

导电聚合物基柔性超级电容器电极材料的研究进展与展望

何杉杉^{1,2}, 卢俊杰¹, 兰海蝶^{1*}

1.新疆师范大学化学化工学院, 新疆 乌鲁木齐 830054

2.乌鲁木齐市第三中学, 新疆 乌鲁木齐 830054

DOI:10.61369/ME.2026040024

摘 要 : 随着化石燃料能源的日益枯竭, 电化学储能技术, 尤其是超级电容器, 因其高功率密度和超长循环寿命而备受关注。导电聚合物, 特别是具有供体-受体(D-A)结构的共轭聚合物, 这种聚合物也具有显著的优势, 比如良好的电化学性能、导电性能, 也正是因为其具有这些优势, 其未来也有着较好的发展前景。本文系统综述了柔性超级电容器研究进展, 重点讨论导电聚合物基柔性电极的构建策略、性能优势及其在柔性储能器件中的应用进展, 并展望了未来研究方向。

关 键 词 : 超级电容器; 柔性电极材料; 双电层电容器; 赝电容器; 混合型超级电容器

Research Progress and Prospects of Conductive Polymer-Based Flexible Supercapacitor Electrode Materials

He Shanshan^{1,2}, Lu Junjie¹, Lan Haidie^{1*}

1.College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054

2.Urumqi No.3 Middle School, Urumqi, Xinjiang 830054

Abstract : With the increasing depletion of fossil fuel energy sources, electrochemical energy storage technologies—particularly supercapacitors—have garnered significant attention due to their high power density and exceptionally long cycle life. Conductive polymers, especially conjugated polymers with donor-acceptor (D-A) structures, exhibit notable advantages such as excellent electrochemical performance and conductivity, which endow them with promising future prospects. This article provides a systematic review of recent advances in flexible supercapacitor research, focusing on the construction strategies and performance advantages of conductive polymer-based flexible electrodes, as well as their applications in flexible energy storage devices, while outlining future research directions.

Keywords : supercapacitor; flexible electrode materials; double-layer capacitor; pseudocapacitor; hybrid supercapacitor

引言

在全球能源需求不断增长和化石燃料资源的逐渐枯竭推动了电化学储能技术的快速发展^[1]。随着可穿戴设备和智能手机等便携式电子产品的兴起, 对储能器件的柔性、可穿戴性等功能提出了新的要求^[2]。在柔性储能器件研发过程中, 电极制备常使用粘结剂等添加剂, 增加了界面电阻, 限制了电化学性能的提升^[3]。因此, 开发无添加剂、高导电, 具高能量密度、高功率密度和优异机械性能的柔性电极成为当前研究的热点^[4, 5]。

一、超级电容器概述

超级电容器通常也被称为电化学电容器, 是一种与电池相比具有高功率密度和超长循环寿命的储能器件, 与传统电容器相比

超级电容器具有更高的能量密度^[6, 7]。超级电容器的工作原理也是十分简单, 其内部有一个能够导电的锡箔, 可视为电极, 一旦通电, 正负电荷就会聚集在两个电极上, 进而完成放电。超级电容器的出现, 能弥补传统电容器的空白, 它不仅能延长使用寿命

基金项目: 新疆师范大学大学生创新训练项目(X202510762040)。

作者简介: 何杉杉(1998.12-), 女, 汉族, 湖北省宜昌市人, 硕士研究生, 研究方向: 功能高分子材料。

通信作者: 兰海蝶(1998.12-), 女, 回族, 新疆伊宁人, 讲师, 硕士研究生, 研究方向: 功能高分子材料。

长,同时出存储电十分快,不同于传统电池,是因为超级电容器内部主要分为三种电容器,分别是双电层电容器、赝电容电容器和混合型超级电容器。三种电容器也发挥着不同的作用,也正是三种电容器的相互融合,才能让存储的电量和能量更高,有效解决传统双层电容器储能少、电容器容易损坏的问题。超级电容器也是未来科研人员研究的重点方向,精细化研究,可更好地了解电容器在不同领域的应用价值。现阶段随着社会的发展,市面上的电子产品也五花八门,这也为超级电容器的未来发展带来了更多可能性,如会渗透在不同行业,并也为行业的发展带来便利。

二、柔性电极材料的研究进展

柔性电极材料作为柔性超级电容器的关键组成部分,在提高设备电化学性能方面起着至关重要的作用,需具备高度的柔韧性,也是传统材料无法达到的效果当下。科研人员也应加强对柔性电极材料的深入研究,以便更好地了解此材料未来发展前景,能将其应用到更多领域,发挥其价值。

(一) 过渡金属氧化物

柔性电极材料还涉及到过渡金属氧化物,它同样值得研究人员深入研究而该材料具有不同价态。下面将从两个维度展开详细探讨。第一,在放电过程中,不同价态的元素会以氢或氧化物的形态呈现,两者可相互转换。与传统的碳材料相比,金属氧化物能够为超级电容器提供更高的能量密度,它们通过快速的法拉第反应在改善电极电容方面起着至关重要的作用。然而,此类电极材料成功应用于柔性超级电容器,必须解决较差的电子导电性和循环过程中的体积变化所致的循环稳定性不足等固有缺陷^[8]。未来需通过微观结构设计、元素掺杂、优化复合界面等手段,在协同提升材料的导电性、比容量、倍率性能和循环寿命以及标准化评价等方面持续突破,以推动柔性超级电容器在可穿戴与智能储能系统中的实际应用^[9]。

(二) 碳材料

主要基于双电层储能机理,通过电极表面与电解液离子之间的物理吸附/脱附来存储电荷。主要基于双电层储能机理,通过电极表面与电解液离子之间的物理吸附/脱附来存储电荷。其优势在于高比表面积、优良的导电性、出色的循环稳定性及环境友好性,因此在功率密度高、循环寿命长的超级电容器中广泛应用^[10]。其中常见的是活性炭,它是目前使用频率较高、应用范围较广的材料。活性炭材料的优势在于它的表面会形成密密麻麻的小孔,这些小孔能够快速吸附离子,从而提升储能能力。当然材料有优点,就有缺点,活性炭的缺点在于导电能力相对较弱,所以这也需要研究人员持续研究并提出解决方案。当然解决方法也多种多样,如当前可采用物理方法或者化学方法,目的是为了扩大活性炭材料表面积,增多小孔数量,这样才能吸附更多的离子。另一种是碳纳米管,简称CNT,分单壁和多壁两种,将这两种材料有效结合,做成性能更好的复合电极延长碳材料的使用,数二者的融合是表面积进一步扩大,它的延展性较好,并不容易破碎。这也强调科研人员能够深入对碳纳米管的研究将其渗透在

更多的领域中。另外,常使用的碳材料还有碳纸和碳布,简称CC,这类材料同样具有良好的导电性能,不需要额外的处理,即可充当电极。其优点是碳布导电好、可弯曲且成本低廉,但是也存在缺点。如纯碳布的储能能力不高,所以为了解决这一问题,研究人员还应探寻新的解决方案。

(三) 导电聚合物

目前导电聚合物被视为极具发展潜力的柔性电极活性材料。这些独特优势催生了其在合成方法、结构改性及器件应用等多个方向的广泛研究^[11]。随着市场的快速发展,导电聚合物的种类也逐渐增多,目前市面上常见的类别有聚苯胺(PANI)、聚吡咯(PPy)和聚噻吩(PTh)等。眼下,科研人员也面临一个重要的挑战,应思考通过怎样的结构设计来提升对电极材料的导电效率和储能能力,发挥其真正的作用,要想从根本上解决这一问题,还需要从多个维度着手。首先,应对现有的材料结构加以完善。因为材料结构将直接影响导电聚合物电极导电效率和储能能力,所以科研人员可通过调整其微观形态来加以完善。只有当问题得到有效解决,才可以大批量的生产这类材料,并将其推至更广阔的市场,满足更多行业的生产、经营需求。其次,目前市面上比较受欢迎的材料是给体-受体型共轭聚合物,此材料的优势很明显,如能有效减少材料在使用过程中发生的不良化学反应,极大地提高电极的稳定性,避免因电极不稳定而引发不必要的问题。需要注意的是,这种材料有优点就有缺点,它在实际使用中仍旧会遇到不少难题,近几年来相关科研加大对其深入研究,希望通过用导电聚合物制作复合电极来提升性能。但事实上,导电聚合物在充电和放电过程中仍旧会受到很多因素的影响,导致柔性器件的稳定性和安全性。其中普遍原因是因为受到了氧化还原反应,使其本身的体积发生改变,如膨胀或收缩。这两个问题的存在都会影响材料的使用效率,所以为了从根本上解决问题,油罐科研人员也尝试了很多方法,希望从中能够探寻出更有效的解决路径。比如,有研究团队过热水法结合后续的原位电化学聚合,此方法主要是在碳布原有的基底上做出改变,这一环节中,碳布不仅仅是电极材料的生长载体,同时其在水热过程中还充当了碳源,参与了材料的形成过程,而最终的研究成果令人满意。该柔性电极在2000次长循环测试后容量保持率达86.35%,其制备方法简便且储能性能突出,展现出良好的应用前景。可见,将导电聚合物与柔性碳基材料复合,凭借其高比表面积、优异导电性和机械强度,可作为理想的自支撑骨架,缓冲其在循环中的体积变化,提升电极的整体导电性,促进电荷的快速转移,从而克服前述难题。结合优化复合界面的设计与制备工艺,可在提升能量密度、功率密度和循环寿命之间取得更佳平衡,推动导电聚合物基柔性储能器件的实用化进程。

综上所述,导电聚合物基柔性超级电容器电极材料的研究工作从未停止,有关研究人员也通过自己的努力探寻出相关对策。希望能将其落到实处。来彻底解决当下所面临的困境。然而,柔性超级电容器电极材料的研究仍面临诸多挑战,如,电极材料的化学结构有待进一步优化。因此为了克服一系列挑战,科研人员还应持续加大研究力度,或者是通过转变研究方向来探寻出路,

以提升能量密度和循环稳定性；D-A 型导电聚合物的储能机理也尚需深入阐明。

三、展望

导电聚合物基柔性超级电容器因其可调控的电化学性能、良好的导电性与结构可设计性，已成为该领域的研究热点。然而，要实现其大规模实际应用，仍面临多重挑战，未来研究可在以下方向深入推进：

1) 未来应进一步聚焦于分子级结构精准调控，尤其是 D-A 型共轭聚合物的理性设计。通过计算模拟与合成实验相结合，优化 D-A 单元的组合与序列，增强材料的氧化还原可逆性、拓宽电压窗口、抑制副反应，从而同步提升能量密度与循环稳定性。此

外，构建多级孔道结构与三维交联网络，可有效缓解充放电过程中的体积膨胀，提升离子传输效率与结构完整性。

2) 加强多元复合材料的研究，如将导电聚合物与二维材料、金属有机框架 (MOFs)、共价有机框架 (COFs) 等功能材料复合，实现协同增强。界面结构的精细调控也是关键，通过化学键合、表面功能化等手段优化电极 / 电解质界面，降低界面电阻，提升电荷传输动力学。

3) 面向可穿戴、可拉伸甚至自愈合的应用场景，需发展一体化电极设计与器件集成工艺。研究可直接打印、纺织或涂覆的柔性电极材料，实现与柔性基底的兼容性。

4) 绿色可持续发展层面，开发生物基、可降解的电极材料，利用天然高分子或废弃物衍生碳材料与导电聚合物复合，可实现资源循环与环保共赢。

参考文献

- [1] 刘华艳, 陈逸飞, 杨梦召, 等. 二维材料基超级电容器的容量与倍率性能提升策略 [J]. 物理化学学报, 2025, 41 (6): 100063.
- [2] Pamet é E, Köps L, Kreth F A, et al. The Many Deaths of Supercapacitors: Degradation, Aging, and Performance Fading[J]. Advanced Energy Materials, 2023: 2301008.
- [3] Sun Y, Zhao X, Zhu G, et al. Twisted ladder-like donor-acceptor polymers as electrode materials for flexible electrochromic supercapacitors[J]. Electrochimica Acta, 2020, 333: 135495.
- [4] Liu Y Y, Li X C, Wang S, et al. Self-templated synthesis of uniform hollow spheres based on highly conjugated three-dimensional covalent organic frameworks[J]. Nature Communications, 2020, 11 (1): 5561.
- [5] Scott S, Mukherjee P, Lei C, et al. The effect of using alternative binders and second life graphite materials on the electrochemical performance of lithium-ion battery electrodes[J]. Journal of Power Sources, 2024, 594: 233993.
- [6] 孙学文, 张克良, 李晨, 等. 超级电容器概述: 机理、材料、器件和安全特性 [J]. 电工电能新技术, 2025, 44 (10): 117-135.
- [7] Wang Y, Wu X, Han Y, et al. Flexible supercapacitor: overview and outlooks[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 103053.
- [8] Tao R, Wang T, Fan J, et al. Ionothermal synthesis of carbon/TiO₂ nanocomposite for supercapacitors [J]. ChemNanoMat 2022, 8: e202200075.
- [9] 黄继伟, 钱学仁, 安显慧, 等. 柔性基金属氧化物超级电容器电极材料的研究进展 [J]. 功能材料, 2019, 50 (8): 08040-08050.
- [10] Peng C, Zhang S, Jewell D, et al. Carbon nanotube and conducting polymer composites for supercapacitors[J]. Progress in Natural science, 2008, 18(7): 777-788.
- [11] Quintero D, Matsuya H, Iwai M, et al. Controlling Dielectric Film Defects to Increase the Breakdown Voltage of Conductive Polymer Solid Capacitors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024.