

高分子化学材料在柔性电子器件中的研究进展

赖煜

福建师范大学旗山校区

DOI:10.12238/pe.v3i4.15108

[摘要] 在科技快速发展的背景下,柔性电子器件因其可弯曲、可折叠等特性成为研究热点。高分子材料因其柔韧性、可加工性和低成本,在柔性电子发展中起关键作用。研究已开发出多种高分子材料,如导电高分子和弹性体基材,并通过结构设计与表面改性提升其机械柔韧性和电学性能。喷墨打印、溶液旋涂等技术实现了材料的精准加工,推动了可穿戴传感器、柔性显示屏及能量存储装置的应用。未来需进一步研发高性能、自修复、多功能集成材料,并发展绿色制造技术,解决性能一致性与环境稳定性问题,促进柔性电子器件广泛应用于更多领域。

[关键词] 高分子材料; 柔性电子器件; 电子设备

中图分类号: V443 文献标识码: A

Research progress of polymer chemical materials in flexible electronic devices

Yu Lai

Qishan Campus of Fujian Normal University Fuzhou

[Abstract] With the rapid development of technology, flexible electronic devices have become a research hotspot due to their bendable and foldable characteristics. Polymer materials play a crucial role in the development of flexible electronics due to their flexibility, processability, and low cost. Research has developed various polymer materials, such as conductive polymers and elastomeric substrates, and improved their mechanical flexibility and electrical properties through structural design and surface modification. Technologies such as inkjet printing and solution spin coating have achieved precise processing of materials, promoting the application of wearable sensors, flexible displays, and energy storage devices. In the future, it is necessary to further develop high-performance, self-healing, multifunctional integrated materials, and develop green manufacturing technologies to solve the problems of performance consistency and environmental stability, and promote the widespread application of flexible electronic devices in more fields.

[Key words] polymer materials; Flexible electronic devices; Electronic devices

引言

柔性电子器件基于柔性基底材料,具有可弯曲、可拉伸等特性,在可穿戴设备、医疗和显示领域广泛应用,如智能手环、柔性传感器及OLED折叠屏手机。高分子材料在其中起关键作用,不仅作为柔性基底提供支撑,还可通过改性实现导电性和功能性,用于电极、传感器及封装保护。研究高分子材料在柔性电子器件中的应用,有助于提升器件性能与可靠性,推动相关产业发展,并在医疗监测、智能交通等领域带来创新,同时促进环保材料发展,减少电子废弃物。

1 材料类型

1.1 导电高分子

导电高分子是一类具有共轭 π 键结构的高分子材料,因独特电学性能在柔性电子器件中应用广泛。相比传统无机材料,

其具备可溶液加工、柔韧性好、质量轻等优点。聚噻吩类如PEDOT:PSS具有良好的导电性、透明度和稳定性,常用于有机太阳能电池的空穴传输层,优化处理工艺后可将光电转换效率提升至10%左右,并可用作柔性显示屏的透明导电电极。另一类聚苯胺则因合成简单、成本低,在传感器领域表现突出,例如对氨气具有高灵敏度和选择性的气体传感器,检测限可达ppm级别,通过检测其电学性能变化实现气体快速检测。

1.2 弹性体基材

弹性体基材在柔性电子器件中承担着支撑和保护内部功能层的重要作用,需具备良好的柔韧性、弹性和化学稳定性。硅橡胶因其优异的柔韧性和生物相容性,广泛应用于可穿戴设备,如作为可穿戴医疗传感器的封装材料,能够贴合皮肤并长时间稳定工作。热塑性弹性体(TPE)兼具塑料的加工性能和橡胶的弹性,

在柔性电池中可用作外壳材料,使电池在弯曲折叠时仍保持良好电化学性能,容量衰减率低。聚氨酯弹性体则具有优异的拉伸和耐磨性能,常用于柔性显示屏的缓冲层,能有效减少弯曲应力,提升使用寿命。例如,部分柔性OLED显示屏采用聚氨酯弹性体作为缓冲层,在10万次弯曲测试后仍保持良好显示效果。

1.3 复合功能材料

复合功能材料通过将两种或多种不同性能的材料复合,实现单一材料难以达到的综合性能。例如,导电高分子与纳米粒子的复合,如碳纳米管与PEDOT:PSS的结合,可显著提升导电性和力学性能,在柔性传感器中提高灵敏度和响应速度,其压力传感器灵敏度比单一材料提高2-3倍。此外,弹性体与无机半导体的复合,如氧化锌纳米线与硅橡胶复合,可制备具有良好柔韧性和光电性能的材料,用于柔性光电探测器的光吸收层,实现光信号探测。磁性材料与弹性体的复合则可用于柔性磁传感器,如铁氧体纳米颗粒与聚氨酯复合,能检测微弱磁场变化,在智能穿戴设备中识别跑步、走路、上下楼梯等运动状态,提供精准运动数据^[1]。

2 材料性能

2.1 机械柔韧性

机械柔韧性是高分子材料在柔性电子器件中应用的关键性能,尤其在经历弯曲、折叠和拉伸等复杂力学环境时,仍需保持结构稳定与电学性能不变。聚噻吩类导电高分子因其柔性分子链,在反复弯曲(超1000次,弯曲半径毫米级)下表现优异,适用于可穿戴设备;弹性体如PDMS则因高弹性和可拉伸性(数倍长度)广泛用于器件基底,提供机械支撑与形变适应能力。此外,通过碳纳米管与聚合物复合等设计手段,也可有效增强材料的拉伸强度与柔韧性,提高其对复杂变形的适应性。

2.2 电学传导性

高分子材料的电学传导性是其于柔性电子器件中应用的关键性能。导电高分子如聚苯胺经盐酸掺杂后电导率可超过10 S/cm,具备环境稳定性,适用于柔性电极和透明导电电极,可替代ITO以提升柔性并降低成本。无机纳米材料与高分子的复合材料也展现出优异导电性,如银纳米线与聚合物复合薄膜,因其高长径比和良好导电性可在基体中形成连续导电网络,具有低表面电阻、高透光性和柔韧性,适用于柔性触摸屏。此外,石墨烯与高分子复合材料因石墨烯的高载流子迁移率和二维结构,在柔性超级电容器中表现出良好的充放电效率、循环稳定性及弯曲折叠适应能力。

2.3 稳定与耐久性

稳定与耐久性是高分子化学材料在柔性电子器件中实现长期可靠工作的关键性能。材料需在多种环境条件下保持稳定,并具备良好的抗疲劳性和耐老化性。部分导电高分子如聚吡咯在弱酸性和中性环境中电学性能稳定,而聚酰亚胺等耐高温材料在150℃以上仍能维持良好柔韧性和电学性能。柔性电子器件在使用中常经历反复弯曲、折叠和拉伸,因此材料需具备优异的抗疲劳性能。一些特殊设计的聚氨酯弹性体在上万次弯曲循环

后力学和电学性能变化小于5%,可满足柔性显示屏等器件需求。此外,高分子材料易受光照、氧气和水分影响发生老化,为此可通过表面涂覆防水、防氧保护层等方式提升其耐久性,如应用于柔性太阳能电池中可有效延长使用寿命,增强器件稳定性^[2]。

3 制备方法

3.1 溶液加工技术

溶液加工技术是高分子化学材料制备中的常用方法,具有操作简便、成本低、适于大面积制备等优点。其中,溶液旋涂通过离心力使高分子溶液均匀铺展于基底,形成可控厚度的薄膜,广泛应用于有机太阳能电池活性层的制备,光电转换效率可达较高水平。溶液印刷则包括喷墨印刷和丝网印刷,前者精度高、可图案化,适用于柔性电子器件电路的制备,如银纳米线导电图案具有良好导电性和柔韧性;后者适合大面积厚膜加工,在柔性传感器敏感层制备中可实现均匀印刷,满足功能性需求。

3.2 微纳结构设计

微纳结构设计赋予高分子材料独特性能,满足多样化应用需求。通过调控光学、电学和力学特性,可实现功能优化。纳米纤维结构可通过静电纺丝等方法制备,具有高比表面积和多孔特性,广泛应用于高效过滤,如聚丙烯腈纳米纤维膜对PM2.5的高过滤效率;在生物医学领域,其类似细胞外基质的结构有助于细胞生长。此外,微纳图案结构也是重要研究方向,光刻技术可精确构建微纳电路,而纳米压印则以低成本方式复制复杂图案,适用于柔性光学器件中的微纳光学结构制备,实现光性能调控与增强。

3.3 表面改性策略

表面改性策略可改善高分子材料的表面性能,提升其相容性与功能性。化学改性通过引入特定官能团改变材料表面性质,如等离子体处理聚四氟乙烯可增强亲水性,利于粘结应用;在生物医学领域,引入生物活性分子可提高生物相容性,促进细胞粘附与生长。物理改性则通过涂层或沉积方式赋予材料新性能,如环氧树脂涂层可提升金属耐腐蚀性,延长使用寿命;采用物理或化学气相沉积技术在高分子表面形成金属薄膜,如铜沉积聚酰亚胺薄膜,可增强导电性,适用于柔性电路板制备^[3]。

4 器件应用

4.1 可穿戴传感器

可穿戴传感器因其能实时监测人体生理信号和运动状态,在医疗健康与运动健身领域展现出巨大应用潜力。高分子化学材料凭借柔韧性、可加工性和生物相容性,成为其理想制备材料。在医疗方面,柔性电极可紧密贴合皮肤,实现心率、血压等信号的高灵敏检测,如聚吡咯(PPy)电极测心电图信噪比超30dB;部分传感器还可通过汗液检测葡萄糖、乳酸等生物标志物,助力糖尿病和运动疲劳监测。在运动领域,传感器可准确获取步数、关节弯曲角度等数据,辅助训练与康复,并结合VR/AR技术提升运动体验。

4.2 柔性显示屏

柔性显示屏因其可弯曲、可折叠的特性,在智能手机、平板

电脑、智能手表等消费电子领域展现出广阔应用前景,其制备中高分子化学材料发挥关键作用,提供优异的柔韧性、光学性能和机械性能。目前主流技术包括有机发光二极管(OLED)和量子点发光二极管(QLED),其中OLED的高分子材料主要用于发光层和电荷传输层,如聚对苯撑乙烯(PPV)及其衍生物具有良好的发光与电荷传输性能,使显示屏发光效率达20cd/A以上,寿命超过10万小时;而在QLED中,高分子材料用于复合量子点制备发光层与封装层,提升色纯度与稳定性,发光效率可达30%以上,并增强抗环境影响能力。此外,柔性显示屏在汽车与航空航天领域也具发展潜力,如用于车载仪表盘、中控屏及飞机座舱显示系统,提升信息展示效果与操作体验。

4.3 能量存储装置

能量存储装置因其在电动汽车和可再生能源存储中的广泛应用前景,受到广泛关注。高分子化学材料在其中发挥关键作用,提供良好的离子传导性能、电极稳定性和机械性能。目前主流的能量存储装置包括锂离子电池和超级电容器。在锂离子电池中,高分子材料如聚环氧乙烷(PEO)可用作电解质材料,具备优异的离子传导性和化学稳定性,室温下离子电导率可达 10^{-4} S/cm以上,循环寿命超过1000次。在超级电容器中,聚苯胺(PANI)、聚噻吩(PTh)等导电高分子材料展现出高比电容和功率密度,例如基于PANI的超级电容器比电容可超过500F/g,功率密度可达10kW/kg。此外,高分子材料还可作为电解质添加剂提升其性能。除上述应用外,研究人员正探索高分子材料在固态电池和锂硫电池中的应用,为实现更安全高效储能提供可能。

5 挑战及其对策分析

5.1 性能一致性问题及其对策分析

在应用于柔性电子器件的过程中,性能一致性问题尤为突出。由于原料纯度、反应条件等因素的细微差异,不同批次的导电高分子如聚噻吩,其电导率可能从 10^{-3} S/cm波动至10S/cm,严重影响器件性能稳定性。对于柔性传感器和显示屏等应用,这种不一致性可能导致灵敏度、响应时间或显示效果的显著差异,进而影响测量准确性与使用体验。例如,可穿戴健康监测设备中的心率传感器若存在性能偏差,将影响对健康状况的判断。为解决这一问题,需严格控制制备工艺,包括原料选择、反应优化及后处理规范,并通过自动化生产减少人为误差,同时建立完善质量检测体系,确保材料性能达标后方可用于器件制造。

5.2 环境稳定性不足及其对策分析

高分子化学材料在不同环境条件下易发生性能变化,主要表现为机械、电学性能及化学稳定性的下降。高温会加剧分子链运动,导致材料软化变形,影响柔性电子器件的结构完整性与

稳定性;如某些弹性体基材在超过80℃时弹性模量显著下降,柔韧性变差。潮湿环境中,材料吸水可能引发溶胀、水解等反应,干扰电学性能,例如导电高分子因水分侵入出现电导率下降甚至导电通路中断,在相对湿度达80%时电导率降幅超30%。光照和氧气亦可引发老化、降解,缩短器件寿命。为提升环境稳定性,可通过添加稳定剂、抗氧化剂等方式对材料进行改性,同时采用封装技术减少外界因素影响,如在可穿戴设备中使用防水防尘封装材料以增强环境适应性。

5.3 大规模生产难题及其对策分析

大规模生产高分子化学材料用于柔性电子器件面临多重挑战。现有的制备方法如溶液加工技术虽工艺简单、成本低,但难于精确控制溶液均匀性和干燥速度,易导致性能不一致,且溶剂挥发造成环境污染,不符合绿色制造要求。此外,适用于高分子材料生产的高效设备和成熟自动化生产线尚不完善,如先进光刻技术虽可实现高精度微纳结构,但生产效率低,仅为每小时几十片,无法满足大规模需求。同时,高昂的原材料成本、能耗及设备投资也限制了市场推广,部分高性能复合功能材料因价格昂贵导致产品售价过高,影响竞争力。为解决上述难题,需改进生产工艺,提升设备自动化水平与效率,并加强原材料研发,寻找低成本、高性能的替代材料,如生物基高分子材料具备来源广泛、可降解等优势,有望成为新方案。

6 结束语

高分子化学材料在柔性电子器件领域取得显著进展,导电高分子、弹性体基材及复合材料各具功能优势,提升了机械柔韧性、导电性与稳定性。制备技术如溶液加工、微纳结构设计和表面改性推动了材料性能优化,广泛应用于可穿戴传感器、柔性显示屏和能量存储装置。未来,高分子材料将在可穿戴设备、智能医疗、物联网等领域发挥更大作用,发展方向包括提升综合性能、优化制备工艺、实现多功能集成及开发环保型材料,以满足市场对柔性电子器件高性能与可持续性的需求。

[参考文献]

- [1]张玉梅,王彦,张玥.高分子科学概论[M].化学工业出版社,2024.03.197.
- [2]李群,韩建梅,杨永娟.高分子科学与工程实验[M].化学工业出版社,2024.02.122.
- [3]张宏坤,官琛亮,梁亚琴.高分子材料合成与创新研究[M].化学工业出版社,2023.06.189.

作者简介:

赖煜(1997—),男,汉族,四川省达州市大竹县人,硕士,研究方向:电化学储能。