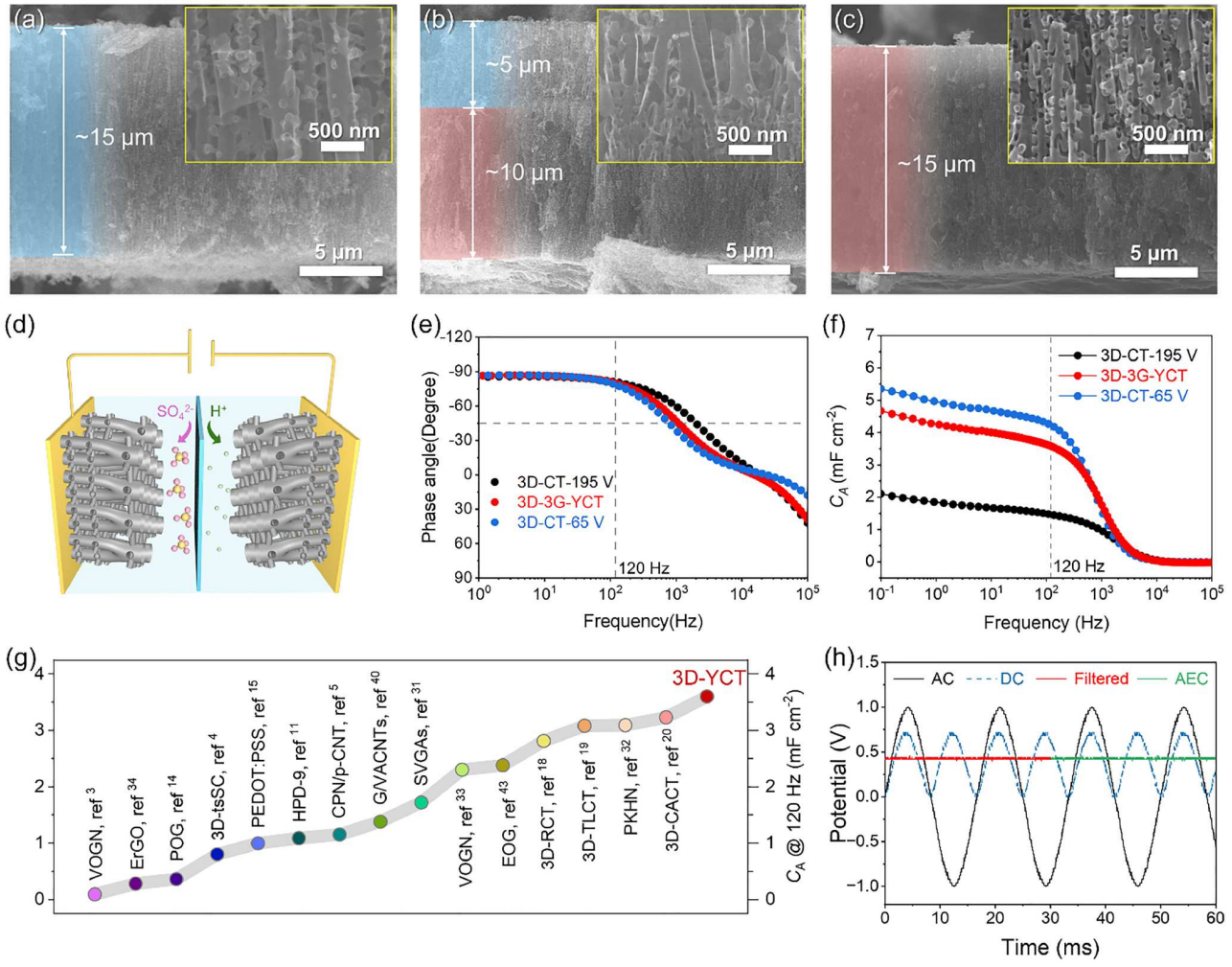


图 2　(网络版彩图) (a) 粗直径碳管的三维互连网格膜3D-CT电极、(b) 三代Y分枝碳管三维互连网格膜3D-YCT电极、(c) 细直径碳管的三维互连网格膜3D-CT电极的横截面扫描电镜图, 其厚度均约为 ~15 μm, 插图分别为其局部放大图像; (d) 基于3D-YCT电极的双电层电容器示意图; (e) 波特(Bode)图; (f) 不同频率下的面积比电容; (g) 基于Y分枝碳管三维互连网格膜3D-YCT电极构建的双电层滤波电容器, 与迄今报道的三明治构型交流滤波电容器的面积比电容比较(120 Hz ,相位角均接近或小于−80°); (h) 基于Y分枝碳管三维互连网格膜3D-YCT电极构建的器件, 与商业铝电解电容器的交流线路滤波结果

Figure 2　(Color online) Typical cross-sectional scanning electron microscope images of (a) 3D-CT with large vertical tubes, (b) triple-generation 3D-YCT, and (c) 3D-CT with small vertical tubes electrodes with a thickness of ~15 μm. The insets show high-magnification images; (d) schematic of the 3D-YCT-based EDLC; (e) Bode plots; (f) specific areal capacitance versus frequency; (g) comparison of the specific areal capacitance at 120 Hz of 3D-YCT-based EDLC with other reported sandwich-type electrochemical capacitors used in AC filter circuits with a phase angle near or less than −80°; (h) AC line-filtering results of the 3D-YCT-based EDLC and a commercial aluminum electrolytic capacitor.

作为电极, 组装成对称型双电层电容器(图2(d)), 并进行了系统的电化学性能测试. 通过电化学阻抗谱、循环伏安法等, 评估器件的本征电容、电阻、频率响应和循环稳定性等. 进一步搭建了桥式整流滤波模拟电路, 发现新构建的双电层电容器能够很好地将交流电转换为平滑的直流电, 并与商用铝电解电容器的滤波性能进行了对比. 表明本文设计构筑的新型双电层电容器是一种小型化高性能滤波电容器, 有望替代商用铝电解滤波电容器, 满足电子设备集成化、小型化的发展趋势.

3　本文结论

实验结果表明, 基于三代Y分枝碳管三维互连网

格膜3D-YCT电极的双电层电容器, 在120 Hz工作频率下, 面积比电容高达3.6 mF cm^{-2}, 同时相位角仍保持在−80°(图2(e)和(f)). 这一性能显著超越了此前报道的多种三明治构型的滤波超级电容器(图2(g)). 结构表征与电化学分析结果表明, 通过增加Y分枝碳管的代数, 能有效提升电极的比表面积与碳管密度, 从而提升器件的面积比电容量; 通过优化不同直径碳管的纵向高度比例, 促进离子在分级孔道中的快速传输, 从而维持了优异的频率响应. 在实际滤波性能测试中发现, 该器件能够将正弦波、方波、三角波等多种输入信号转换为波动较小的直流输出, 其滤波效果与商用铝电解电容器相当(图2(h)). 此外, 该电极材料还展现出良好的倍率性能与循环稳定性.

总之, 本文设计研发的分级多孔碳管互连网格膜电极, 实现了对离子传输动力学与电荷存储容量的协同优化, 为发展下一代小型化高性能滤波元件, 以及高端电子设备的集成化、小型化、便携化发展, 提供了新思路与方案.

参考文献

1 Miller J R, Outlaw R A, Holloway B C. Graphene double-layer capacitor with AC line-filtering performance. Science, 2010, 329: 1637–1639

2 Hu Y, Wu M, Chi F, et al. Ultralow-resistance electrochemical capacitor for integrable line filtering. Nature, 2023, 624: 74–79

3 Han F, Meng G, Lin D, et al. Ultrahigh-power electrochemical double-layer capacitors based on structurally integrated 3D carbon tube arrays. Nano Res, 2023, 16: 12849–12854

4 Han F, Qian O, Meng G, et al. Structurally integrated 3D carbon tube grid-based high-performance filter capacitor. Science, 2022, 377: 1004–1007

5 Chen G, Han F, Lin D, et al. Three-dimensional multi-layer carbon tube electrodes for AC line-filtering capacitors. Joule, 2024, 8: 1080–1091

6 Chen G, Han F, Ma H, et al. High density 3D carbon tube nanoarray electrode boosting the capacitance of filter capacitor. Nano-Micro Lett, 2024, 16: 235