

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.10.030

PEDOT:PSS 导电性能研究进展

樊峤¹, 杨瑞¹, 张凯², 刘玉飞¹, 何敏^{1,2}, 于杰^{1,2}

(1. 贵州大学材料与冶金学院, 贵阳 550025; 2. 国家复合改性聚合物材料工程技术研究中心, 贵阳 550014)

摘要: 介绍了聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸(PEDOT:PSS)的基本特性,包括分子结构、物理特性(导电性、透明性)及力学性能(柔韧性);简述了其导电性能的限制因素,涉及组分比例、结晶度、相分离、掺杂剂、制备工艺及环境因素等;回顾了通过 PSS 改性调控 PEDOT:PSS 导电性质的研究进展,涵盖掺杂、酸处理、有机溶剂处理、离子液体处理及嵌段共聚等方法;分析了现有改性方法的共性问题,如掺杂剂调控复杂、酸处理存在环保与稳定性问题、离子液体工艺成本高及嵌段共聚分子设计难度大等。指出平衡 PSS 绝缘性与分散性是提升 PEDOT:PSS 导电性的核心挑战,并提出未来研究需聚焦创新分子工程(如功能性 PSS 衍生物合成)及高效制备工艺,以突破现有局限,推动 PEDOT:PSS 在柔性电子、生物电子等领域的高性能应用。

关键词: 聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸(PEDOT:PSS);导电性;聚苯乙烯磺酸改性;分子工程;柔性电子器件

中图分类号: TQ326.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2025)10-0237-06

Recent advances in conductive properties of PEDOT: PSS

FAN Qiao¹, YANG Rui¹, ZHANG Kai², LIU Yufei¹, HE Min^{1,2}, YU Jie^{1,2}

(1. School of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. National Engineering Research Center for Composite Modified Polymer Materials, Guiyang 550014, China)

Abstract : The basic properties of poly(3, 4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) were introduced, including its molecular structure, physical properties (conductivity, transparency), and mechanical properties (flexibility). The limiting factors affecting its conductivity, such as component ratios, crystallinity, phase separation, dopants, preparation processes, and environmental factors, were briefly discussed. The research progress on regulating conductive properties via PSS modification was also reviewed, covering methods including doping, acid treatment, organic solvent treatment, ionic liquid treatment, and block copolymerization. Additionally, the common issues with existing modification methods were analyzed, including the complexity of dopant regulation, environmental and stability concerns with acid treatment, the high cost of ionic liquid processes and the considerable difficulty in designing block copolymer molecules. It is proposed that balancing the insulating properties and dispersibility of PSS is the core challenge in enhancing PEDOT:PSS conductivity, and the future research should focus on innovative molecular engineering (e.g., synthesis of functional PSS derivatives) and efficient preparation processes (e.g., electric field-assisted deposition) to overcome current limitations, thereby promoting the high-performance applications of PEDOT:PSS in flexible electronics, bioelectronics, and other fields.

Keywords : poly(3, 4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) ; conductivity ; PSS modification ; molecular engineering ; flexible electronic devices

2000 年, 柔性电子技术被《Science》评为世界十大科技成果之一。近年来, 该领域发展迅猛, 在柔性电极、可穿戴传

感器、有机太阳能电池和柔性显示器等产品中发挥着重要作用^[1-8]。以可穿戴传感器为例, 其须紧密贴合人体且灵活伸

基金项目: 贵州省省级科技计划项目(黔科合基础 ZK [2025]一般 019, ZD [2025] 097, KJZY [2025] 004), 贵州省科技创新人才团队项目(QKHP-TRC-CXTD [2023] 012)

通信作者: 何敏, 教授, 博士生导师, 主要从事聚合物合成和应用研究

收稿日期: 2025-07-15

引用格式: 樊峤, 杨瑞, 张凯, 等. PEDOT:PSS 导电性能研究进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(10): 237-242.

FAN Qiao, YANG Rui, ZHANG Kai, et al. Recent advances in conductive properties of PEDOT: PSS[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 237-242.

展,这对材料轻量化和导电性提出了严格要求。传统电极材料如氧化铟锡(ITO)虽具有良好的导电性和透明性,在众多领域应用广泛,但在柔性显示屏、可穿戴电子设备等需要材料具备良好柔韧性的场景中,因ITO规整晶体结构导致的脆性,限制了其应用^[9-11]。

而聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸(PEDOT:PSS)的出现,恰好填补了这一领域的空白。1988年,德国拜耳公司首次成功合成出具有高导电性与可见光透明性的PEDOT,为其后续在电子器件领域的发展奠定了坚实基础。1992年,PEDOT与PSS的复合体系逐步进入研究视野,PEDOT:PSS凭借其独特的优势,在众多材料中脱颖而出。PSS的亲水性使得原本完全不溶于水的PEDOT具备了良好的水分散性,自此,PEDOT:PSS成为了国内外科研领域的研究热点。不过,Yagci等^[12]通过实验计算发现,未掺杂的PEDOT:PSS薄膜电导率仅为 $1.57 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ 。这主要是因为 PEDOT:PSS 体系中,同时存在着 PEDOT 导电通路形成以及 PSS 绝缘相分布这两个关键过程。PEDOT 作为导电相,其分子链相互连接形成导电通路,载流子在该通道中迁移从而实现材料的导电性;而 PSS 所带有的磺酸根能够在水中电离,赋予 PEDOT:PSS 良好的溶液加工性,但其形成的绝缘相会阻碍载流子的迁移,进而降低材料的导电性。由此可见,PSS 既是维持 PEDOT:PSS 水分散性的必要组分,同时也是阻碍载流子迁移的主要因素。这种矛盾特性导致未改性的 PEDOT:PSS 电导率普遍较低,难以满足高端柔性电子器件的应用需求。因此,针对 PSS 的改性研究,对于提升 PEDOT:PSS 的导电性而言至关重要。

目前,关于 PSS 改性的研究,主要集中在分子结构设计、掺杂和后处理等方面,常见的方法包括二甲亚砜(DMSO)后处理^[13]、离子液体处理^[14]、强酸浸泡处理^[10,15]等。尽管这些传统技术在一定程度上能够提升 PEDOT:PSS 的电导率^[15],然而始终无法从根本上解决 PSS 绝缘性与分散性之间的平衡问题。例如,经过 DMSO 处理的 PEDOT:PSS 电导率会随温度升高而升高^[13],但多次改性后,常常会出现薄膜脆性增加、稳定性降低等问题。为了突破这一困境,需要从全新的角度出发,采用创新的方法进行研究。一方面,可以从制备工艺入手,因传统的旋涂工艺存在产量低、浪费率高的问题,故可尝试探索新的工艺方法,以制备出高导电性、连续且均匀的薄膜^[16];另一方面,可借助分子工程手段,通过引入功能性物质对 PSS 结构进行修饰和改性,合成具有特殊功能的 PSS 衍生物,或者优化其链段长度以及共轭结构。

笔者将围绕 PSS 改性与制备工艺创新展开论述,既系统梳理掺杂、酸处理、有机溶剂处理、离子液体处理、嵌段共聚等 PSS 改性方法的研究进展,阐明其对 PEDOT:PSS 电导率、力学性能及稳定性的影响机制,也分析了新型制备工艺相较于传统旋涂工艺的优势,并介绍通过分子工程合成功能性 PSS 衍生物、优化链段长度与共轭结构的探索研究情况。通过整合 PEDOT:PSS 导电性能限制因素、PSS 改性关键数据

与机制及技术瓶颈,清晰界定“平衡 PSS 绝缘性与分散性”的核心矛盾,为后续研究者定位突破方向提供文献支撑与思路参考,也为推动 PEDOT:PSS 在柔性电子、生物电子等领域的高性能应用提供借鉴。

1 PEDOT:PSS 的基本特性

1.1 分子结构特性

PEDOT:PSS 由导电相 PEDOT 与亲水相 PSS 通过静电作用复合而成^[17]。PEDOT 的共轭结构是导电核心,PSS 链段的磺酸根($-\text{SO}_3^-$)可在水中电离,赋予体系良好的溶液加工性,二者的复合结构为其在电子器件领域的应用奠定基础,其分子结构及合成示意图如图 1 所示。

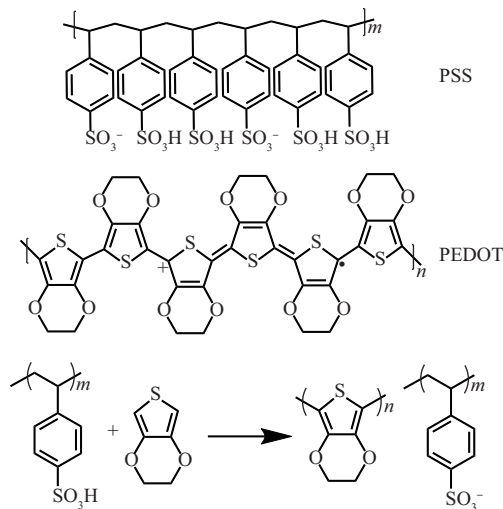


图1 PEDOT:PSS 分子结构及合成示意图

Fig. 1 Schematic of molecular structure and synthesis of PEDOT: PSS

1.2 物理特性

1.2.1 导电性

电导率常规区间为 $10^{-4} \sim 10^3 \text{ S/cm}$ ^[18-19],源于 PEDOT 部分氧化态形成的正电荷中心迁移;但 PSS 绝缘相包裹 PEDOT,导致原始材料电导率偏低^[20]。不过,通过掺杂、后处理等改性手段,可以大幅度提升 PEDOT:PSS 的导电性,这也为后续深入研究如何优化这些改性方法、提升材料综合性能提供了研究方向,同时凸显了深入研究改性 PSS 调控导电性的重要性。

1.2.2 透明性

PEDOT:PSS 具有良好的透明性,可见光范围内透光率达 80% 以上,可满足透明电极、柔性显示屏等对透明性的高要求^[21-22]。

1.3 力学性能

PEDOT:PSS 薄膜具备高柔韧性,力学性能可通过调控 PSS 含量或掺杂剂优化。例如,Xu 等^[23]用具有双膦酸锚定基团的 D_3PACz 修饰 PEDOT:PSS 后,薄膜在保持导电性的同时显著提升与 ITO 基底的结合力,验证了 PSS 改性对 PEDOT:PSS 材料综合性能的优化潜力。

2 PEDOT:PSS导电性能的限制因素

2.1 PSS与PEDOT的组成比例

PEDOT是导电部分,PSS主要起掺杂和稳定作用。两者比例会影响材料的导电性能,Fan等^[24]研究了PSS分子量与PEDOT:PSS导电性之间的关系,研究得出结论,随着PSS分子量的增加,电导率由最初的增加趋势变为达到峰值后的逐渐降低趋势。所以在合成PEDOT:PSS的时候合理地调控各个组分的比例以及分子量尤为重要。

2.2 结晶度

PEDOT:PSS的导电性能受结晶度影响很大。结晶度高说明聚合物分子链排列更规整,能为载流子提供更连续、平滑的传输通道,电导率也更高。在自然干燥或常规成膜条件下,PEDOT:PSS薄膜结晶生长受限,此时分子链取向混乱,存在大量无定型区域,载流子传输时频繁在这些区域遭遇散射,迁移率降低,导电性能变差。未优化的PEDOT:PSS薄膜结晶度通常低于10%,载流子迁移率受限^[25]。吕东方等^[26]的研究表明,可通过热处理提升结晶度,但要控制温度在100~250℃,以防结构被破坏。

2.3 相分离

PEDOT和PSS在分子结构、极性、溶解性上差异明显,易产生相分离,造成导电网络断裂。PEDOT相一旦团聚或形成孤立区域,就会阻碍电荷传输,降低材料电导率。

2.4 掺杂剂

掺杂是提升PEDOT:PSS电导率的重要方法,掺杂剂的选择、浓度等因素至关重要^[27]。合理地选择掺杂剂能够有效地增加载流子的浓度,提高PEDOT:PSS电导率。以掺杂剂浓度举例,若掺杂浓度偏低,引入载流子少,难以降低材料电阻,导电性能改善不显著;若掺杂浓度偏高,掺杂剂会占据PEDOT分子链的有效空间,干扰载流子正常传输。合理地选择掺杂剂是提升PEDOT:PSS导电性能非常关键的因素。

2.5 溶液旋涂工艺

溶液旋涂^[28]是制备PEDOT:PSS薄膜时常用的一种方法,不过,这种方法存在着一定的局限性。在旋涂过程中,溶液自身的流动性、表面张力等要素会对最终制成的薄膜质量起着至关重要的作用。举例来说,如果溶液流动性不均匀,那么所形成薄膜的厚度必然不会均匀,在厚度较大的区域,载流子的传输路径会变长,从而导致载流子的散射概率增大,最终会使电阻增加;而在厚度较小的区域,则有可能出现局部电场集中的情况,这会对薄膜电学性能的稳定性产生影响。除此之外,表面张力如果不合适,薄膜表面很可能出现裂纹、孔洞等缺陷,这会成为载流子传输的阻碍,使载流子的散射概率增加,进而导致导电性能下降。另外,旋涂速度和旋涂时间这些工艺参数的选取也十分关键。如果旋涂速度太快,导致溶液还来不及均匀铺开,制成的薄膜就会不均匀;旋涂时间过长或者过短同样可能使薄膜的质量变差,从而影响PEDOT:PSS的导电性。

Gogoi等^[16]开发了一种名为电场辅助直接墨水沉积(EF-

DID)的新型印刷技术。实验结果表明,在使用DMSO溶液、沉积时间为15 s的条件下,体积分数为20%的PEDOT:PSS可形成最为均匀的纳米结构。通过对EF-DID印刷与传统旋涂法制备的PEDOT:PSS纳米薄膜进行扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)表征发现,在SEM图像中,EF-DID所制备的薄膜表现出更高均匀性,而旋涂薄膜则出现较多裂纹;AFM测试显示两种薄膜的表面粗糙度较为接近。该新型工艺不仅显著提高了薄膜的均匀性和薄膜对柔性基底的适应性,还提升了材料利用率和导电性能。这一工艺创新有效优化了PEDOT:PSS薄膜的综合性能,使其更符合当前材料市场的应用需求。

2.6 环境因素

2.6.1 环境湿度

环境湿度也是影响PEDOT:PSS导电性的关键因素之一。PSS具有亲水性,其链段上的磺酸基团会吸收水分,水分子可以促进磺酸基团的电离,从而增加载流子浓度,阶段性地提升了电导率^[29]。在不同电压下,电流均随相对湿度的增加而增加,在相对湿度从40%升至80%时,PEDOT:PSS薄膜的电导率出现明显提升。

2.6.2 温度变化

当温度升高时,分子热运动加剧,载流子的迁移率理论上会增加。然而,在实际情况中,温度过高可能会引发材料的热分解或结构变化。例如,当温度超过100℃时,PEDOT:PSS中的一些弱化学键可能被破坏,导致材料结构发生变化,从而影响电导率。而在低温环境下,分子运动的减缓会使载流子迁移率降低,同时可能出现材料结晶度改变等问题,同样会导致导电性能下降。温度波动还可能与其他环境因素相互影响。

3 改性PSS调控PEDOT:PSS导电性的研究进展

PEDOT:PSS薄膜因具有成本低、制备工艺简单等优点,在柔性电子器件等领域有着广泛应用,但电导率不足限制了其性能提升。为提升PEDOT:PSS电导率,研究者们采用了多种处理方法,在例如掺杂、后处理、分子结构设计等多个方面都有了显著的成果。

3.1 掺杂

掺杂已经成为提升PEDOT:PSS导电性能的关键手段,近年来,针对PEDOT:PSS的掺杂改性研究取得了显著进展,多种创新性掺杂手段已被应用于提升其导电性能及综合应用性能。

木质素磺酸钠(LS):Deng等^[30]在PEDOT:PSS中添加了LS,LS中的一SO₃⁻和—OCH₃能够部分取代PSS中磺酸基团的官能团,从而降低PSS的绝缘性,增强PEDOT:PSS薄膜的导电性,将掺杂LS的薄膜应用于倒置型钙钛矿太阳能电池,提高了光电转换效率。

离子盐后处理:TU等^[31]采用Zn(TFSI)₂离子盐后处理,调整了PEDOT:PSS中固有的静电相互作用,去除多余非导电PSS链,形成电子渗透良好的网络,最终提升了所制备薄

膜的电导率,这种方法还提升了薄膜的柔韧性,拓展了薄膜在热电发电机、高导电水凝胶和湿度响应执行器等多领域的应用。

表面活性剂:Chen等^[32]采用阳离子与阴离子表面活性剂对PEDOT:PSS进行增塑和二次掺杂处理,成功制备出具有良好润湿性、高电导率且可拉伸的薄膜。所使用的表面活性剂包括三种阳离子型,分别是丁基三甲基溴化铵(BTAB)、己基三甲基溴化铵(HTAB)和*N*-辛基三甲基溴化铵(OTAB),以及两种阴离子表面活性剂——辛基硫酸钠(SOS)和十二烷基硫酸钠(SDS)。改性后的薄膜电导率显著提升,展现出在可穿戴电子设备与柔性传感器等领域的应用潜力。Bailloul等^[33]利用带负电的商用PEDOT:PSS和带正电的*N*-辛基三甲基溴化铵(C8TAB)表面活性剂之间的静电相互作用,通过液体泡沫的固化来开发导电固体泡沫。PEDOT:PSS/C8TAB薄膜的高电导率证实C8TAB的掺杂效应。表面活性剂存在下薄膜电导率的增加可能是由于成膜过程中PEDOT:PSS颗粒的相互渗透增加所致。

离子插层:Zhang等^[34]通过将 $2\text{D Cd}_{0.85}\text{PS}_3\text{Li}_{0.15}\text{H}_{0.15}$ 掺杂剂掺入常规PEDOT:PSS夹层,促进PEDOT:PSS夹层中互穿网络结构的完善并形成从活性层到ITO电极的有效空穴传输通道,从PEDOT:PSS夹层中调节PEDOT链的构象为线性醌结构。这些特性显著提高了PEDOT:PSS中间膜的导电性、功函数和透射率。

3.2 酸处理

经过酸处理后的PEDOT:PSS薄膜电导率有了明显提升,酸处理方法包括三氟甲磺酸($\text{CF}_3\text{SO}_3\text{H}$)处理、环保酸处理、氢卤酸(HX)处理和甘草酸(GL)处理等。

$\text{CF}_3\text{SO}_3\text{H}$ 处理:Qian等^[20]经过叶片涂层和 $\text{CF}_3\text{SO}_3\text{H}$ 处理,制备出了电导率高达 $15\,143\text{ S/cm}$ 的PEDOT:PSS薄膜,接近金属的电导率水平。

环保酸处理:Song等^[35]采用三种不同的环保酸(柠檬酸、酒石酸、苹果酸)处理PEDOT:PSS薄膜,结果表明使用质量分数58%柠檬酸处理的薄膜电导率最高,达到 $1\,960\text{ S/cm}$ 。

HX处理:Deng等^[36]开发了一种酸处理策略,以通过不同的HX($\text{X}=\text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$)酸来改变PEDOT:PSS的化学性质,并提供了HX和PEDOT:PSS之间有效离子交换过程的证据,结果表明PEDOT:PSS的阴离子依赖性掺杂导致钙钛矿和PEDOT:PSS复合薄膜的电导率得到了极大的提高,表面也更加亲水,从而促进了钙钛矿的均匀成核,进而产生了晶体尺寸更大的活性层,界面上的缺陷大幅减少。

GL处理:Zhang等^[37]采用二次掺杂策略构建了拓扑互连导电网络PEDOT:PSS,并将其应用于 $\text{Zn}||\text{MnO}_2$ 电池中。GL作为“质子库”,在长期循环过程中能够持续为PEDOT:PSS提供稳定的 H^+ 供给,同时通过强离子键配位作用永久性地重塑PEDOT:PSS的化学结构,从而显著增强其电子导电性。

在复合薄膜研究方面,Guo等^[38]采用旋涂法制备了氧化石墨烯(GO)与PEDOT:PSS的混合透明电极,并利用酸对该

电极进行界面改性。测试结果表明,纯PEDOT:PSS薄膜在 $130\text{ }^\circ\text{C}$ 退火后电导率趋于稳定,仅为 29 S/cm ;而经过GO改性后,其电导率显著提升至 $2\,386\text{ S/cm}$ 。对于GO/PEDOT:PSS混合薄膜,当GO体积分数为40%时,电导率达到峰值 75 S/cm ;再经酸处理界面后,电导率进一步提升至 $4\,032\text{ S/cm}$,同时透光率保持在89%。

3.3 有机溶剂处理

近年研究发现,通过有机溶剂处理可显著提升PEDOT:PSS薄膜的导电性。

二甲基乙酰胺(DMAC)处理:Liu等^[39]采用含80%DMAC的水溶液单步处理,使薄膜室温电导率从 5 S/cm 提升至 964 S/cm 。

亚硫酸钠(Na_2SO_3)与甲酰胺(CH_3NO_2)协同处理:Wu等^[40]则选用 Na_2SO_3 与 CH_3NO_2 协同处理柔性薄膜,其中甲酰胺通过去除绝缘PSS组分实现导电性增强。

溶剂置换处理:Deng等^[41]通过离心超滤、透析和热蒸发等溶剂置换方法,制备了润湿性更优的有机溶剂型PEDOT:PSS。该材料因具有良好的导电性和合适的功函数,被成功用作倒置有机光伏电池(OPV)顶面空穴传输层(HTL)。

3.4 离子液体处理

近年来,离子液体(ILs)处理显著提升了PEDOT:PSS薄膜的导电性能。Li等^[42]系统研究了ILs与PEDOT:PSS的作用机制,发现ILs能催化PEDOT:PSS结构重组,促进有序晶体和导电通道形成,从而同时提升导电性和力学性能,满足可印刷生物电子器件的需求。

Oh等^[43]采用离心策略诱导ILs促进PEDOT:PSS胶体堆积,从而开发出一种黏塑性PEDOT:PSS-离子液体胶体(PILC)墨水。该PILC墨水可实现高纵横比垂直堆叠结构,具备全向印刷能力,能够用于生成悬浮结构,同时表现出高电导率(约 286 S/cm)和高印刷分辨率(约 $50\text{ }\mu\text{m}$)。

3.5 嵌段共聚

嵌段共聚手段在提升PEDOT:PSS薄膜导电性能方面取得了显著进展。Kayser等^[44]采用可逆加成-断裂链转移(RAFT)聚合,合成由聚(聚乙二醇甲基醚丙烯酸酯)(PPEGMEA)软段和PSS硬段组成的嵌段共聚物,以新合成的离子弹性体PSS-*b*-PPEGMEA为基质进行EDOT氧化聚合,得到的聚电解质弹性体PEDOT:PSS-*b*-PPEGMEA具有高达128%的断裂伸长率,韧性达 10.1 MJ/m^3 ,虽然该弹性体电导率不如商用材料,但韧性和延展性得到大幅度提高。Blau等^[45]同样采用RAFT聚合,制备出由固定长度PSS链段连接不同长度PPEGMEA链段的嵌段共聚物,以此为支架进行PEDOT的氧化聚合。研究表明,PEDOT:(PSS₍₁₎-*b*-PPEGMEA₍₁₋₆₎)嵌段共聚物中,PPEGMEA链段最长的block-6断裂伸长率最高(75%)、拉伸弹性模量最低(9.7 MPa),但电导率较低(0.01 S/cm),将其与PEDOT:PSS共混后,电导率提高到 2.14 S/cm 。且在表面肌电检测中,嵌段共聚物凭借良好的力学性能和对皮肤的黏附性优于商用PEDOT:PSS。

Yu等^[46]通过引入可热交联的*N*-(羟甲基)丙烯酰胺链段,开发出了一种高导电性、本质柔软、坚韧且可拉伸的PEDOT:PSS基水凝胶。由此制成的PEDOT:PSS水凝胶具有高电导率(1 850 S/m)、高拉伸性(断裂伸长率大于50%)、低拉伸弹性模量(4 MPa)和卓越的韧性(400 kJ/m³)。

上述研究成果不仅丰富了PEDOT:PSS的改性方法,也为解决其在实际应用中的性能矛盾提供了新的方向,表明深入研究改性PSS对推动PEDOT:PSS在众多领域应用具有重要价值。

4 结语与展望

目前,针对PEDOT:PSS导电性能提升的改性方法虽多,但均存在局限性。掺杂方法中,掺杂剂选择和浓度控制复杂,掺杂剂过量会影响载流子传输;酸处理面临环保和材料稳定性问题;有机溶剂处理和离子液体处理在成本和工艺条件上有待优化;分子结构设计技术难度大,研究成果尚不成熟。未来,PEDOT:PSS改性研究应聚焦探索平衡导电性与稳定性的新策略,开发更高效的多功能集成材料,以满足柔性电子器件、生物电子器件、柔性太阳能电池等领域的高性能需求,进一步拓展其应用范围。

基于当前研究与应用需求,未来PEDOT:PSS材料的发展可从以下4个方向重点突破。

(1)精准分子设计。

通过可控聚合技术[如原子转移自由基聚合(ATRP),RAFT]调控PSS链段结构及官能团密度,引入功能性侧链;推动PEDOT与PSS的共价键合,减少过度相分离,协同提升分散性与导电性。

(2)绿色制备工艺。

发展辊涂-紫外固化、水基原位掺杂等连续化绿色工艺,替代高污染方法;优化电沉积、打印等技术参数,实现大面积均匀成膜,将材料浪费率降至20%以下。

(3)多性能协同体系。

构建“导电-环境稳定-功能化”复合体系,例如结合金属有机骨架(MOFs)以增强结构稳定并赋予气敏功能,引入银纳米颗粒(AgNPs)实现高导电与抗菌性共存,拓展至生物电子应用领域。

(4)应用导向定制。

柔性太阳能电池:兼顾高透光(透过率大于90%)与高导电(电导率大于2000 S/cm),可通过SiO₂纳米球掺杂减少光散射;

可穿戴传感器:发展动态交联水凝胶体系,实现高拉伸(断裂伸长率大于150%)与高灵敏度;

柔性储能器件:与聚苯胺等复合,构建“导电-储能”一体化电极。

参考文献

[1] LIU C X, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(45): 62 469–62 480.
[2] 吴家豪,等. 精细化工, 2025: 1–13[2025-09-26]. <https://doi.org/10.13550/j.jxhg.20240756>.

WU Jiahao, et al. Fine Chemicals, 2025: 1–13[2025-09-26]. <https://doi.org/10.13550/j.jxhg.20240756>.
[3] 刘晓红,等. 福建师范大学学报(自然科学版), 2024, 40(5): 73–81.
LIU Xiaohong, et al. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2024, 40(5): 73–81.
[4] 张强飞,等. 复合材料学报, 2025, 42(5): 2 392–2 404.
ZHANG Qiangfei, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(5): 2 392–2 404.
[5] 杨林,等. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(4): 487–498.
YANG Lin, et al. Science China: Technological Sciences, 2023, 53(4): 487–498.
[6] 单昕,等. 中国科学材料, 2025, 68(5): 1 452–1 461.
SHAN Xin, et al. Science China Materials, 2025, 68(5): 1 452–1 461.
[7] 梁丽珊,等. 中国涂料, 2024, 39(4): 47–55.
LIANG Lishan, et al. Chinese Coatings, 2024, 39(4): 47–55.
[8] 杨磊落,等. 当代化工研究, 2024(2): 116–118.
YANG Leiluo, et al. Contemporary Chemical Industry Research, 2024(2): 116–118.
[9] 樊峤,等. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(7): 176–184.
FAN Qiao, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2023, 39(7): 176–184.
[10] FAN X, et al. Advanced Science, 2019, 6(19). DOI: 10.1002/advs.201900813.
[11] ZHANG B Q, et al. Nanotechnology Reviews, 2023, 12(1). DOI: 10.1515/ntrev-2023-0578.
[12] YAGCI O, et al. Polymer Bulletin, 2022, 79(12): 11 493–11 509.
[13] Girtan M, et al. Materials Today Communications, 2020, 22. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2019.100735.
[14] 徐超,等. 能源研究与管理, 2022(1): 71–76.
XU Chao, et al. Energy Research and Management, 2022(1): 71–76.
[15] PARK J, et al. Advanced Science, 2024, 11(10). DOI: 10.1002/advs.202308368.
[16] GOGOI B, et al. Molecules, 2023, 28(16). DOI: 10.3390/molecules28165989.
[17] 庞峰飞,等. 功能高分子学报, 2013, 26(3): 217–222.
PANG Fengfei, et al. Journal of Functional Polymers, 2013, 26(3): 217–222.
[18] 牟欣雨,等. 东华大学学报(自然科学版), 2025: 1–11[2025-09-26]. <https://doi.org/10.19886/j.cnki.dhdz.2025.0172>.
MOU Xinyu, et al. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2025: 1–11[2025-09-26]. <https://doi.org/10.19886/j.cnki.dhdz.2025.0172>.
[19] 唐火强,等. 化工新型材料, 2025, 53(8): 269–276.
TANG Huoqiang, et al. New Chemical Materials, 2025, 53(8): 269–276.
[20] QIAN X Y, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17

- (11):17 164–17 178.
- [21] 杨滨霞,等.山东化工,2024,53(4):15–17.
YANG Binxia, et al. Shandong Chemical Industry, 2024, 53(4): 15–17.
- [22] 龚道军,等.微处理机,2024,45(6):1–10.
GONG Daojun, et al. Microprocessor, 2024, 45(6):1–10.
- [23] XU S L, et al. Chemical Engineering Journal, 2025, 510. DOI: 10.1016/j.cej.2025.161453.
- [24] FAN Q, et al. Progress in Organic Coatings, 2024, 189. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108308.
- [25] KAUR G, et al. Materials, 2024, 17(18). DOI: 10.3390/ma17184602.
- [26] 吕东方,等.现代纺织技术,2023,31(1):40–53.
LV Dongfang, et al. Modern Textile Technology, 2023, 31(1): 40–53.
- [27] 袁俊钊,等.印刷与数字媒体技术研究,2025(1):154–162.
YUAN Junzhao, et al. Research on Printing and Digital Media Technology, 2025(1):154–162.
- [28] NABHAN M A, et al. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5 (5):3 278–3 288.
- [29] ZAFAR Q, et al. Sensors and Actuators B-Chemical, 2018, 255: 2 652–2 656.
- [30] DENG Y C, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17 (14):21 536–21 543.
- [31] TU S, et al. ACS Nano, 2024, 18(51):34 829–34 841.
- [32] CHEN R, et al. Macromolecules, 2022, 55(12):4 967–4 978.
- [33] BAILLEUL Q, et al. ACS Applied Polymer Materials, 2024, 6 (16):9 892–9 904.
- [34] ZHANG J Y, et al. Small, 2025, 21(3). DOI: 10.1002/sml.202407256.
- [35] SONG W, et al. Iscience, 2020, 23(4). DOI: 10.1016/j.isci.2020.100981.
- [36] DENG J D, et al. ACS Applied Energy Materials, 2024, 7(20): 9 577–9 585.
- [37] ZHANG T Y, et al. Chemical Engineering Journal, 2025, 509. DOI:10.1016/j.cej.2025.161240.
- [38] GUO Y Y, et al. Optical Materials Express, 2024, 14(4):972–982.
- [39] LIU X Y, et al. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 132:81–89.
- [40] WU T, et al. Macromolecular Materials and Engineering, 2022, 307(12). DOI:10.1002/mame.202200411.
- [41] DENG H T, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16 (51):70 754–70 762.
- [42] LI Y, et al. Advanced Materials, 2024, 36(13). DOI: 10.1002/adma.202310973.
- [43] OH B, et al. Nature Communications, 2024, 15. DOI: 10.1038/s41467-024-50264-6.
- [44] KAYSER L, et al. Chemistry of Materials, 2018, 30(13):4 459–4 468.
- [45] BLAU R, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(4): 4 823–4 835.
- [46] YU J W, et al. Chemistry of Materials, 2023, 35(15):5 936–5 944.