

超级电容器负极材料研究进展

唐尉钧, 何安凤, 李晨康, 冯雪敏, 胡勤政*

北部湾大学石油与化工学院, 广西 钦州

收稿日期: 2026年6月29日; 录用日期: 2026年7月22日; 发布日期: 2026年7月29日

摘要

超级电容器凭借高功率密度与长循环寿命在储能领域占据重要地位, 但负极材料研发滞后已成为制约其能量密度提升的关键瓶颈。本文系统综述了碳基、金属基(过渡金属氧化物、过渡金属硫/硒化物、MXenes)、以及MOF/COF衍生物等负极材料体系的研究进展, 从储能机制、性能特征与改性策略三方面展开论述。碳基材料以双电层储能为基, 通过孔结构工程与杂原子掺杂实现高功率与长循环; 过渡金属氧化物经纳米结构设计及碳复合克服导电性差与体积膨胀; 过渡金属硫/硒化物凭借异质结构构筑与阴离子掺杂提升本征导电性与结构稳定性; MXenes利用金属级导电性与可调表面官能团展现优异倍率性能; MOF/COF衍生物则凭借可设计拓扑结构与杂原子掺杂实现高比容量与能量密度。在此基础上, 本文新增了综合比较与讨论章节, 通过关键性能指标对比表格对各体系进行横向评估, 总结了共性挑战, 并从储能机制创新、多级结构精准调控、器件集成优化与可持续规模化制备四个方向提出展望, 以为高性能负极材料的理性设计提供参考。

关键词

超级电容器, 负极材料, 碳基材料, 金属基材料, MOF/COF衍生物

A Research Progress on Anode Materials for Supercapacitors

Weijun Tang, Anfeng He, Chenkang Li, Xuemin Feng, Qinzhen Hu*

College of Petroleum and Chemical Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou Guangxi

Received: June 29, 2026; accepted: July 22, 2026; published: July 29, 2026

Abstract

Supercapacitors occupy an important position in the field of energy storage due to their high power

*通讯作者。

文章引用: 唐尉钧, 何安凤, 李晨康, 冯雪敏, 胡勤政. 超级电容器负极材料研究进展[J]. 材料化学前沿, 2026, 14(3): 391-401. DOI: 10.12677/amc.2026.143036

density and long cycle life. However, the lagging development of anode materials has become a key bottleneck restricting the improvement of their energy density. This paper systematically reviews the research progress of anode material systems, including carbon-based, metal-based (transition metal oxides, transition metal sulfides/selenides, MXenes), and MOF/COF derivatives, discussing them from three aspects: energy storage mechanism, performance characteristics, and modification strategies. Carbon-based materials are based on electric double-layer energy storage, achieving high power and long cycling through pore structure engineering and heteroatom doping. Transition metal oxides overcome poor conductivity and volume expansion through nanostructure design and carbon compositing. Transition metal sulfides/selenides enhance intrinsic conductivity and structural stability through heterostructure construction and anion doping. MXenes exhibit excellent rate performance by utilizing metal-level conductivity and tunable surface functional groups. MOF/COF derivatives achieve high specific capacity and energy density through designable topological structures and heteroatom doping. On this basis, this paper adds a comprehensive comparison and discussion section, providing a horizontal evaluation of each system through a table comparing key performance indicators, summarizing common challenges, and proposing prospects from four directions: innovation in energy storage mechanisms, precise control of multi-level structures, device integration optimization, and sustainable large-scale preparation, aiming to provide a reference for the rational design of high-performance anode materials.

Keywords

Supercapacitors, Anode Materials, Carbon-Based Materials, Transition Metal Compounds, MOF/COF Derivatives

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

全球工业化与城镇化推高能源消费，传统化石燃料引发资源与环境危机，推动能源结构向可再生能源转型。可再生能源的间歇性亟需高效电化学储能技术，使其成为研究热点[1]-[3]。锂离子电池、燃料电池与超级电容器是三大主流储能技术。超级电容器兼具高功率密度、秒级快充、超长循环寿命、宽温区工作及绿色环保等优势，在制动能量回收、电网调频等领域具有不可替代的应用价值[4]-[6]。

超级电容器性能主要由电极材料决定。目前正极材料研发已取得突破，而负极材料发展滞后，成为制约整体性能提升的核心瓶颈[7]-[9]。负极材料需兼顾高导电性、适配孔结构、优异稳定性，并实现与正极在容量、电位与动力学上的高度匹配，直接决定器件的工作电压与储能效率[10]-[15]。因此，基于上述碳基、过渡金属氧化物、过渡金属硫/硒化物、MXenes、及 MOF/COF 衍生物等负极材料在储能机制、性能瓶颈与改性策略方面的系统梳理与横向对比，本文围绕材料本征特性优化与结构界面协同调控两条主线，深入开展超级电容器负极材料的理性设计与性能研究，旨在揭示不同材料体系的优势与局限，突破现有体系在比容量、倍率性能与循环稳定性等方面的关键制约，为推动高性能超级电容器负极材料的实用化发展提供理论与技术支撑。

2. 超级电容器概述

储能机制与分类

超级电容器的分类普遍认为有三种：双电层电容器，赝电容器和混合型电容器[16]。

双电层电容是最基础的储能机制,本质为物理静电吸附,是碳基材料的核心储能方式。电极与电解液接触时,固-液界面形成双电层结构,充放电过程中离子快速吸附/脱附,实现电能与静电势能转换。该机制完全可逆、动力学极快、循环寿命超长,比容量取决于有效比表面积及孔结构适配性[17]-[19]。

赝电容基于电极表面快速可逆的法拉第氧化还原反应,能量密度高于双电层电容,但循环与倍率性能略逊。与电池体相反应不同,赝电容仅发生在材料表层,保持高可逆性与快动力学特征。根据反应类型可分为欠电位沉积型、氧化还原型及插层式,电化学特征表现为 CV 曲线出现宽化氧化还原峰, GCD 曲线呈非线性斜线[20]-[22]。

混合型电容器是当前高性能器件的主流构型,通过正负极不同机制耦合互补。通常以赝电容/电池型材料为正极、双电层碳基材料为负极,实现高容量与高稳定性的协同。其优势在于储能机制协同与工作电压窗口拓宽,后者对能量密度提升呈平方关系。器件性能核心取决于正负极的电荷平衡与电位匹配,已在制动能量回收、电网调频等场景广泛应用[22]-[24]。

3. 负极材料分类

根据材料组成和储能机制,超级电容器负极材料可分为以下几类。

3.1. 碳基负极材料

3.1.1. 活性炭与多孔碳

活性炭与多孔碳具有高比表面积和可调控的孔结构,是双电层电容的主要贡献者。孔结构工程是提升其性能的关键:微孔提供高比表面积以增强电容,介孔作为离子传输通道保障倍率性能,大孔充当离子缓冲层缩短扩散距离,三者协同构建的分级孔结构可实现高比电容与优异倍率性能的统一[25][26]。生物质衍生碳因其原料丰富、可再生、成本低廉的优势成为重要发展方向。Xue 等人[27]提出一种绿色机械化学策略,通过水合溶剂化调控与磷酸二氢铵(ADP)协同作用,在富含缺陷的香蕉皮基生物炭上构筑缺陷边缘功能化吡咯型 N-P=O (Dpr-N-P=O)构型。该构型以 N、O 为亲电中心、P 为亲核中心,显著增强界面电荷转移与氧化还原活性。优化电极比电容达 $414 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$, 电容较未加水合溶剂化样品提升 8.74 倍;组装超级电容器在 $450 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下能量密度达 $30.68 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$, 循环 30,000 次后电容保持率达 105.26%, 实现了缺陷与掺杂构型的协同增效(图 1)。

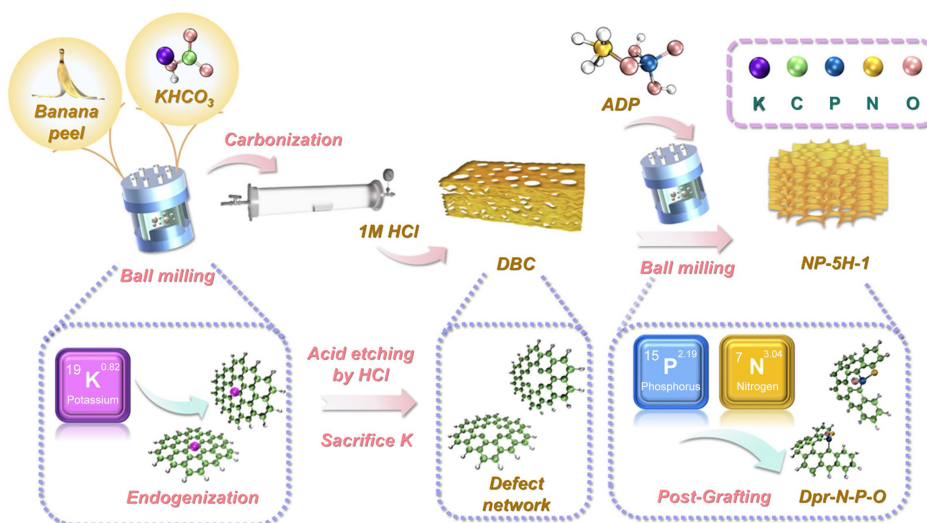


Figure 1. Synthesis process and properties of Dpr-N-P=O [27]

图 1. Dpr-N-P=O 合成过程与性能[27]

3.1.2. 碳纳米管与石墨烯

作为纳米碳材料的代表,碳纳米管与石墨烯在超级电容器负极应用中各具优势:碳纳米管具有一维管状结构和高长径比,可构筑长程导电网络;石墨烯则以超高理论比表面积($2630\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)和优异的电子迁移率成为理想的双电层电容材料。然而,石墨烯在实际应用中易发生片层堆叠,导致有效比表面积大幅降低,同时其疏水表面也限制了电解质离子的有效浸润。

针对上述问题,研究者发展了多种解决策略,其中杂原子掺杂与多维复合构筑是两条主要的技术路线。前者从电子结构调控入手,后者则着眼于微观形貌设计,二者相辅相成,共同推动石墨烯基负极材料的性能提升。

杂原子掺杂是提升石墨烯电化学性能的有效手段之一。通过在石墨烯晶格中引入氮、硼、磷等杂原子,可在碳骨架中产生缺陷位点并调控电子结构,同时贡献额外的赝电容。最新研究表明,三元杂原子共掺杂可产生优于单元素或双元素掺杂的协同效应。Kaur 等人[28]采用水热法成功合成了硼、磷、氮三元共掺杂石墨烯(BPNG)。由于硼的电子缺陷特性与氮、磷的协同作用,以 BPNG 组装的对称超级电容器能量密度达 $23.4\text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$,循环 5000 次后容量保持率为 84.62%,展现出优异的循环稳定性[28] (图 2)。

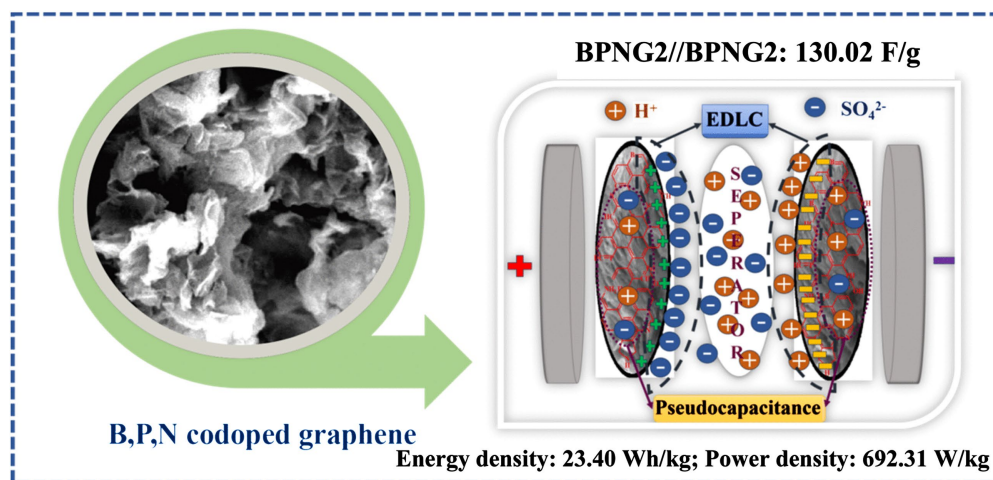


Figure 2. Schematic diagram of BPNG symmetric supercapacitor device [28]

图 2. BPNG 对称超级电容器器件示意图[28]

然而,仅靠掺杂策略难以从根本上解决石墨烯片层的物理堆叠问题。为此,研究者进一步发展了碳纳米管与石墨烯的复合构筑策略,这一策略与掺杂改性形成互补。掺杂重在调控电子结构,而复合构筑重在优化物理形貌。碳纳米管与石墨烯的复合可充分发挥二者的协同优势:一维碳纳米管作为“骨架”提供长程导电通道,二维石墨烯作为“叶片”贡献高比表面积,二者形成类似“树枝-树叶”结构的高效传输与存储网络。Chen 等人[29]采用化学气相沉积法,在“骨架-毛细管”碳纳米管网络中实现了多孔石墨烯的原位生长,成功制备了柔性全碳纳米结构电极。此结构中,毫米级长碳纳米管作为骨架提供长程导电性,微米级短碳纳米管作为毛细管将高比表面积石墨烯与骨架紧密缠绕,形成了紧密结合的集成结构。该自支撑电极无需添加聚合物粘结剂,可直接用作超级电容器电极,展现了优异的柔韧性(拉伸强度达 5.4 MPa)和约 $102\text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的电导率,比表面积高达 $959.3\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 。组装的对称超级电容器能量密度为 $53.1\text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$,功率密度为 $800\text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与掺杂策略相比,复合构筑不仅抑制了石墨烯堆叠,还构建了无需粘结剂的自支撑电极,在柔性和结构稳定性上更具优势。由此可见,从“原子尺度掺杂”到“纳米尺度复合”的演进,体现了碳基材料研究从单一性能优化向多级结构协同设计的趋势(图 3)。

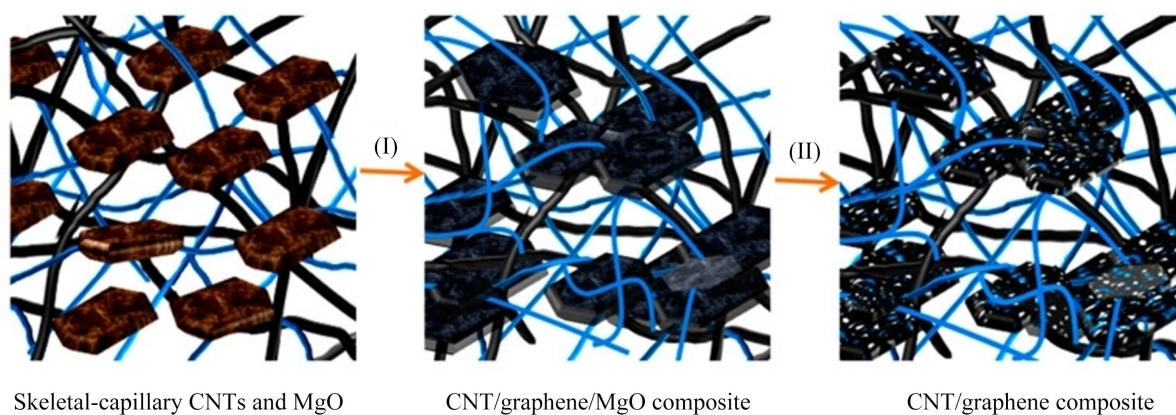


Figure 3. Schematic diagram of “skeleton-capillary” carbon nanotube structure [29]

图 3. “骨架 - 毛细管” 碳纳米管结构示意图[29]

3.2. 金属基负极材料

金属基材料凭借丰富的氧化还原反应活性、多价态离子提供的法拉第电荷存储能力，以及远高于碳材料的理论比容量，成为赝电容负极材料的研究热点。根据成分与结构差异，主要包括金属氧化物、金属硫化物/硒化物以及 MXenes 等。

3.2.1. 过渡金属氧化物

过渡金属氧化物(Transition Metal Oxides, TMOs)如 Fe_2O_3 、 Mn_3O_4 、 Bi_2O_3 等，在负电位窗口下通过金属离子价态变化发生快速可逆的氧化还原反应，实现赝电容储能。以 Fe_2O_3 为例，其在碱性电解液中的储能机制可表示为： $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{OH}^-$ ，该反应在较宽负电位窗口内保持可逆性，使其成为负极材料的重要候选。

然而，金属氧化物应用于负极时面临两大核心挑战：一是本征导电性差，限制了电子传输和倍率性能；二是充放电过程中的体积膨胀/收缩易导致电极结构粉化，循环稳定性下降。针对上述问题，研究者发展了多种改性策略。其中，纳米结构设计旨在缩短离子/电子传输路径并增加活性位点，而与碳材料复合则侧重构建导电网络并缓冲体积膨胀。两者策略互补，可协同克服金属氧化物的固有缺陷。

然而，单靠形貌调控难以从根本上解决金属氧化物的导电性问题。因此，与碳材料复合成为另一重要策略。这一策略与纳米结构设计形成功能互补：前者重在缩短离子传输路径，后者则着力构建电子传输网络。碳材料作为导电骨架可构筑三维电子传输网络，同时缓冲体积变化。Chae 等人[30]采用 γ 辐照策略在碳纳米纤维上工程化碳/钴纳米结构(C/Co)，辐照过程促进形成均匀的 C/Co 纳米棒结构，同时修复 sp^3 碳缺陷为 sp^2 网络并增强 Co-N-C 配位作用。该复合材料展现出双功能特性：作为负极时，在 $1 \text{ A} \cdot \text{g}^{-1}$ 电流密度下比电容达 $84 \text{ F} \cdot \text{g}^{-1}$ ，组装的不对称超级电容器在 $1011 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ 功率密度下能量密度达 $46.3 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，循环 20,000 次后容量保持率达 97%。值得注意的是，上述两种策略并非相互排斥，将纳米结构与碳复合相结合，已成为当前过渡金属氧化物负极改性的主流范式(图 4)。

3.2.2. 过渡金属硫化物/硒化物

与氧化物相比，金属硫化物(如 FeS_2 、 Bi_2S_3 、 V_3S_4)和金属硒化物(如 Fe_2Se_3 、 Bi_2Se_3)具有更高的本征导电性和更灵活的层状结构，有利于离子插层和电荷传输，因此在负极应用中展现出独特优势。在硫/硒化物材料的研究中，研究者从异质结构构筑和阴离子掺杂两个维度开展了系统探索。前者通过相界面协同提升电化学活性，后者则利用硒的高导电性优化硫化物晶格，两种策略各有侧重、互为补充。

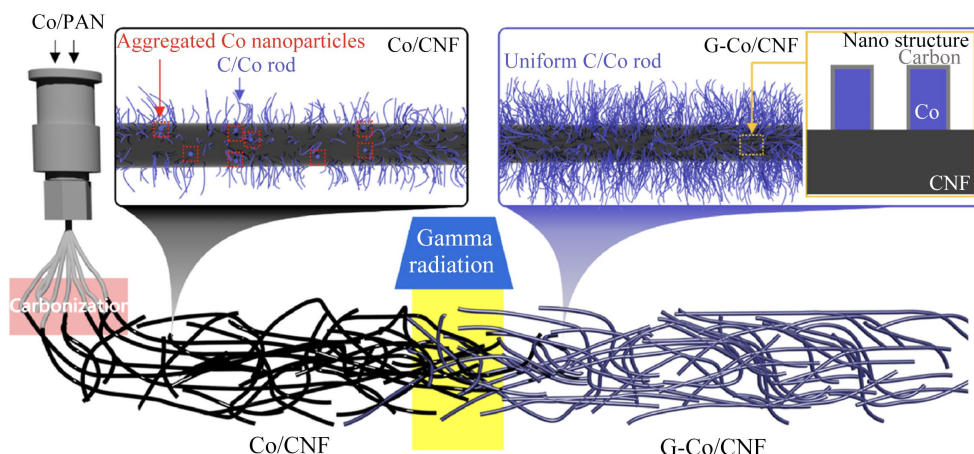


Figure 4. Schematic diagram of C/Co nanorod structure [30]

图 4. C/Co 纳米棒结构结构示意图[30]

异质结构设计方面,通过构建硫化物与硒化物的核壳异质结构,可充分发挥相界面的协同效应。Akbar 等人[31]采用溶剂热法制备了 $\text{FeS}_2\text{-FeSe}_2$ 核壳凹坑状球体,再经过高温煅烧得到石墨烯包裹的 $\text{GW@FeS}_2\text{-FeSe}_2$ 的材料。这些双相异质结构充分发挥了相界面的协同效应:硫化物提供稳定的骨架支撑,硒化物贡献高导电性和丰富的电化学活性位点。该复合材料在 $1\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 电流密度下面电容达到 $634.60\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$, 经过循环 5000 次后容量保持率为 90.7% (图 5)。

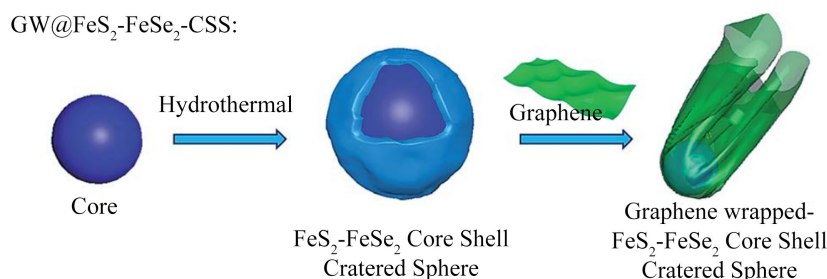


Figure 5. Schematic diagram of the synthesis of $\text{GW@FeS}_2\text{-FeSe}_2$ [31]

图 5. $\text{GW@FeS}_2\text{-FeSe}_2$ 的合成示意图[31]

3.2.3. MXenes 基负极材料

MXenes 是一类新型二维过渡金属碳/氮化物,通式为 $\text{M}_{n+1}\text{X}_n\text{T}_x$ ($n = 1, 2, 3$), 其中 M 为前过渡金属, X 为碳或氮, T 为表面官能团(-OH、-O、-F 等)。以 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 为代表的 MXenes 兼具金属级导电性、亲水性表面和可调的层间结构,在宽负电位窗口下展现出优异的倍率性能和循环稳定性。

表面化学对 MXene 的电化学性能具有决定性影响。研究表明, -O 官能团是参与氧化还原反应的主要活性位点,层间具有高自由度的水分子则促进离子传输。Stephanie 等人[32]采用单层 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene (SL-MXene)作为负极,在 $11.49\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 下实现了 $459.77\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ 的高比电容。MXene 表面丰富的-F 和-O 端基增强了材料的润湿性,有利于与富质子电解质形成氢键,从而促进高效的电荷存储。

针对 MXene 片层团聚及表面官能团有限的问题, Ma 等人[33]通过优化集成策略,将原位生长聚合物碳化、碱处理与模板牺牲三种方法结合,制备了自支撑无粘结剂的 P-MXene/ $\text{C}_{\text{PAQ-A}}$ 电极。该电极在 $5\text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描速率下比电容达 $532.9\text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$, 在 $20\text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 电流密度下循环 40,000 次后容量保持率为 97.1%, 较原始 MXene 电极(79.6%)和 P-MXene-A 电极(77.3%)有显著提升,同时兼具良好的机械柔韧性(图 6)。

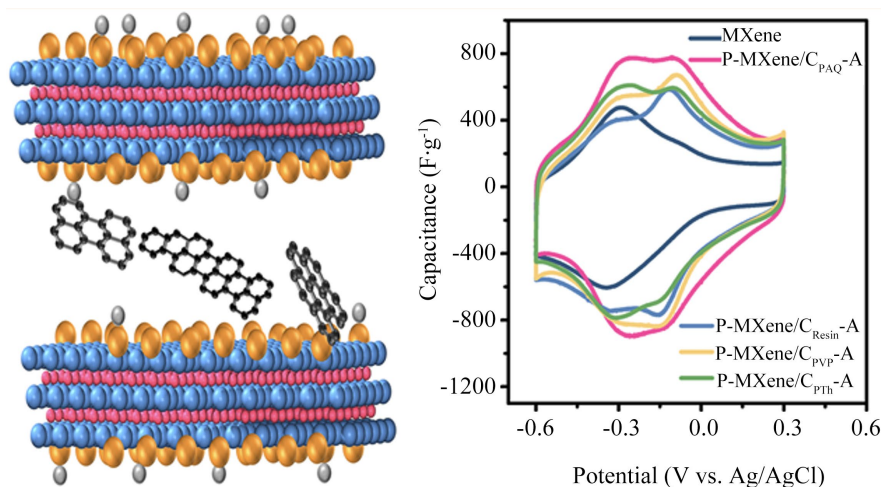


Figure 6. Schematic diagram of P-MXene/CPAQ-A structure and CV curve [33]
图 6. P-MXene/CPAQ-A 结构示意图及 CV 曲线[33]

4. 其他新兴负极材料

除碳基、金属基与导电聚合物三大经典体系外，金属有机框架(MOFs)、共价有机框架(COFs)及其衍生物等新兴材料因独特的拓扑结构与可调功能化特性，近年来在超级电容器负极领域展现出巨大潜力。

4.1. 金属有机框架(MOFs)及其衍生物

MOFs 是由金属节点(如 Zn、Co、Ni、Fe、Bi 等)与有机配体自组装形成的多孔晶体材料，具有高比表面积、规则孔道及可设计的活性位点。其衍生物(如热解碳、金属氧化物/硫化物/氮化物/碳化物)可继承 MOFs 的结构优势并优化导电性。通过调控热解条件，MOF 衍生物可实现多组分(金属氧化物、氮化物、碳化物)的原位复合，为解决金属基材料导电性差和体积膨胀问题提供了新路径。

以主族金属 Bi 为例，Yu 等人[34]以 Bi-MOF (CAU-17)为前驱体，热解制得碳包覆 $\text{Bi}_2\text{O}_3@\text{C}$ 微棒。原位碳层提升了导电性并缓冲体积膨胀，该负极在 $0.5 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 下比容量达 $1378 \text{ C}\cdot\text{g}^{-1}$ ，4000 次循环后保持率 93%；组装的非对称器件能量密度达 $49 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与之相比，过渡金属 Fe 基 MOF 衍生物则更侧重于多组分协同。Wang 等人[35]将 Fe-MOF 热解获得 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_3\text{N}/\text{Fe}_3\text{C}$ 三组分复合物，其中 Fe_3N 与 Fe_3C 显著改善导电性。该负极比容量为 $415.2 \text{ C}\cdot\text{g}^{-1}$ ($1 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$)，器件能量密度达 $49.85 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，6000 次循环保持率 90.6%。两类体系共同表明：通过调控 MOF 前驱体的金属组成和热解条件，可实现衍生物结构与性能的精定制。然而，MOF 衍生策略仍面临大规模制备及金属残留等挑战，有待进一步突破。

4.2. 共价有机框架(COFs)及其衍生物

共价有机框架(COFs)作为一类由有机结构单元通过强共价键定向连接形成的晶态多孔材料，凭借其本征优异的化学与电化学稳定性、原子级精准可调的分级孔道结构、可分子级定制的氧化还原活性位点与原位均匀可控的杂原子掺杂特性，在超级电容器负极材料领域展现出独特的应用优势，成为高性能储能电极材料的核心研究体系之一。针对 COF 导电性不足的问题，研究者通过高温碳化氮掺杂策略，提升石墨化程度并引入杂原子活性位点来改善电化学性能。Chen 等人[36]采用高温碳化制备氮掺杂 COF (N-COF)，碳化后 I_D/I_G 从 1.11 降至 0.95，石墨化程度提高，吡啶氮活性位点增加。N-COF 在 $0.5 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ 下比电容为 $267.53 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ ，组装的非对称电容器能量密度达 $81.21 \text{ Wh}\cdot\text{k}\cdot\text{g}^{-1}$ (功率密度 $1499.62 \text{ W}\cdot\text{k}\cdot\text{g}^{-1}$)，10,000 次循环保持率 90.56% (图 7)。

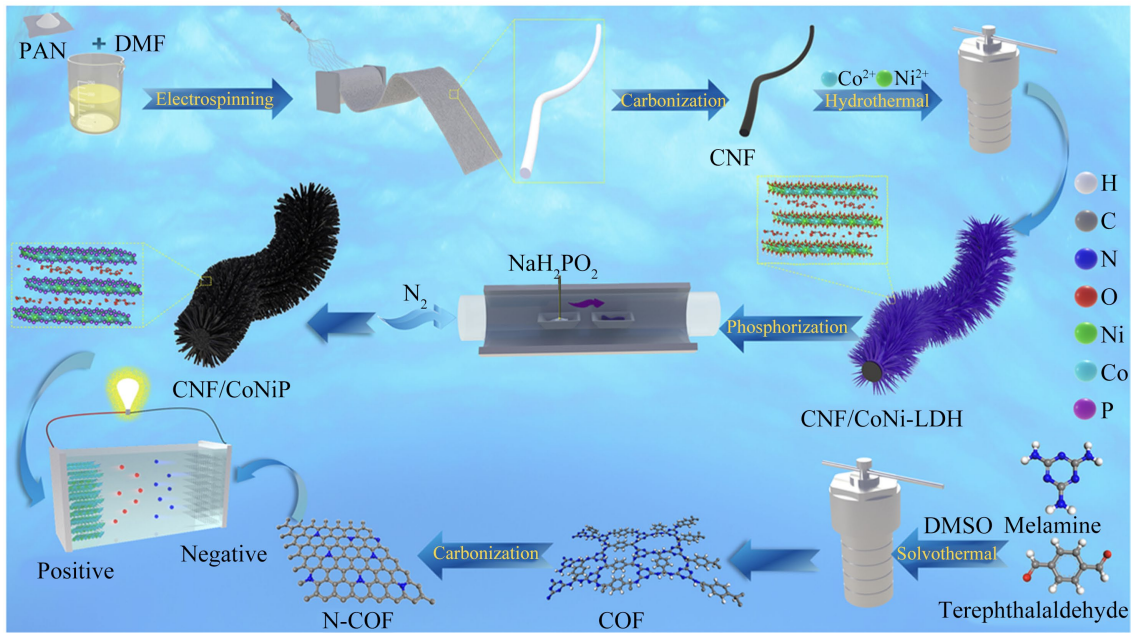


Figure 7. Synthesis flowchart of CNF/CoNiP and N-COF [36]
图 7. CNF/CoNiP 和 N-COF 的合成流程图[36]

5. 综合比较与讨论

从表 1 可以看出，各类材料各有优劣：碳基材料成本低、技术成熟，但比容量提升空间有限，适合对成本敏感、长寿命要求的场景(如电网调频)。过渡金属氧化物理论容量高，但导电性和循环稳定性是短板，与碳复合后可明显改善。过渡金属硫/硒化物导电性优于氧化物，但结构重构问题仍需解决。MXenes 综合性能突出，尤其倍率性能和循环寿命优异，但制备成本较高且规模化工工艺尚不成熟。MOF/COF 衍生物凭借可设计的拓扑结构和杂原子掺杂，在比容量和能量密度上展现出突破性潜力，但合成复杂、成本高，尚处前沿探索阶段。

Table 1. Comparison of key performance characteristics of various supercapacitor anode materials
表 1. 各类超级电容器负极材料关键性能对比

材料	比电容 (F·g ⁻¹)	能量密度 (Wh·kg ⁻¹)	能量密度 (W·kg ⁻¹)	循环稳定性	成本	技术成熟度
碳基材料	100~450	5~53	10~10 ⁴	>90%	低	高
过渡金属氧化物	200~800	10~46	500~10 ³	70%~85%	中等	中等
过渡金属硫/硒化物	300~900	15~78	50~5000	80%~90%	中等	较低
MXenes	300~530	10~30	10 ⁴ ~10 ⁵	~90%	高	较低
MOF/COF 衍生物	400~1400	40~80	800~4000	80%~90%	高	低

在实际器件设计中，应根据应用场景权衡选择：高功率、长寿命场景优先选用碳基或 MXenes；高能量密度需求(如便携电子设备)可选用过过渡金属氧化物/硫化物与碳的复合材料；柔性可穿戴领域则 MOF/COF 衍生物更具潜力。混合型电容器通过正负极异质材料匹配，已成为突破单一材料性能极限的主流路径。

6. 总结与展望

本文系统梳理了超级电容器负极材料的研究进展。碳基材料方面,活性炭与多孔碳通过分级孔结构工程实现了比容量与倍率性能的协同优化;碳纳米管与石墨烯通过杂原子掺杂与“骨架-毛细管”复合结构,有效抑制了石墨烯堆叠,构建了高效导电网络。过渡金属氧化物经纳米结构设计与碳材料复合,显著改善了导电性与体积膨胀问题。过渡金属硫/硒化物通过异质结构构筑与阴离子掺杂,在提升本征导电性和结构稳定性方面展现出独特优势。MXenes 凭借金属级导电性与可调表面官能团,在宽负电位窗口下展现出优异的倍率性能和循环稳定性。MOF/COF 衍生物则利用可设计的拓扑结构与杂原子掺杂,在比容量和能量密度上取得了突破性进展。综合比较与讨论表明,碳基材料成本低、技术成熟,适合长寿命应用;过渡金属氧化物/硫/硒化物容量高但需复合改性;MXenes 综合性能优异但制备成本高;MOF/COF 衍生物潜力巨大但尚处前沿阶段。混合型电容器通过正负极异质材料匹配,已成为突破单一材料性能极限的主流路径。

未来研究可从以下方向深入:一是挖掘体相储能与表面储能融合的新型机制,突破容量极限;二是实现原子尺度到宏观尺度的多级结构精准调控,贯通材料-界面-器件协同设计;三是强化正负极匹配与器件集成,开发适配新型电解液(如固态电解质、高电压水系电解液)的负极体系;四是推进可持续材料的规模化制备,结合人工智能辅助加速材料筛选与工艺优化;五是深化 MOF/COF 等新兴材料的导电改性研究,探索碳化与掺杂协同策略,实现“结构-导电-活性”三位一体设计。通过材料创新、结构设计及系统集成的协同推进,有望突破现有技术瓶颈,为高性能超级电容器的实用化发展提供有力支撑。

致 谢

感谢广西壮族自治区大学生创新创业训练计划项目(S202411607262)和北部湾大学引进高层次人才科研启动项目(2022KYQD16)的支持。

参考文献

- [1] Dědek, I., Šedajová, V., Kupka, V., Zedníček, T., Primavesi, L., Aurbach, D., *et al.* (2025) High-Performance Carbon-Based Supercapacitors. *2D Materials*, **12**, Article ID: 043004. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/adb653>
- [2] Lin, S., Luo, S., Yan, H., Cai, Z., Zhao, Y., Zhang, J., *et al.* (2025) Integrated Flexible Planar Supercapacitors Based on Noncarbonized Wood. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **17**, 60692-60701. <https://doi.org/10.1021/acsami.5c17295>
- [3] Das, T., Verma, S. and Verma, B. (2026) An Overview of Composite Electrode Materials in Supercapacitors and Their Performance. *Journal of Energy Storage*, **143**, Article ID: 119781. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.119781>
- [4] Liu, L., Zhang, X., Liu, Y. and Gong, X. (2025) Electrochemical Energy Storage Devices—Batteries, Supercapacitors, and Battery-Supercapacitor Hybrid Devices. *ACS Applied Electronic Materials*, **7**, 2233-2270. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.5c00069>
- [5] Anjana, P.M. and Aminabhavi, T.M. (2025) Supercapattery: Energy Storage Devices Combining Functionalities of Battery Electrodes and Supercapacitor Electrodes. *Journal of Energy Storage*, **134**, Article ID: 118265. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118265>
- [6] Mallick, S., Bag, S. and Retna Raj, C. (2025) Supercapacitors for Energy Storage: Fundamentals and Materials Design. *Journal of Chemical Sciences*, **137**, Article No. 65. <https://doi.org/10.1007/s12039-025-02394-7>
- [7] Hou, J., Ning, Y., Guo, K., Jiao, W., Chen, C., Zhang, B., *et al.* (2025) Application of Metal-Organic Framework Materials in Supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, **113**, Article ID: 115535. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115535>
- [8] Volfkovich, Y.M. (2024) Application of Graphenes in Supercapacitors: A Review. *Russian Journal of Electrochemistry*, **60**, 1198-1227. <https://doi.org/10.1134/s1023193524700642>
- [9] Gao, T., Lai, C.W., Rangappa, S.M., Siengchin, S., Gapsari, F., Li, Y., *et al.* (2025) MXene-Based Materials for Supercapacitors: Trends and Opportunities. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **36**, Article No. 1877. <https://doi.org/10.1007/s10854-025-15850-4>

- [10] Dědek, I., Kupka, V., Šedajová, V., Jakubec, P., Navrátil, M. and Otyepka, M. (2026) Toward Transitioning to Green and Sustainable Supercapacitors. *Chemical Engineering Journal*, **529**, Article ID: 172220. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.172220>
- [11] Oyedotun, K.O. and Mamba, B.B. (2024) New Trends in Supercapacitors Applications. *Inorganic Chemistry Communications*, **170**, Article ID: 113154. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113154>
- [12] Kolavada, H., Gajjar, P.N. and Gupta, S.K. (2024) Unraveling Quantum Capacitance in Supercapacitors: Energy Storage Applications. *Journal of Energy Storage*, **81**, Article ID: 110354. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110354>
- [13] Gao, M., Wang, F., Yang, S., Gaetano Ricciardulli, A., Yu, F., Li, J., *et al.* (2024) Engineered 2D MXene-Based Materials for Advanced Supercapacitors and Micro-Supercapacitors. *Materials Today*, **72**, 318-358. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2023.12.009>
- [14] Bahadur, R., Wijerathne, B. and Vinu, A. (2024) Multiple Heteroatom Doped Nanoporous Biocarbon for Supercapacitor and Zinc-Ion Capacitor. *ChemSusChem*, **17**, e202400999. <https://doi.org/10.1002/cssc.202400999>
- [15] Banerjee, S., Mordina, B., Sinha, P. and Kar, K.K. (2025) Recent Advancement of Supercapacitors: A Current Era of Supercapacitor Devices through the Development of Electrical Double Layer, Pseudo and Their Hybrid Supercapacitor Electrodes. *Journal of Energy Storage*, **108**, Article ID: 115075. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115075>
- [16] Gharanli, S., Gharib, A., Moharramnejad, M., Karim, A., Malekshah, R.E., Karimi, F., *et al.* (2025) Environmentally Friendly Nickel-Based Nanocomposites for Energy Storage: A Review of Supercapacitor and Battery-Type Mechanisms. *Journal of Energy Storage*, **122**, Article ID: 116509. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116509>
- [17] Deng, L., Wang, Z., Cui, H., Guo, Y., Ye, Z., Li, H., *et al.* (2024) Mechanistic Understanding of the Underlying Energy Storage Mechanism of α -MnO₂-Based Pseudo-Supercapacitors. *Advanced Materials*, **36**, Article ID: 2408476. <https://doi.org/10.1002/adma.202408476>
- [18] Yao, Y., Rui, X., Bai, R., Ouyang, Y., Li, G., Zhao, Y., *et al.* (2025) Roadmap for Next-Generation Electrochemical Energy Storage Technologies: Secondary Batteries and Supercapacitors. *ACS Nano*, **19**, 30568-30687. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.4c10091>
- [19] Hu, W., Hu, B., Zheng, Q., Shan, G. and Du, M. (2025) A Critical Review on Boosting Cycling Stability of Layered Double Hydroxides for Supercapacitors: Degradation Mechanism and Rational Design. *Journal of Energy Storage*, **134**, Article ID: 118278. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118278>
- [20] Shi, C., Feng, S., Li, X., Zhang, J. and Mai, L. (2022) Free-Standing Pearl-Chains-Like MoO₂ Hierarchical Nanowires with Enhanced Pseudocapacitive Energy Storage. *Batteries & Supercaps*, **5**, e202200343. <https://doi.org/10.1002/batt.202200215>
- [21] Cheng, S., Gao, W., Cao, Z., Yang, Y., Xie, E. and Fu, J. (2022) Selective Center Charge Density Enables Conductive 2D Metal-Organic Frameworks with Exceptionally High Pseudocapacitance and Energy Density for Energy Storage Devices. *Advanced Materials*, **34**, Article ID: 2109870. <https://doi.org/10.1002/adma.202109870>
- [22] Quek, G., Roehrich, B., Su, Y., Sepunaru, L. and Bazan, G.C. (2021) Conjugated Polyelectrolytes: Underexplored Materials for Pseudocapacitive Energy Storage. *Advanced Materials*, **34**, Article ID: 2104206. <https://doi.org/10.1002/adma.202104206>
- [23] Lin, M., Lu, M., Chou, H., Wan, G. and Chen, C. (2023) Intercalation of Hydrogen in Perovskite Oxide for Pseudocapacitive Energy Storage. *Chemistry of Materials*, **35**, 10487-10494. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.3c01985>
- [24] Liu, S., Huang, H., Yang, C., Liu, Y., Li, H., Xia, H., *et al.* (2022) Electrochemical Activation Enabling Structure Reconstruction of Fe-Doped MnO₂ for Enhancing Pseudocapacitive Storage. *Chemical Engineering Journal*, **441**, Article ID: 135967. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135967>
- [25] Li, G., Guo, X., Liu, Y., Sun, J., Yang, H., Zheng, Y., *et al.* (2025) Revealing the “Double-Layer Ionic Monotonic Adsorption” Electrochemical Ion Storage Mechanism of Nano-Confined Porous Carbon. *Chemical Engineering Journal*, **520**, Article ID: 165799. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.165799>
- [26] Byambadorj, T., Zhang, J., Li, Y., Wang, F., Liu, Q. and Chen, M. (2026) Advanced Biomass-Derived Carbon Materials for Supercapacitors: Fabrication Methods, Structure-Property Relationships, Modifications, and Prospects. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **1000**, Article ID: 119573. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2025.119573>
- [27] Xue, Y., Shen, Y. and Li, K. (2026) Green Mechano-Aqueous Dual-Tuning Enables Defect-Conserved N-P-O Coordination in Plant-Biochar for Ultrastable Supercapacitors. *Chemical Engineering Journal*, **527**, Article ID: 171372. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.171372>
- [28] Kaur, A., Pandey, O.P. and Brar, L.K. (2026) Ternary Heteroatom (B, P, N) Doped Graphene for High-Performance Supercapacitors. *RSC Advances*, **16**, 8682-8692. <https://doi.org/10.1039/d5ra09572g>
- [29] Chen, T., Li, H., Wang, J. and Jia, X. (2024) Flexible All-Carbon Nanoarchitecture Built from in Situ Formation of Nanoporous Graphene within “Skeletal-Capillary” Carbon Nanotube Networks for Supercapacitors. *Nanomaterials*, **14**, Article 1683. <https://doi.org/10.3390/nano14201683>

- [30] Chae, S., Bae, H., Park, J., Kim, J. and Khil, M. (2026) Bifunctional Supercapacitor Electrode Based on Gamma-Radiation-Engineered Carbon/Cobalt Nanoarchitecture Anchored on Carbon Nanofibers. *Composites Part B: Engineering*, **318**, Article ID: 113641. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2026.113641>
- [31] Mohammadi Zardkhoshoui, A., Hosseiny Davarani, S.S., Maleka Ashtiani, M. and Sarparast, M. (2019) Designing an Asymmetric Device Based on Graphene Wrapped Yolk-Double Shell NiGa₂S₄ Hollow Microspheres and Graphene Wrapped FeS₂-FeSe₂ Core-Shell Cratered Spheres with Outstanding Energy Density. *Journal of Materials Chemistry A*, **7**, 10282-10292. <https://doi.org/10.1039/c9ta00532c>
- [32] Stephanie, R., Park, C.Y., Hyun, M.S., Ghaferi, A.A., Han, H., Alhajri, E., *et al.* (2024) Longevous Protic Hybrid Supercapacitors Using Bimetallic Prussian Blue Analogue/rGO-Based Nanocomposite against MXene Anode. *Small*, **21**, Article ID: 2406369. <https://doi.org/10.1002/sml.202406369>
- [33] Ma, R., Zhang, X., Zhuo, J., Cao, L., Song, Y., Yin, Y., *et al.* (2022) Self-Supporting, Binder-Free, and Flexible Ti₃C₂T_x MXene-Based Supercapacitor Electrode with Improved Electrochemical Performance. *ACS Nano*, **16**, 9713-9727. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c03351>
- [34] Yu, X., Sun, J., Zhao, W., Zhao, S., Chen, H., Tao, K., *et al.* (2020) MoF-Derived Bi₂O₃@C Microrods as Negative Electrodes for Advanced Asymmetric Supercapacitors. *RSC Advances*, **10**, 14107-14112. <https://doi.org/10.1039/d0ra01470b>
- [35] Wang, S., Wang, S., Guo, X., Wang, Z., Mao, F., Su, L., *et al.* (2021) An Asymmetric Supercapacitor with an Interpenetrating Crystalline Fe-MoF as the Positive Electrode and Its Congenetic Derivative as the Negative Electrode. *Inorganic Chemistry Frontiers*, **8**, 4878-4886. <https://doi.org/10.1039/d1qi00864a>
- [36] Chen, L., Zheng, B., Song, S., Shu, H., Gao, D., Li, T., *et al.* (2025) Carbon Nanofibers Coated with Phosphorized Coni-Layered Double Hydroxide//Nitrogen-Doped Covalent Organic Framework Flexible Asymmetric Supercapacitors. *Journal of Alloys and Compounds*, **1039**, Article ID: 183215. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.183215>