

# PEDOT:PSS在超级电容器上的应用研究进展

宋世伟, 许文博, 王 承

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年11月26日; 录用日期: 2024年1月26日; 发布日期: 2024年2月7日

## 摘 要

近年来, 能源危机不断加剧, 可持续再生能源得到了巨大发展。电化学储能技术是收集、存储这类能源的重要技术之一。电化学储能器件中最有代表性的两类是超级电容器和锂离子电池。相比锂离子电池, 超级电容器具有更高的功率密度、出色的电荷储存能力、高安全性、长循环寿命和出色的环境适应性。因此, 超级电容器作为一种环保可持续的新型储能装置备受关注。电极材料是决定超级电容器性能的关键因素。导电聚合物聚(3,4-乙炔二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸(PEDOT:PSS)具有高导电性、可溶液加工、较高的热稳定性、环境友好和安全等特点, 因此作为超级电容器电极材料备受关注。

## 关键词

PEDOT:PSS, 超级电容器, 导电聚合物

# Research Progress on the Application of PEDOT:PSS in Supercapacitors

Shiwei Song, Wenbo Xu, Cheng Wang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Nov. 26<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 26<sup>th</sup>, 2024; published: Feb. 7<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In recent years, the escalating energy crisis has propelled significant developments in sustainable renewable energy sources. Electrochemical energy storage technology stands out as a crucial means for collecting and storing such energy. Among the representative devices in electrochemical energy storage, supercapacitors and lithium-ion batteries are the most notable. In comparison to lithium-ion batteries, supercapacitors exhibit higher power density, outstanding charge storage capacity, enhanced safety, prolonged cycle life, and exceptional environmental adaptability. Therefore, supercapacitors, as an environmentally friendly and sustainable form of energy storage, have garnered considerable attention. The electrode material is a decisive factor determining the performance of

supercapacitors. The conductive polymer poly (3,4-ethylenedioxythiophene):poly (styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) is characterized by high conductivity, solution processability, elevated thermal stability, environmental friendliness, and safety. Consequently, it has become a focal point of interest as an electrode material for supercapacitors.

## Keywords

PEDOT:PSS, Supercapacitors, Conductive Polymers

Copyright © 2024 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

电化学电容器又称为超级电容器(Supercapacitor)。与传统电池和燃料电池相比,超级电容器具有独特的优势:更快的充放电速率、更高的功率密度、更高的使用安全性、更长的使用寿命以及卓越的环境相容性[1] [2]。近年来,由于其卓越的性能,超级电容器在航空航天、移动通讯、国防科技和信息技术等领域得到广泛应用,展现出极佳的应用前景[3] [4]。此外,超级电容器具有较高的功率密度、快速充放电速率和卓越的安全性等显著优点,在新能源汽车和储能系统等领域也具备巨大潜力,成为研究的热点。电极材料直接影响超级电容器的性能。因此,通过合理设计和开发结构新颖、性能卓越的电极材料,对于提升超级电容器各方面性能、满足不同领域需求至关重要,具有极其重要的意义[5]。

## 2. 超级电容器简介

### 2.1. 超级电容器的分类

超级电容器电荷存储机理建立在传统电容器的基础上。传统电容器在充电时,相反的电荷分别储存在两个平板电极上,而在放电时则从两个平板释放电荷,如图 1(a)所示[6]。相比之下,超级电容器的电极通常由多孔导电材料构成,绝缘的电解质被离子导电的电解质所替代。在比表面积较大的电极材料和电解液中,存在大量的阴阳离子,进一步提高电荷存储,如图 1(b)所示[6]。根据超级电容器工作机理的差异,超级电容器可分为三类:双电层电容、法拉第赝电容器和混合型超级电容器[7]。

双电层超级电容器利用双电层效应存储电荷,具有高速充放电和长周期稳定性等优点[8] [9],主要应用于需要迅速充放电的场景,如混合动力汽车和电子设备备用电源。法拉第赝电容超级电容器创新地利用赝电容效应提升能量密度,结合双电层效应,通常在高能量密度和高功率密度要求的应用中表现更出色,如电动汽车动力系统和可再生能源存储[10] [11]。混合型超级电容器结合正负极的不同储能机制,正极采用法拉第赝电容电极材料,负极采用双电层电容电极材料,以最大程度实现超级电容器性能的优化,也称为非对称型超级电容器[12] [13]。

### 2.2. 超级电容器的组成

超级电容器大体上可分为四个部分:电极(electrode)、集流(collector)、电解质溶液(electrolyte)、隔膜(seperator) [14]。其中,电极是超级电容器中极其重要的部分,电极材料将直接决定器件的性能,电极材料不同会导致器件的储能方式存在差异,从而影响器件的储能特性。集流体是器件和电极与外部连接的纽带,主要把电极中的电流收集并输出,通常集流体为金属或者以电极本身为集流体[15] [16] [17] [18]。

如图 2 所示是常规超级电容器与柔性超级电容器的结构示意图[19]。

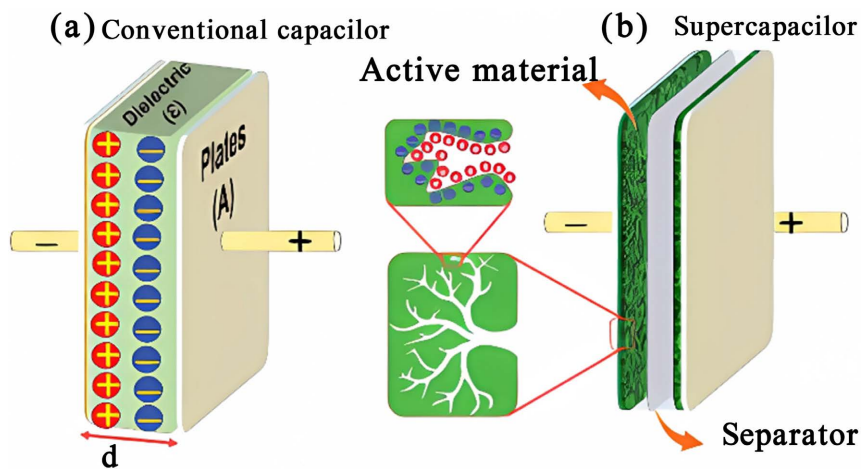


Figure 1. (a) Conventional capacitor; (b) Supercapacitor  
图 1. (a) 平板电容器; (b) 超级电容器示意图

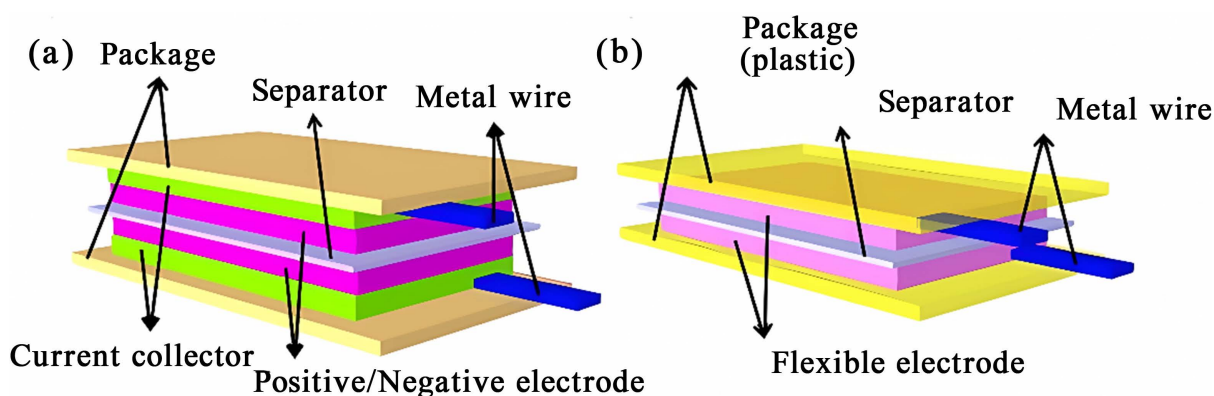


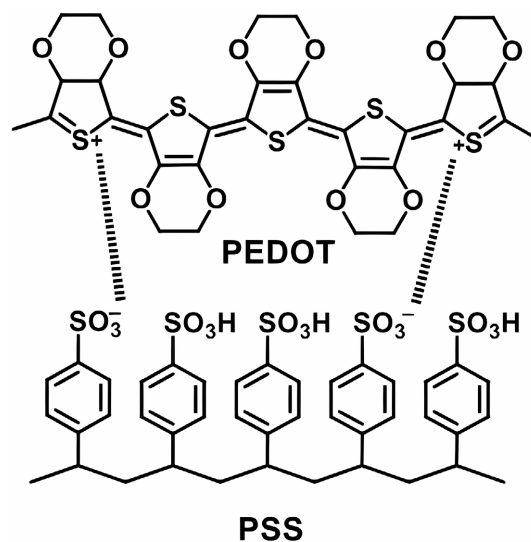
Figure 2. Schematic diagram of conventional supercapacitors and flexible supercapacitors  
图 2. 常规超级电容器与柔性超级电容器结构示意图

### 3. 导电聚合物 PEDOT:PSS 的概述

聚苯乙烯磺酸钠(PSS)是一种常见的表面活性剂, PEDOT 聚合时 PSS 作为掺杂剂引入其中, 亲水性的 PSS 不仅有助于 PEDOT 更容易的分散在水溶液中, 而且 PSS<sup>-</sup>可以作为 PEDOT<sup>+</sup>的抗衡离子, 增加 PEDOT 的稳定性[20] [21] [22] [23] [24]。最终得到的聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐 (PEDOT:PSS)是一种分散性的水溶液, 兼具导电性和分散性, 其结构示意图如图 3 所示[25]。当 PEDOT:PSS 作为超级电容器电极时, 为了提高超级电容器的电容, 需要通过后处理去除多余的 PSS 提高电导率, 通常采用的是溶剂后处理。

### 4. 碳材料/PEDOT:PSS 体系提升超级电容器性能

超级电容器的电极材料是超级电容器性能的关键组成部分之一, 而碳材料由于其出色的导电性、高表面积和化学稳定性而成为电极材料的首选, 常见的碳材料有活性炭, 石墨烯, 碳纳米管。碳材料的选择取决于超级电容器的具体要求, 如功率密度、能量密度、循环寿命等。通过合理选择和组合这些材料, 可以实现更高性能的超级电容器。



**Figure 3.** PEDOT:PSS structural representation  
**图 3.** PEDOT:PSS 结构示意图

近年来,关于碳材料与 PEDOT:PSS 复合体系在提升超级电容器性能方面的研究呈现出两大主要方向,具体表现在引入多维碳材料和设计多元复合体系两个方面。首先,研究者们采用引入多维碳材料的策略,旨在显著提升电极的导电性能和储能性能。这一举措旨在通过多维碳材料的独特性质,如纳米级活性炭的多孔结构和石墨烯的优越导电性,优化电容器的整体性能。2012年,金等研究者采用离子液体中的恒电流法聚合 3,4-乙烯二氧噻吩(EDOT)单体,首次成功制备了石墨烯/聚 3,4-乙烯二氧噻吩(石墨烯/PEDOT)复合物[26]。这种复合材料不仅拥有石墨烯的优越导电性,还通过 PEDOT 的有机性质形成高表面积结构,为超级电容器提供了卓越的电化学性能,表现为  $181 \text{ Fg}^{-1}$  的比电容值。2013年, Sonia 等研究者引入纳米级活性炭,成功构建了具有更高比电容( $1183 \text{ Fg}^{-1}$ )的 PEDOT 复合电极[27]。相较于石墨烯,纳米级活性炭的多孔结构和大表面积为电荷传输提供了更多通道,使得电容性能得以显著提升。这一方向的研究不仅强调了多维碳材料的引入对电极性能的重要性,而且指出了不同碳材料在性能上的优势。其次,研究者们在设计多元复合体系的研究方向上取得了显著进展,突显出其在超级电容器领域的潜力。这一方向的研究注重通过巧妙设计电极结构,努力改善电荷传输通道,以期更全面、高效地满足超级电容器在不同工况下的需求。2016年,董等研究者在碳纸表面生长 PEDOT 纳米颗粒,通过气相沉积法制备了一系列 PEDOT/碳纸复合材料。这一设计巧妙地利用了碳纸基材,缩短了离子传输和电荷转移路径,使得电化学性能得以显著提高,表现为  $138.75 \text{ mFcm}^{-2}$  的面积比电容[28]。2022年, Huang 等研究者构建了层次化多孔结构的 CNC/PIL 多层膜,成功实现了高面积比电容( $1402.5 \text{ mFcm}^{-2}$ )和优异的循环稳定性。相较于传统 PEDOT/碳纸复合材料,多层膜的设计不仅提供了更大的比表面积,而且通过层次化的结构优化了电荷传输和离子扩散通道,进一步改善了性能[29]。同年, Teng 等人制备了 rGO/PEDOT:PSS 杂化纤维,实现了快速的离子转移和离子扩散[12]。2023年,赵等研究者通过一种简单温和的方法备出了石墨烯/PEDOT:PSS 复合纤维,并将其组装成固态超级电容器,复合纤维较石墨烯纤维表现出更好的性能,  $0.02 \text{ mAcm}^{-2}$  时比电容达  $180.95 \text{ mFcm}^{-2}$ , 电流密度增大至  $0.2 \text{ mAcm}^{-2}$  时,复合纤维比电容保持率为 70.13%,表现出良好倍率性能[30]。2023年,支等研究者在 GO/CMC 二元复合薄膜电极电化学性能优化的基础上,将导电聚合物 PEDOT:PSS 与 GO 和 CMC 进行复合,制备得到 PEDOT:PSS/GO/CMC 三元复合薄膜电极,该薄膜电极具有良好的柔性,当电流密度为  $0.2 \text{ mAcm}^{-2}$  时,面积比电容为  $682 \text{ mFcm}^{-2}$ ,以 PPGC 三元复合薄膜电极为正负极, PVA-KOH 为固态电解质组装柔性全固态超级电容器,当电流密度为

0.1 mAcm<sup>-2</sup>时, 面积比电容最大, 为 108.5 mFcm<sup>-2</sup>之后对柔性全固态 PPGC 超级电容器进行循环稳定性测试, 在循环 2000 次后仍能保持 79%的初始比电容, 表现出较好的电化学循环稳定性[31]。

这些研究表明, 材料和制备方法的选择对超级电容器的性能产生了深远的影响。多维碳材料的引入是为了克服传统材料的局限性。纳米级活性炭的引入相较于石墨烯, 其丰富的微孔和介孔结构提供了更多电容活性区域, 从而显著提高了比电容值。这种结构使其在高电流密度下展现出更好的性能, 有利于更快速地实现充放电过程。相比之下, 石墨烯虽然具有优越的导电性, 但其表面积相对较小, 限制了电极与电解液之间的电荷传输, 尤其在高电流密度下可能表现出相对较低的性能。次化多孔结构的 CNC/PIL 多层膜相对于传统 PEDOT/碳纸复合材料, 其复杂结构和更优化的电荷传输通道有助于提高面积比电容和循环稳定性。这种设计不仅优化了电荷传输路径, 还提高了材料的机械稳定性, 使其能够在多次充放电后依然保持高性能。相对而言, 传统 PEDOT/碳纸复合材料由于结构相对简单, 电荷传输路径相对较长, 可能在高负荷情况下产生较大的内阻, 从而影响性能的持久性。

超级电容器性能的优化需要综合考虑材料的多个方面特性。对于多维碳材料的选择, 除了导电性外, 其多孔结构和表面积对电极性能的贡献同样至关重要。而在设计多元复合体系时, 除了表面积和循环稳定性外, 电荷传输通道的优化和结构的复杂性也直接影响着电容器的整体性能。这些研究成果为未来的超级电容器设计提供了有益的启示, 指导我们更全面、深入地认识和利用碳材料与 PEDOT:PSS 复合体系的性能提升机制。碳材料/PEDOT:PSS 体系性能提升的数据如表 1:

**Table 1.** Performance improvement data table of carbon material/PEDOT:PSS system

**表 1.** 碳材料/PEDOT:PSS 体系性能提升数据表

研究人员	复合材料	比电容	参考文献
金莉	石墨烯/PEDOT	181 F/g	[26]
Sonia	活性炭/PEDOT	1183 F/g	[27]
董盟阳	碳纸/PEDOT	138.75 mF/cm <sup>2</sup>	[28]
Huang Hui	CNC/PIL	1402.5 mF/cm <sup>2</sup>	[29]
Teng Weili	rGO/PEDOT:PSS	279.3 mF/cm <sup>2</sup>	[12]
赵玉娜	石墨烯/PEDOT:PSS	180.95 mF/cm <sup>2</sup>	[30]
支若彤	PEDOT:PSS/GO/CMC	682 mF/cm <sup>2</sup>	[31]

## 5. 其他材料/PEDOT:PSS 体系提升超级电容器性能

除了碳材料之外, 超级电容器的电极材料还包括一些其他类型的材料, 如过渡金属氧化物(如 RuO<sub>2</sub>、NiO、Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、MnO<sub>2</sub>), 导电聚合物(如聚苯胺、聚噻吩和聚吡咯等)以及氢氧化物等。2016 年, Chen 等人采用的 PEDOT:PSS/MnO<sub>2</sub>/PEDOT 三元薄膜展示了卓越的比电容和循环稳定性, 彰显了 MnO<sub>2</sub> 在该体系中的显著性能提升[32]。2017 年, Ge 等研究者采用的 MoS<sub>2</sub>/PEDOT-PSS 薄膜在经过 5000 次循环后仍保持了 98.6%的电容保持率, 凸显了 MoS<sub>2</sub> 在提高循环稳定性方面的有效性[33]。相比之下, 2018 年, Liang 等人研究的 WS<sub>2</sub>/PEDOT:PSS 薄膜在经过 5000 次循环后电容保持率达到 107%, 强调了 WS<sub>2</sub> 在保持电容方面的优越性[34]。2016 年, Yin 等人通过将 Ni-Mn-Co 三元氧化物与 PEDOT:PSS/NMCO 杂化, 成功展示了在高电流密度下的出色超级电容性能, 突显了 Ni-Mn-Co 三元氧化物在电容器性能中的关键作用[35]。2018 年, 李等研究的 PEDOT:OTF 电极材料在高倍率下保持了 98.1%的电容, 突显了其在提高倍率性能

方面的显著效果[36]。2023年,李等人首先通过氧化聚合制备了具有优异电化学性能的 PEDOT:OTF 电极材料,并通过氧化聚合与电化学聚合合成了 PEDOT/PPy 复合电极。在  $\text{H}_2\text{SO}_4$  电解液中,在  $2 \text{ Ag}^{-1}$  电流密度条件下,化学氧化聚合 PEDOT:OTF 能够达到  $284.4 \text{ Fg}^{-1}$  的质量比电容[37]。

在这些研究中,不同其他材料与 PEDOT:PSS 组成的超级电容器电极材料呈现出显著的性能差异。Ni-Mn-Co 三元氧化物与 PEDOT:PSS 相比,展现出更高的比电容( $1234 \text{ Fg}^{-1}$ )和循环稳定性(83.7%的保持率)。MoS<sub>2</sub>/PEDOT:PSS 在循环稳定性方面表现更为优异,其电容保持率高达 98.6%。WS<sub>2</sub>/PEDOT:PSS 复合材料则表现出较高的体积电容( $411 \text{ Fcm}^{-3}$ )和电导率( $44 \text{ S cm}^{-1}$ )。PEDOT:PSS/MnO<sub>2</sub>/PEDOT 三元薄膜展现出高比电容( $391.36 \text{ Fcm}^{-3}$ )和良好的循环稳定性(92%的保持率)。对比研究显示,不同材料与 PEDOT:PSS 复合体系在超级电容器性能方面具有独特优势,其中 Ni-Mn-Co 三元氧化物和 MoS<sub>2</sub> 在比电容和循环稳定性方面表现突出。其他材料/PEDOT:PSS 体系提性能的数据如表 2:

**Table 2.** Performance improvement data sheet of other materials/PEDOT:PSS system

**表 2.** 其他材料/PEDOT:PSS 体系性能提升数据表

研究人员	复合材料	比电容	参考文献
Chen Yan	PEDOT:PSS/MnO <sub>2</sub> /PEDOT	$391.36 \text{ F/cm}^3$	[32]
Y Ge	MoS <sub>2</sub> /PEDOT:PSS	$141.4 \text{ F/cm}^3$	[33]
Liang A	WS <sub>2</sub> /PEDOT:PSS	$411 \text{ F/cm}^3$	[34]
Yin Chengjie	PEDOT:PSS/NMCO	$1234 \text{ F/g}$	[35]
李会华	PEDOT/SDS/H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	$113.5 \text{ mF/cm}^2$	[36]
李宗宇	PEDOT:OTF	$284.4 \text{ F/g}$	[37]

## 6. 结语

PEDOT:PSS 在超级电容器上的应用研究表现出了多方面的创新和进展。作为一种导电聚合物, PEDOT:PSS 以其良好的导电性和化学稳定性成为超级电容器电极材料中备受关注的一部分。研究者们通过不同的制备方法、复合材料的设计以及结构调控,不断拓展 PEDOT:PSS 在超级电容器领域的性能和应用。首先, PEDOT:PSS 与不同的碳材料(如石墨烯、活性炭等)的复合研究,证明了其与碳材料协同作用的优越性,能够显著提升电容值。这种复合物在电化学性能上表现出比单一 PEDOT:PSS 电极更好的性能,这有助于提高超级电容器的能量密度和循环稳定性。其次, PEDOT:PSS 与其他功能性材料的复合,例如氧化锰、三氟甲磺酸等,为超级电容器的性能优化提供了新的思路。通过控制复合材料的结构和成分,研究者们成功地提高了电极的比电容和循环寿命,拓展了超级电容器在各种应用场景中的潜在用途。此外, PEDOT:PSS 的聚合方法和结构调控的研究也在超级电容器中取得了一系列的进展。例如,采用层次化多孔结构、纳米颗粒的控制等手段,不仅增强了电极的导电性能,还提高了电容器的能量密度和循环寿命。综上, PEDOT:PSS 在超级电容器上的应用研究取得了令人瞩目的成果。其优异的导电性和可调控的聚合结构,使得 PEDOT:PSS 在设计高性能超级电容器方面具有独特的优势。未来,我们可以期待更多基于 PEDOT:PSS 的创新性研究,以推动超级电容器技术的不断发展,满足不同领域对于高性能、柔性、循环稳定性的需求。

## 参考文献

- [1] Simon, P. and Gogotsi, Y. (2008) Materials for Electrochemical Capacitors. *Nature Materials*, 7, 845-854.

- <https://doi.org/10.1038/nmat2297>
- [2] Al Sakka, M., Gualous, H., Van Mierlo, J. and Culc, H. (2009) Thermal Modeling and Heat Management of Supercapacitor Modules for Vehicle Applications. *Journal of Power Sources*, **194**, 581-587. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.06.038>
- [3] Gou, Q., Zhao, S., Wang, J., *et al.* (2020) Recent Advances on Boosting the Cell Voltage of Aqueous Supercapacitors. *Nano-Micro Letters*, **12**, Article No. 98. <https://doi.org/10.1007/s40820-020-00430-4>
- [4] Manjakkal, L., Pullanchiyodan, A., Yogeswaran, N., *et al.* (2020) A Wearable Supercapacitor Based on Conductive PEDOT:PSS-Coated Cloth and a Sweat Electrolyte. *Advanced Materials*, **32**, Article ID: 1907254. <https://doi.org/10.1002/adma.201907254>
- [5] Xu, Y.F., Lu, W.B., Xu, G.B. and Chou, T.W. (2021) Structural Supercapacitor Composites: A Review. *Composites Science and Technology*, **204**, Article ID: 108636. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108636>
- [6] Noori, A., El-Kady, M.F., Rahmanifar, M.S., *et al.* (2019) Towards Establishing Standard Performance Metrics for Batteries, Supercapacitors and Beyond. *Chemical Society Reviews*, **48**, 1272-1341. <https://doi.org/10.1039/C8CS00581H>
- [7] Lin, J.Y., Huang, J.J., Hsueh, Y.L. and Zhang, Y.X. (2019) Diameter Effect of Silver Nanowire Doped in Activated Carbon as Thin Film Electrode for High Performance Supercapacitor. *Applied Surface Science*, **477**, 257-263. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.008>
- [8] Yao, J., Ji, P., Sheng, N., *et al.* (2018) Hierarchical Core-Sheath Polypyrrole@Carbon Nanotube/Bacterial Cellulose Macrofibers with High Electrochemical Performance for All-Solid-State Supercapacitors. *Electrochimica Acta*, **283**, 1578-1588. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.07.086>
- [9] Garino, N., Lamberti, A., Stassi, S., *et al.* (2019) Multifunctional Flexible Membranes Based on Reduced Graphene Oxide/Tin Dioxide Nanocomposite and Cellulose Fibers. *Electrochimica Acta*, **306**, 420-426. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.02.095>
- [10] Faniyi, I.O., Fasakin, O., Olofinjana, B., *et al.* (2019) The Comparative Analyses of Reduced Graphene Oxide (RGO) Prepared via Green, Mild and Chemical Approaches. *SN Applied Sciences*, **1**, Article No. 1181. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1188-7>
- [11] Liu, K.K., Jiang, Q., Kacica, C., *et al.* (2018) Flexible Solid-State Supercapacitor Based on Tin Oxide/Reduced Graphene Oxide/Bacterial Nanocellulose. *RSC Advances*, **8**, 31296-31302. <https://doi.org/10.1039/C8RA05270K>
- [12] Teng, W., Zhou, Q., Wang, X., *et al.* (2022) Enhancing Ions/Electrons Dual Transport in RGO/PEDOT:PSS Fiber for High-Performance Supercapacitor. *Carbon*, **189**, 284-292. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.12.088>
- [13] 汪丽. 阳离子聚丙烯酸酯掺杂作用下聚吡咯/木质纤维导电纸的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 陕西科技大学, 2015.
- [14] Sahin, M.E., Blaabjerg, F. and Sangwongwanich, A. (2020) A Review on Supercapacitor Materials and Developments. *Turkish Journal of Materials*, **5**, 10-24.
- [15] Ngai, K.S. (2022) Electrode Materials for Electrochemical Double-Layer Capacitors. *Encyclopedia of Energy Storage*, **4**, 341-350. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819723-3.00108-6>
- [16] Conway, B.E., Birss, V. and Wojtowicz, J. (1997) The Role and Utilization of Pseudocapacitance for Energy Storage by Supercapacitors. *Journal of Power Sources*, **66**, 1-14. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(96\)02474-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(96)02474-3)
- [17] Shi, X., Zheng, S., Wu, Z.S. and Bao, X.H. (2018) Recent Advances of Graphene-Based Materials for High-Performance and New-Concept Supercapacitors. *Journal of Energy Chemistry*, **27**, 25-42. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2017.09.034>
- [18] Kumar, Y., Rawal, S., Joshi, B. and Hashmi, S.A. (2019) Background, Fundamental Understanding and Progress in Electrochemical Capacitors. *Journal of Solid State Electrochemistry*, **23**, 667-692. <https://doi.org/10.1007/s10008-018-4160-3>
- [19] Chodankar, N.R., Pham, H.D., Nanjundan, A.K., *et al.* (2020) True Meaning of Pseudocapacitors and Their Performance Metrics: Asymmetric versus Hybrid Supercapacitors. *Small*, **16**, Article ID: 2002806. <https://doi.org/10.1002/sml.202002806>
- [20] Zhao, Z., Richardson, G.F., Meng, Q., *et al.* (2015) PEDOT-Based Composites as Electrode Materials for Supercapacitors. *Nanotechnology*, **27**, Article ID: 042001. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/4/042001>
- [21] Wang, X., Lu, Q., Chen, C., *et al.* (2017) A Consecutive Spray Printing Strategy to Construct and Integrate Diverse Supercapacitors on Various Substrates. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 28612-28619. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b08833>
- [22] Xu, J.L., *et al.* (2017) Embedded Ag Grid Electrodes as Current Collector for Ultraflexible Transparent Solid-State

- Supercapacitor. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 27649-27656.
- [23] Zhang, L.L. and Zhao, X.S. (2009) Carbon-Based Materials as Supercapacitor Electrodes. *Chemical Society Reviews*, **38**, 2520-2531. <https://doi.org/10.1039/b813846j>
- [24] Selvaraj, T., Perumal, V., Khor, S.F., *et al.* (2020) The Recent Development of Polysaccharides Biomaterials and Their Performance for Supercapacitor Applications. *Materials Research Bulletin*, **126**, Article ID: 110839. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2020.110839>
- [25] Fan, Z., Du, D., Yao, H. and Ouyang, J.Y. (2017) Higher PEDOT Molecular Weight Giving Rise to Higher Thermoelectric Property of PEDOT:PSS: A Comparative Study of Clevios P and Clevios PH1000. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 11732-11738. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b15158>
- [26] 金莉, 孙东, 张剑荣. 石墨烯/聚 3,4-乙烯二氧噻吩复合物的电化学制备及其在超级电容器中的应用[J]. 无机化学学报, 2012, 28(6): 1084-1090.
- [27] Sonia, T.S., Mini, P.A., Nandhini, R., *et al.* (2013) Composite Supercapacitor Electrodes Made of Activated Carbon/PEDOT:PSS and Activated Carbon/Doped PEDOT. *Bulletin of Materials Science*, **36**, 547-551. <https://doi.org/10.1007/s12034-013-0509-5>
- [28] 董盟阳, 赵昕, 陈大俊, 张清华. 聚(3,4-乙烯二氧噻吩)/碳纸复合材料的制备及其在作为超级电容器电极材料的应用[J]. 化学世界, 2016, 57(8): 469-474. <https://doi.org/10.19500/J.Cnki.0367-6358.2016.08.002>
- [29] Huang, H., Zhao, Y., Cong, T., *et al.* (2022) Flexible and Alternately Layered High-Loading Film Electrode Based on 3D Carbon Nanocoils and PEDOT:PSS for High-Energy-Density Supercapacitor. *Advanced Functional Materials*, **32**, Article ID: 2110777. <https://doi.org/10.1002/adfm.202110777>
- [30] 赵玉娜, 陈锋, 周军双, 王建初, 高发明. 石墨烯/PEDOT:PSS 复合纤维的制备及超级电容性能[J]. 燕山大学学报, 2023, 47(2): 106-111.
- [31] 支若彤. PEDOT:PSS/GO/CMC 柔性复合电极材料的制备及电化学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [32] Chen, Y., Xu, J., Yang, Y., *et al.* (2016) The Preparation and Electrochemical Properties of PEDOT:PSS/MnO<sub>2</sub>/PEDOT Ternary Film and Its Application in Flexible Micro-Supercapacitor. *Electrochimica Acta*, **193**, 199-205. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.02.021>
- [33] Ge, Y., Jalili, R., Wang, C., *et al.* (2017) A Robust Free-Standing MoS<sub>2</sub>/Poly (3,4-Ethylenedioxythiophene): Poly (Styrenesulfonate) Film for Supercapacitor Applications. *Electrochimica Acta*, **235**, 348-355. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.03.069>
- [34] Liang, A., Li, D., Zhou, W., *et al.* (2018) Robust Flexible WS<sub>2</sub>/PEDOT: PSS Film for Use in High-Performance Miniature Supercapacitors. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **824**, 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.07.040>
- [35] Yin, C., Yang, C., Jiang, M., *et al.* (2016) A Novel and Facile One-Pot Solvothermal Synthesis of PEDOT-PSS/Ni-Mn-Co-O Hybrid as an Advanced Supercapacitor Electrode Material. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **8**, 2741-2752. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b11022>
- [36] 李会华, 葛优, 朱红丽, 冯晓苗, 刘玉革. 电沉积法制备聚(3,4-乙烯二氧噻吩)微米管及其在柔性全固态超级电容器的应用[J]. 无机化学学报, 2018, 34(10): 1799-1807.
- [37] 李宗宇. PEDOT 复合电极的制备及其电容性能研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.