

·综述·

聚合物热电材料在自供能智能服饰中的研究进展

杨孟云^{1,2} 金佳冰^{3*}

(江西服装学院¹ 服装设计学院² 南昌市轻工业产品人工智能制造重点实验室 南昌 330000)

(³江南大学纺织科学与工程学院 无锡 214000)

摘要: 自供能智能服饰需要兼顾柔性穿戴、持续供能、信号感知、水洗耐久和皮肤安全。聚合物热电材料可利用人体与环境之间的低品位温差产生电能或自供能传感信号,具有低热导率、柔韧性好、可溶液加工和易于织物集成等优势。本文围绕聚合物热电材料在自供能智能服饰中的应用,综述了p型聚(3,4-乙炔二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)、聚合物/碳基复合体系、n型聚合物、聚合物多重异质结、印刷成型、热电纤维和三维织物热流管理等研究进展。重点分析了多胺去掺杂、界面能量过滤、n型聚苯并二呋喃二酮(PBFDQ)缺陷抑制、界面热散射和纳米黏结剂印刷等关键机制。进一步结合低温差输出、响应时间、识别精度、机械循环、水洗耐久、汗液稳定性和生物相容性等指标,指出聚合物热电服饰评价可由功率因子(PF)或无量纲热电优值(ZT)等单一材料指标转向“材料参数-器件输出-穿戴可靠性”的综合评价体系。未来研究需加强热-电输运解耦、n型聚合物稳定化、三维热流管理和标准化可靠性测试,以推动聚合物热电材料在自供能智能服饰中的实际应用。

关键词: 聚合物热电材料; 自供能; 智能服饰; 聚(3,4-乙炔二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐; n型聚合物

Research Progress on Polymer Thermoelectric Materials in Self-powered Smart Clothing

YANG Meng-yun^{1,2}, JIN Jia-bing^{3*}

(¹School of Fashion Design, ²Nanchang Key Laboratory of Artificial Intelligence Manufacturing for Light Industrial Products, Jiangxi Institute of Fashion Technology, Nanchang 330000)

(³School of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214000)

Abstract: Self-powered smart clothing requires conformable wearability, continuous energy harvesting, signal sensing, wash durability, and skin-contact safety. Polymer thermoelectric materials can convert the low-grade temperature difference between the human body and the environment into electrical energy or self-powered sensing signals. Their low thermal conductivity, mechanical flexibility, solution processability, and textile compatibility render them promising candidates for garment-integrated energy harvesters and passive sensors. This review summarizes recent progress in p-type poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) systems, polymer/carbon composites, n-type polymers, polymeric multi-heterojunctions, printed thermoelectrics, thermoelectric fibers, and three-dimensional textile-based heat-flow management, with an emphasis on key mechanisms, including polyamine-induced dedoping, interfacial energy filtering, defect suppression in n-type poly(benzodifurandione) (PBFDQ) polymers, interfacial thermal scattering, and nanobinder-assisted printing. By comparing the low-temperature-gradient output, response time, recognition accuracy, mechanical cycling, wash durability, sweat stability, and biocompatibility, this review emphasizes that polymer thermoelectric smart clothing should be evaluated

2026-05-15 收稿, 2026-06-21 录用

* 通信联系人: 金佳冰, E-mail: jiabing.jin@outlook.com

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.249

using an integrated “material parameter–device output–wearable reliability” framework rather than by power factor (PF) or dimensionless thermoelectric figure of merit (ZT) alone. Future studies should focus on thermal-electrical transport decoupling, n-type polymer stability, three-dimensional heat-flow management, and standardized reliability testing to promote practical applications in self-powered smart clothing systems.

Keywords: Polymer thermoelectrics; Self-powered; Smart clothing; Poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrene sulfonate); N-type polymer

引用: 杨孟云, 金佳冰. 聚合物热电材料在自供能智能服饰中的研究进展. 高分子通报, doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.249

Citation: Yang, M. Y.; Jin, J. B. Research progress on polymer thermoelectric materials in self-powered smart clothing. *Polym. Bull.* (in Chinese), doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.249

智能服饰正在由单一信号采集向“感知–供能–反馈”一体化方向发展。传统可穿戴电子多依赖电池或外接电源,存在充电频繁、厚度增加、弯折失效和维护成本高等问题。人体热能具有持续存在、分布广和不依赖光照的特点。利用热电效应将人体与环境之间的温差转化为电能,是智能服饰实现自供能和无源传感的重要路径^[1~8]。

与无机热电材料相比,聚合物热电材料的热电优值通常较低,但其柔性、低热导率、可加工性和织物适配性更适合贴身服饰场景^[5~9]。因此,智能服饰中的热电材料评价不能只关注功率因子或无量纲热电优值(ZT),还应同时考虑

低温差输出、弯折稳定性、水洗稳定性、汗液耐受性、生物相容性和服装结构中的热流维持能力。

现有综述多从有机热电材料、柔性热电器件或智能纺织品整体展开,容易把热电、摩擦电、光伏纺织品和一般柔性传感器混合讨论^[3~5,8,9]。本文将范围限定为“聚合物热电材料在自供能智能服饰中的应用”,重点突出高分子材料、热电转换机制和服饰工程约束之间的关系。

聚合物热电材料面向自供能智能服饰的跨尺度机制框架如图1所示,系统整合了p型聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)、聚合物/碳基复合材料、n型聚合物、聚合物多重

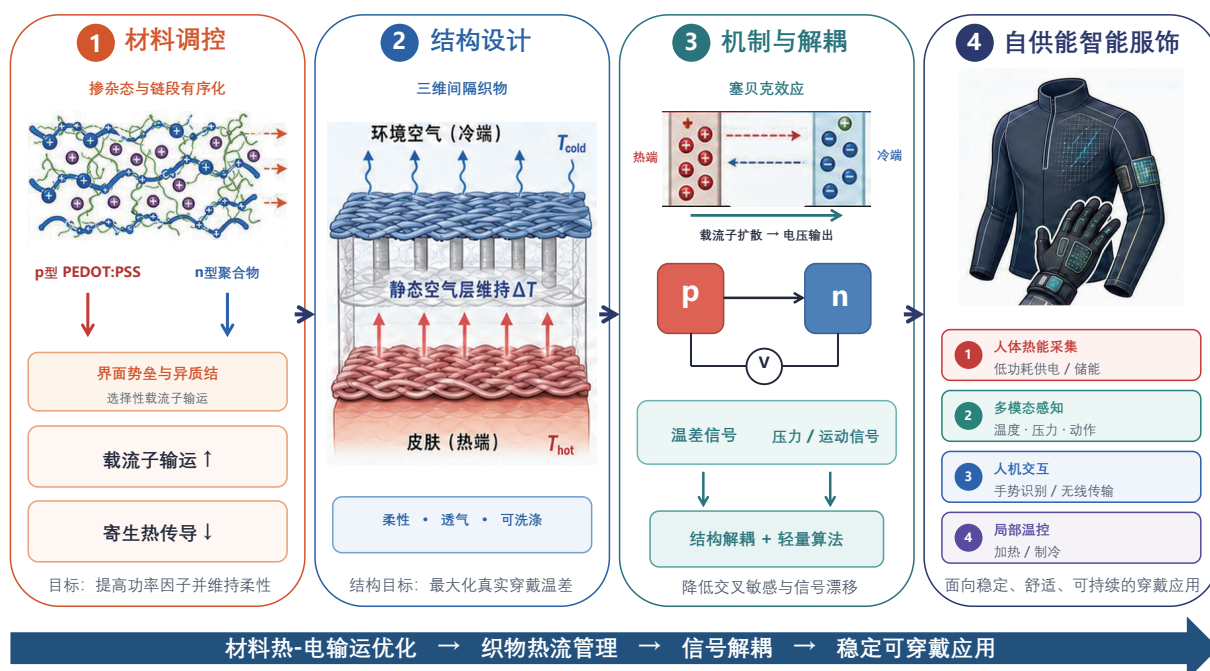


图1 聚合物热电材料在自供能智能服饰中的跨尺度机制与性能关联

Figure 1 Cross-scale mechanisms and performance relationships of polymer thermoelectric materials in self-powered smart clothing

异质结 (polymeric multi-heterojunction, PMHJ) 以及印刷和三维织物结构等典型路径。该图重点揭示材料分子/界面调控、热-电运输解耦、器件结构放大效应与服饰级可靠性之间的关联,强调聚合物热电材料的应用评价应由单一材料性能指标拓展为材料参数、器件输出和穿戴可靠性的协同优化。

1 热电转换原理与服饰适配要求

热电转换主要基于塞贝克效应。当材料两端存在温差时,载流子从热端向冷端扩散,在回路中产生电压。热电性能通常由塞贝克系数 S 、电导率 σ 、热导率 κ 和无量纲热电优值 ZT 评价, $ZT = S^2\sigma T/\kappa$,式中 T 为绝对温度,K。在近室温柔性器件中,功率因子 $PF = S^2\sigma$ 也常用于比较材料电输运能力^[6,7,10,11]。

对聚合物材料而言,难点在于 S 、 σ 和 κ 并非独立变量。提高载流子浓度通常可以提升 σ ,但会使 S 下降;提高填料含量可以改善导电网络,却可能提高 κ 并降低织物柔软性。近年来的研究重点已从“单一提高电导率”转向“热-电运输解耦”,即通过掺杂态控制、界面势垒、分子骨架稳定化、异质结和结构热流设计,同时提高有效载流子输运并抑制无效热传导^[10~18]。

智能服饰还具有比普通柔性器件更严格的适配要求。首先,人体与环境之间的有效温差较小,并会受风速、衣物层数、运动出汗和贴合状态影响。其次,服饰在使用中不断经历弯折、拉伸、压缩和摩擦。再次,长期贴肤穿戴要求材料具有低刺激性、低毒性、透气性和可洗涤性。最后,服饰常需要同时感知温度、压力和运动,电信号、压阻信号和湿度信号之间容易交叉干扰,需要前端结构解耦与后端算法协同^[2,19~21]。

因此,聚合物热电材料在自供能智能服饰中的应用不能仅由材料层面的 PF 或 ZT 判断,而应从材料输运、器件结构、织物热流路径和服饰级可靠性等多个层面进行综合评价。材料层面的 S 、 σ 、 κ 、 PF 和 ZT 需要通过器件结构设计、p/n热电臂连接、纤维或织物集成、封装保护及热流管理,进一步转化为低温差输出、响应时间、识别能力、机械循环稳定性、水洗耐久性、汗液稳定性和皮肤接触安全性等服饰应用指标。

综上,聚合物热电材料在自供能智能服饰中

的应用需要同时考虑材料输运性能、器件结构设计、织物热流路径和服饰级可靠性。作为自供能可穿戴器件的重要材料基础,聚合物热电材料通常依托溶液加工、柔性成膜、纤维/织物复合和低热导率等特征,构建垂直型、水平型或折纸型热电器件,并进一步服务于人体热能采集、自供能传感和局部温控等应用场景。聚合物热电材料的基本特征、典型器件构型及可穿戴应用方向如图2所示。

2 聚合物热电材料体系与核心物理化学机制

2.1 p型PEDOT:PSS体系的去掺杂与费米能级调控

PEDOT:PSS是目前最常用的p型聚合物热电材料之一。其水分散性好,成膜、涂覆和纺丝工艺成熟,可在纤维和织物表面形成连续导电层^[11~18]。传统优化策略多集中于二次掺杂、酸处理和溶剂处理。例如,DMSO、乙二醇或强酸处理可诱导PEDOT链段由卷曲构象向更扩展和有序的构象转变,并促进绝缘PSS相部分迁移或分离,从而降低载流子传输阻力并提高电导率^[10,12,22,23]。

但是,高电导率并不等于高热电性能。PEDOT:PSS中过高的载流子浓度会使费米能级过度移动,导致塞贝克系数下降。因此,近年来研究开始强调去掺杂(dedoping)与链段重构的协同调控。多胺分子如 N -(2-氨基乙基)- N -甲基-1,2-乙二胺(DEMTA)或苯胺四聚体- b -聚乙二醇- b -苯胺四聚体三嵌段共聚物(APA)含有2个或多个伯胺基团,可通过连续电子转移和去质子化反应降低PEDOT的氧化掺杂程度^[12,22]。在光谱上,该过程表现为与高掺杂态相关的双极化子吸收减弱,而中性PEDOT吸收增强,说明载流子浓度被有效降低。

去掺杂的价值在于调节费米能级,使参与热扩散的载流子平均能量提高,从而提升塞贝克系数。但如果去掺杂过度,电导率会明显下降。因此,高性能PEDOT:PSS热电材料需要在“降低无效载流子浓度”和“维持高迁移率”之间取得平衡。较理想的路径是先通过多胺分子或温和化学处理调控载流子浓度,再通过热退火、链段重叠或结晶区重构维持连续 π 共轭传输通道。由此可见,PEDOT:PSS热电优化的本质不是简单“增强

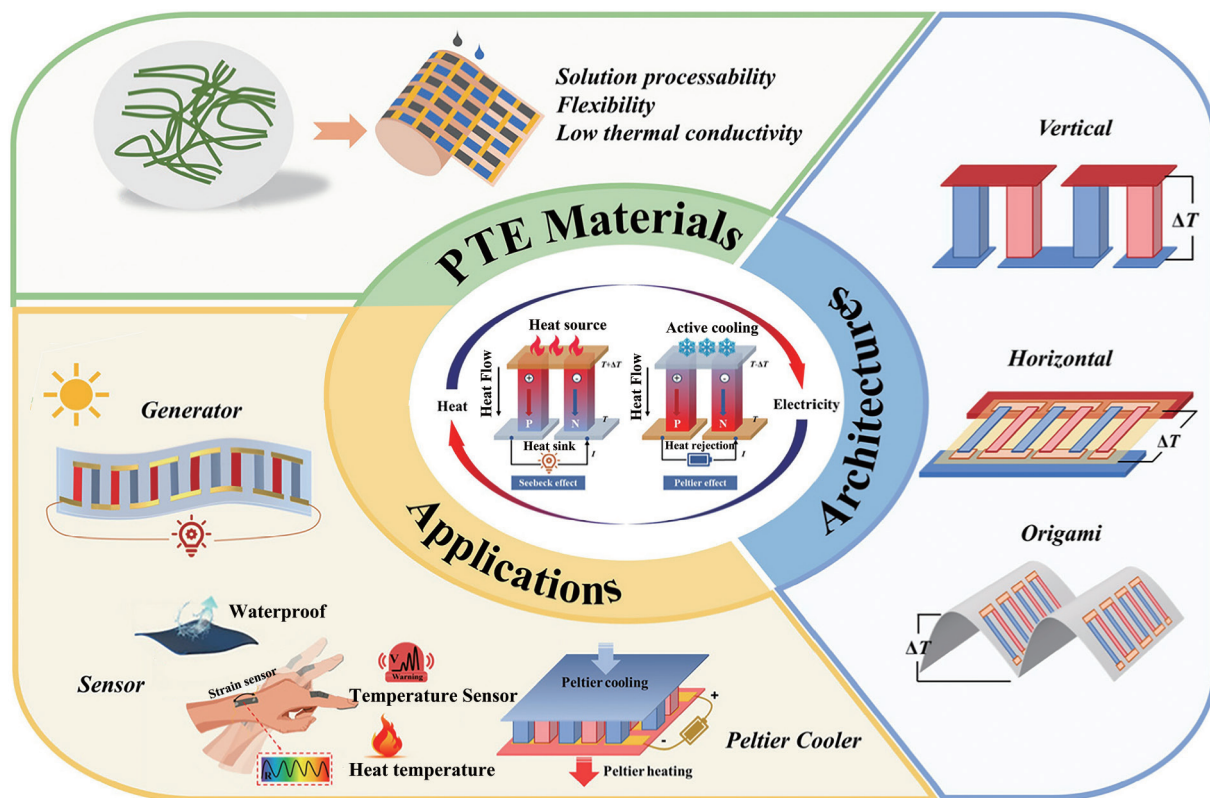


图2 聚合物热电材料在自供能可穿戴器件中的体系构成与应用方向,包括聚合物热电材料的溶液加工、柔性和低热导率特征,垂直型、水平型和折纸型热电器件结构,以及发电、传感和珀尔帖制冷等可穿戴应用场景与基本能量转换过程^[1] (2025 Springer Nature 版权许可)

Figure 2 System composition and application directions of polymer thermoelectric materials in self-powered wearable devices, including solution processability, flexibility, and low thermal conductivity; vertical, horizontal, and origami-type device architectures; and wearable applications involving power generation, sensing, Peltier cooling, and the corresponding energy-conversion processes (Reprinted with permission from Ref. [1]; Copyright (2025) Springer Nature)

导电性”,而是对载流子浓度、链段有序度、相分离和费米能级进行协同调控。

PEDOT:PSS 的亲水 PSS 相在汗液和洗涤环境中易溶胀、迁移或流失,导致导电层剥离和电阻漂移^[22,24,25]。交联、疏水保护层及纤维界面增强可改善稳定性,但需同步评估其对热阻、透气性和柔软性的影响。

2.2 聚合物/碳基复合体系的导电网络构建与界面能量过滤

碳纳米管、石墨烯和还原氧化石墨烯常用于改善聚合物热电材料的电输运性能。CNT 具有高长径比和良好柔韧性,可在较低添加量下形成连续导电网络;石墨烯片层有利于构建面内传输通路。PEDOT:PSS/CNT、PANI/CNT 和 PPy/CNT 等复合体系已被用于柔性热电薄膜、热电纤维和可穿戴传感器^[19,20,26-30]。

复合材料的关键不是简单增加碳填料含量。

填料过少时,导电通路不连续;填料过多时,薄膜变硬,热导率升高,并削弱服饰所需的柔软性。更重要的是,聚合物与碳材料之间存在界面接触电阻、能级失配和相间隧穿势垒。如果界面设计不合理,载流子会在相界面处发生强烈散射,导致电导率下降。

界面能量过滤是近年来聚合物热电复合材料的重要机制^[18]。通过聚电解质或界面桥接剂在 PEDOT:PSS 与 SWCNT 之间形成静电桥接,可降低接触电阻并调控异质结处的势垒高度^[25]。适度界面势垒会选择性散射低能载流子,使高能载流子更有效地参与输运。由于塞贝克系数与参与输运载流子的平均能量有关,过滤低能载流子有助于提高 S ; 同时,良好的界面桥接又可以避免 σ 大幅下降。该机制为突破 S - σ 互斥关系提供了比单纯提高填料含量更合理的路径。

界面能量过滤可在较低碳填料含量下改善 S

与 σ 的平衡,从而减少高填料含量对柔软性、透气性和热导率的不利影响。

2.3 n型聚合物体系的PBFDO结构稳定化

高效热电器件通常需要p型和n型热电臂串联。与p型PEDOT:PSS相比,n型聚合物长期受空气稳定性、掺杂剂迁移和溶液加工限制,是全聚合物热电服饰的关键短板^[31,32]。不过,简单地将n型聚合物概括为“在空气中易被氧化、掺杂态稳定性差”已经不够准确。近2年,以聚苯并二呋喃二酮类聚合物PBFDO或n-PBDF为代表的n型导电聚合物在高电导率、空气稳定性和机理认识方面取得了重要突破^[16,26,32]。

PBFDO体系的第一类突破来自合成和原位掺杂过程。硫介导的一锅法合成路线可减少传统n型聚合物合成中复杂的纯化步骤,并使反应过程中产生的还原性物种参与原位掺杂^[15]。这类路线的意义不只是提高实验室效率,更在于使反应液有机会直接转化为导电聚合物墨水,从而提高涂覆、印刷和大面积成膜的可行性。对于智能服饰而言,可加工性和规模化比单点最高电导率更接近实际应用需求。

PBFDO体系的第二类突破来自结构异构化抑制(isomerization inhibition)。早期n型聚合物在热、氧或掺杂环境中容易发生骨架扭曲和异构化,形成结构缺陷和深能级陷阱,进而捕获载流子并导致电导率衰减。Hwang等研究表明,还原掺杂能够抑制n-PBDF骨架中异构化衍生结构缺陷的形成,从机理上解释了其稳定电荷传输的来源^[16]。第一性原理研究也进一步表明,链长、温度和掺杂水平会影响PBFDO的热力学掺杂效率^[17]。

n型聚合物的稳定化依赖骨架设计、掺杂态固定和界面封装;其服饰适用性仍需通过空气暴露、人工汗液、标准水洗及机械循环测试验证。

2.4 聚合物多重异质结的热传导抑制与电输运保持

除了调控载流子输运,降低热导率也是提高聚合物热电性能的重要路径。Wang等提出的聚合物多重异质结(polymeric multi-heterojunction, PMHJ)通过亚十纳米周期性双异质结和互穿体相异质结界面,实现了热传导抑制和电荷输运保持的协同^[13]。该结构中的高密度界面会增强类声子或传播子(propagons)的界面散射,缩短热载流子的平均自由程,使面内热导率明显降低。

PMHJ通过高密度界面抑制热传导,并依靠连续有机相维持电荷输运,为薄膜、纤维和三维织物中的热流调控提供了材料设计路径。不同材料体系的核心调控机制、性能作用及服饰适配重点汇总于表1。

为增强不同材料体系的可比性,表2进一步汇总了代表性聚合物热电材料的PF、ZT、环境稳定性和水洗性能。表2显示,现有研究在材料级热电性能与服饰级可靠性之间仍存在明显的断层。去掺杂/氧化态调控PEDOT薄膜和PMHJ薄膜分别实现约0.25和1.28的ZT^[13,22],但均未测试水洗或汗液稳定性;n-PBDF纤维兼具91 $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$ 的PF和湿热稳定性,但尚缺乏标准水洗数据。相反,PEDOT:PSS染色丝纱线和三维热电织物可用于说明机洗或机械循环可靠性,但原文未提供完整PF、ZT、洗涤循环次数及洗后热电保持率^[2,23]。因此,后续研究应在同一材料

表1 聚合物热电材料性能优化的核心机制与服饰适配性

Table 1 Core mechanisms of performance optimization and garment suitability of polymer thermoelectric materials

材料体系	前沿策略	核心物理化学机制	性能意义	服饰应用关注点
PEDOT:PSS	多胺去掺杂、二次掺杂、热退火、交联	电子转移和去质子化调节PEDOT氧化态;链段由卷曲向有序构象转变;费米能级和相分离协同调控	在提高S的同时尽量保持 σ ;适合p型柔性热电层	PSS亲水导致水洗和汗液环境下电阻漂移,需要交联和封装
聚合物/碳基复合	CNT/石墨烯复合,PDDA等聚电解质界面桥接	异质结处形成适度势垒,选择性散射低能载流子,产生界面能量过滤效应	缓解S- σ 互斥,降低对高填料含量的依赖	避免材料变硬、热导率升高和透气性下降
n型PBFDO类聚合物	硫介导合成、原位还原掺杂、骨架稳定化	还原掺杂抑制异构化缺陷,减少深能级陷阱,维持稳定电荷传输	推动全聚合物p/n热电器件发展	需验证空气、汗液、水洗和长期弯折稳定性
PMHJ塑料热电材料	亚十纳米周期性双异质结与互穿界面	高密度界面增强类声子/传播子散射,降低面内热导率并维持电输运	提供热-电解耦的新范式	大面积制备、柔性封装和织物集成仍需突破
无机/高分子复合薄膜	Bi ₂ Te ₃ 、Ag ₂ Se等填料与柔性基体或纳米黏结剂复合	纳米黏结剂兼具机械连接、晶粒取向诱导和电输运桥接作用	适合印刷式柔性热电模块	需重视重金属沥出、封装和皮肤接触安全

表2 代表性聚合物热电体系的热电性能与可靠性定量比较

Table 2 Quantitative comparison of thermoelectric performance and reliability of representative polymer thermoelectric systems

材料体系与形态	类型	PF	ZT	环境/机械稳定性	水洗/汗液稳定性	服饰适配意义与文献
去掺杂/氧化态调控PEDOT薄膜	p型薄膜	原文以ZT优化为核心; 未提供适合与织物直接横向比较的统一PF值	室温最高约0.25	未报告服饰级湿热、弯折或拉伸循环	未报告	代表通过调控氧化态实现材料级高热电性能; 尚需进一步验证服饰可靠性 ^[22]
聚合物多重异质结(PMHJ)薄膜	异质结薄膜	未提供适合本表统一比较的PF值	368 K时最高1.28	相较单一组分薄膜, 热导率降低超过60%; 具备溶液加工潜力	未报告	说明界面热散射可显著提高ZT, 但尚缺服饰级水洗与机械耐久数据 ^[13]
湿法纺丝n-PBDF纤维	n型纤维	最高91 $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-2}$	未报告	80%相对湿度空气放置14 d后, 电导率保持初始值的81%	未报告	兼具n型热电性能、湿热稳定性和纺织集成能力 ^[32]
PEDOT:PSS染色丝纱线	p型导电纱线	未报告	未报告	具备纺织加工适配性; 原文重点为导电纱线而非热电材料评价	具备机洗能力; 不同洗涤条件下的统一热电保持率及汗液稳定性未报告	主要说明PEDOT:PSS纺织基导电层的水洗耐久性, 对热电服饰可靠性设计具有参考意义 ^[23]
三维p/n热电间隔织物	p/n织物器件	未报告	未报告	>10000次压缩循环; 50%压缩应变下信号稳定	洗后热电性能保持稳定, 但原文未给出洗涤循环次数、洗后输出保持率或汗液数据	代表材料与三维织物结构协同后的服饰级可靠性和传感性能 ^[2]

器件体系中同步报告PF、ZT、空气/湿热稳定性、标准洗涤程序、循环次数、洗后电阻与输出保持率以及人工汗液浸泡后的性能变化。

3 加工方法与服饰集成结构

3.1 涂覆、浸渍与原位沉积

涂覆和浸渍是聚合物热电材料进入纺织品的直接方法。棉、丝、涤纶、锦纶和间隔织物可通过浸渍PEDOT:PSS、CNT分散液或复合热电墨水获得导电和热电功能层^[22,24,27]。该方法设备要求低, 适合大面积织物处理, 也便于与后整理工艺结合^[5,30,33]。原位聚合可提高导电层与纤维之间的结合, 但反应条件、残留单体和后处理对穿着安全有影响。

涂层厚度、均匀性、附着力和透气性共同决定服饰适用性。纤维表面活化可增强界面结合, 柔性保护层可缓冲弯折与水洗损伤, 亲肤隔离层则用于控制潜在可浸提组分的皮肤暴露。

3.2 湿法纺丝与热电纤维/纱线

纤维化是热电材料进入智能服饰的关键路径。湿法纺丝可将PEDOT:PSS、CNT/聚合物或n型导电聚合物制成连续纤维, 再通过织造、针织、

缝绉或刺绣进入服装结构^[21,23,26,30~38]。与平面薄膜相比, 热电纤维更容易保持织物柔软性和空气通道, 也便于通过串联结构提高输出电压。

热电纤维需要同时满足力学强度、电导率、塞贝克系数和可编织性。过度提高导电相含量会降低断裂伸长率; 过度加入弹性高分子又会稀释导电网络。未来可采用皮芯结构、同轴纺丝、多孔纤维束和纤维表面定向涂层, 使导电相负责载流子输运, 弹性相负责形变缓冲, 外层封装负责水洗和皮肤接触安全。聚合物热电器件常采用垂直型、水平型和折纸型结构, 其热流方向与集成特征如图3所示。

3.3 印刷成型与纳米黏结剂策略

丝网印刷、喷墨印刷和刮涂适合制备图案化热电单元, 可在织物、聚酰亚胺薄膜或柔性高分子膜上构筑p/n热电臂和电极互连^[10,13,39]。印刷法的优势是图案可设计、材料利用率高, 便于与服装裁片、柔性电路和局部封装结合。对于服饰产品, 印刷模块可布置在背部、肩部、腰腹、手腕等温差相对稳定或运动干扰较小的区域。

传统印刷热电墨水常加入高分子黏结剂以提高柔韧性和附着力, 但绝缘黏结剂会阻断载流子

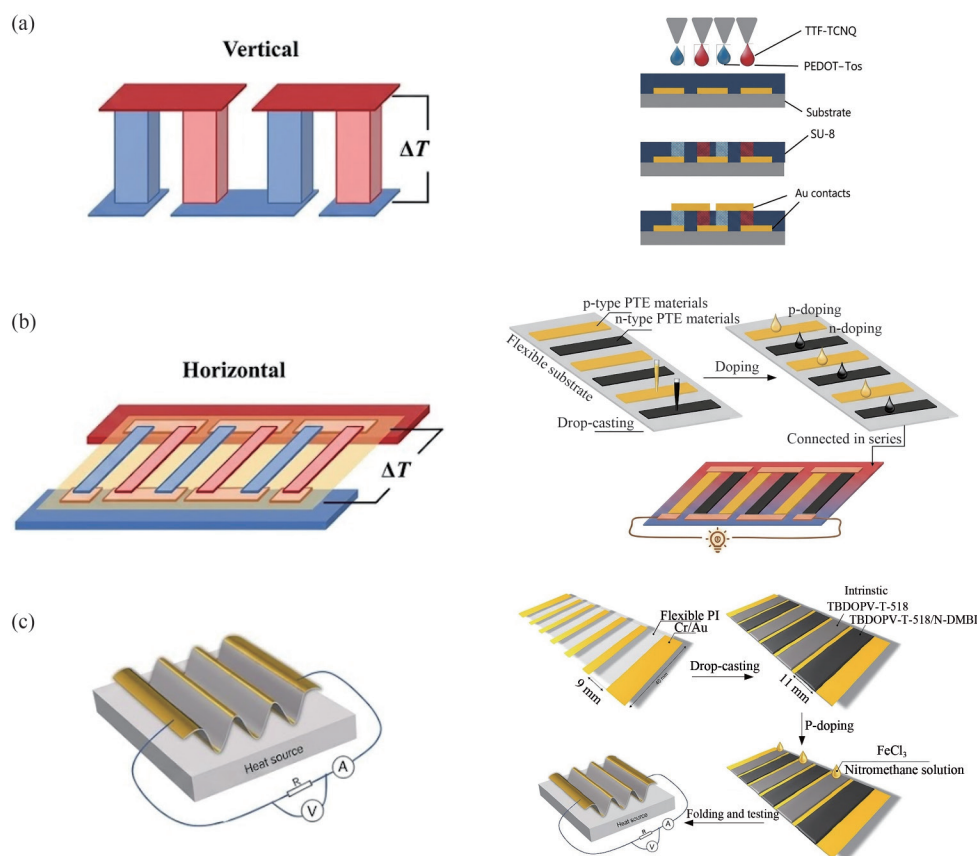


图3 聚合物热电器件的典型结构：(a)垂直型结构，热流沿厚度方向通过 p/n 热电臂；(b)水平型结构，p/n 热电臂在柔性基底上平面排列；(c)折纸型结构，通过折叠增大温差利用效率并提升柔性集成能力^[1] (2025 Springer Nature 版权许可)

Figure 3 Typical architectures of polymer thermoelectric devices: (a) Vertical structure with heat flow passing through p/n thermoelectric legs along the thickness direction; (b) Horizontal structure with planar p/n legs on flexible substrates; (c) Origami-type structure that improves temperature-difference utilization and flexible integration through folding (Reprinted with permission from Ref. [1]; Copyright (2025) Springer Nature)

传输。纳米黏结剂(nanobinders)策略为这一矛盾提供了新思路。Chen等利用Te纳米棒作为 Bi_2Te_3 基印刷薄膜中的纳米黏结剂，使其同时承担机械连接、晶粒取向诱导和电传输桥接作用^[38]。在剪切印刷和烧结过程中，一维Te纳米棒可在晶粒之间形成柔性桥接网络，既缓冲弯折应力，又减少传统绝缘黏结剂对电传输的阻断。

纳米黏结剂策略表明，热电墨水中的黏结组分可兼具力学连接、界面调控和导电桥接功能。聚合物体系可进一步探索导电高分子纳米纤维、功能化CNT及可交联离子聚合物。

3.4 三维间隔织物与动态热流管理

人体热能采集的核心矛盾是温差小且容易消散。三维间隔织物通过上下表层和中间支撑丝形成空气层，可在厚度方向维持相对稳定的温差，同时保留透气性^[2]。He等报道的三维柔性热电织

物利用内刚外柔结构和静态空气层降低寄生热传导，使热流沿厚度方向通过热电功能区，提高温度响应和穿着适应性^[2]。

真实穿戴中的贴合状态、风速、出汗和服装层叠会持续改变热边界条件^[2,5,29]。因此，器件评价需结合环境舱、红外热成像和热流测试，量化动态微气候下的有效温差与输出稳定性。三维间隔织物的结构、热流通道及温度响应性能见图4。

4 自供能智能服饰应用与多模态信号解耦

4.1 人体热能采集与低功耗供电

人体皮肤与环境之间的有效温差通常仅为数摄氏度，且随风速、服装层数、贴合状态和人体活动动态变化，因此可测试器件尺寸、实际温差、负

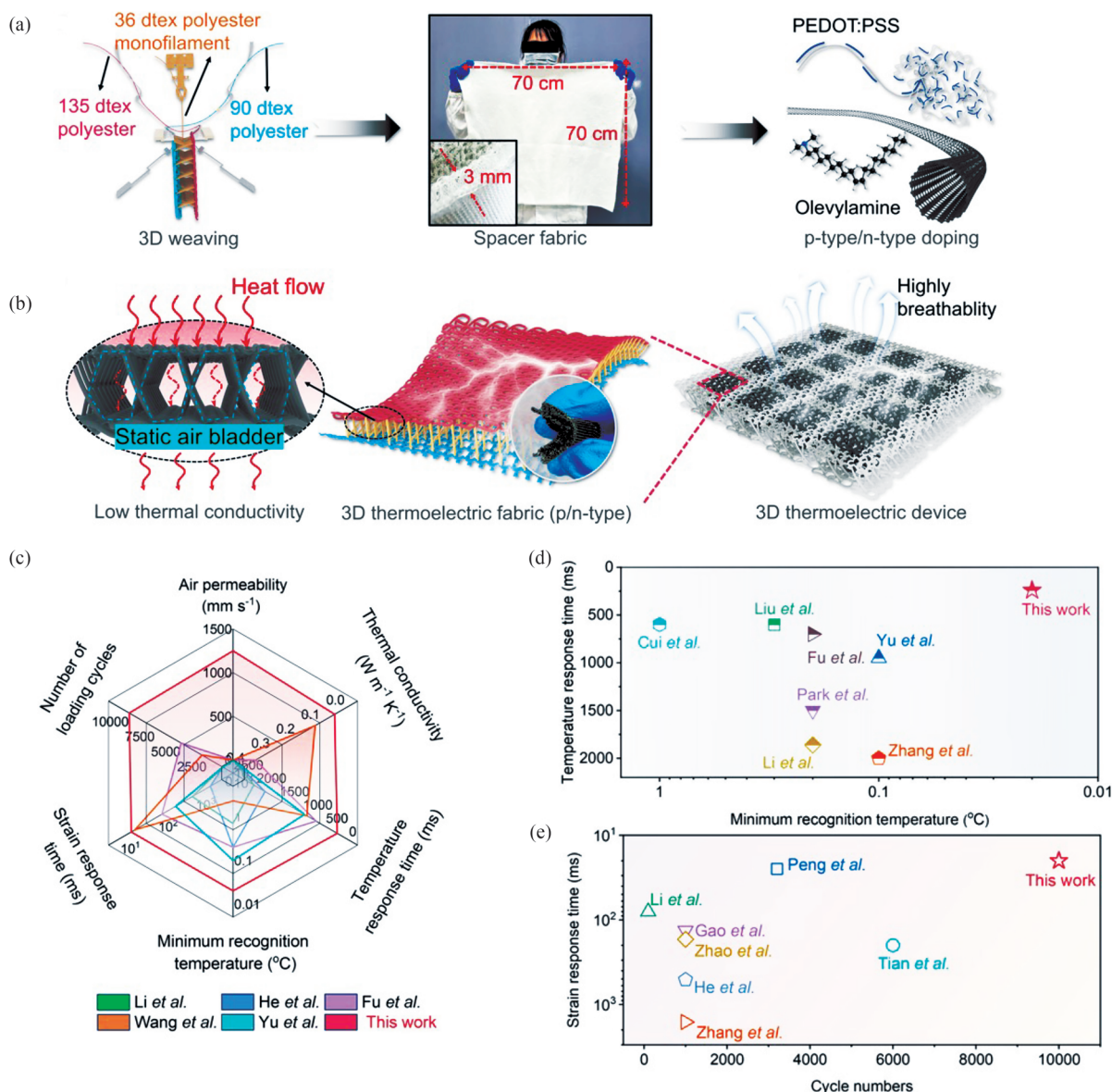


图4 三维热电织物的结构设计及热响应性能:(a)三维间隔织物的纱线组成、织造结构和PEDOT:PSS/油胺处理流程;(b)静态空气层降低寄生热传导并形成厚度方向热流通道;(c)三维热电织物与已有热电织物在透气性、柔性和温度识别性能等方面的对比;(d)最小温度识别能力与响应时间的比较;(e)弯折循环稳定性比较^[2] (2025 Springer Nature, CC BY-NC-ND 4.0 许可)

Figure 4 Structural design and thermal-response performance of three-dimensional thermoelectric fabrics: (a) Yarn composition, woven architecture and PEDOT:PSS/oleylamine treatment process; (b) Static air layer for reducing parasitic heat conduction and forming an out-of-plane heat-flow pathway; (c) Comparison with reported thermoelectric fabrics in air permeability, flexibility and temperature-recognition capability; (d) Comparison of minimum temperature recognition and response time; (e) Comparison of bending-cycle stability (Reproduced from Ref.[2] under the CC BY-NC-ND 4.0 license; Copyright (2025) Springer Nature)

载条件和输出功率。He等构建的三维p/n热电间隔织物依靠静态空气层维持厚度方向温差,在腕部穿戴、器件上下表面温差约8 K时产生稳定的5.44 mV输出^[2]。Sarabia-Riquelme等将n-PBDF纤维与p型PEDOT:PSS纤维刺绣为两对热电单元,在 $\Delta T = 22^{\circ}\text{C}$ 时获得2.40 nW输出功率^[32]。

上述结果表明,现阶段聚合物热电服饰更适合作为无源信号源、间歇式辅助电源或与储能和升压电路耦合的能量采集模块。

针对人体温差低、输出波动大的特点,热电单元可与柔性超级电容、微型电池及低静态功耗能量管理电路组合,通过电压积累和间歇释

放驱动传感或无线传输。此类系统的关键指标不只是开路电压,还包括匹配负载下的最大功率、启动温差、充电时间和穿戴状态下的输出保持率。

4.2 自供能温度、压力和运动传感

热电输出电压可直接表征温差,多孔复合材料和间隔织物在受压时还会改变热流路径、接触面积及电阻,从而实现温度-压力双模态感知^[19,20,28,29,40]。三维热电间隔织物的最小可识别温差为0.02 K,温度响应时间为240 ms,压缩响应时间为20 ms,并在超过10000次压缩循环及50%压缩应变下保持稳定;结合支持向量机后,其手势分类准确率达到100%。这些参数将材料热电响应具体转化为体温监测、动作识别和人机交互能力。

多模态器件的核心问题是温度、压力、湿度和运动形变引起的信号耦合。仅依赖后端算法会增加计算能耗并引入模型漂移,因此器件首先应利用独立热通道、机械敏感层和隔离层降低交叉敏感性,再采用低复杂度算法完成校准与分类。

结构解耦可将压阻层设置为主要响应外力的微结构机械感受层,将热电层布置于相对独立的厚度方向热通道,并利用柔性隔离层或空气间隙限制应力传递。该设计可降低压力形变对局部温差的扰动,同时抑制温度变化引起的压阻网络漂移。

面向服饰集成,可采用“分层感知-局部隔离-统一封装”结构:热电层采集温差信号,压阻层响应压力或运动,湿度层靠近皮肤布置但与热电臂隔离。前端结构降低交叉敏感性后,后端仅需完成校准与轻量化信号融合。三维热电织物在腕部、肘部和手指运动识别及人机交互中的应用见如图5所示。

4.3 个人热管理与局部温控

热电材料不仅能发电,也可在外加电流下通过珀尔帖效应实现局部冷却或加热。对于智能服饰,该功能可用于颈部、手腕、背部、运动恢复和伤口护理等局部温控场景^[1,5,11]。与大面积空调系统相比,热电服饰强调局部、即时和低功耗控制。

聚合物热电材料用于主动温控仍受较低制冷效率和柔性散热能力限制。器件温降取决于材料ZT、接触热阻、驱动电流和热端散热;散热结构过硬或过厚则会降低穿着舒适性。因此,局部温控应用需要联合设计热电层、柔性散热端、透气封装和

人体工学布置。典型聚合物热电织物器件的测试边界、输出能力、响应性能与可靠性参数见表3。

4.4 材料参数、器件性能与服饰应用的跨尺度关联

材料参数通过器件结构转化为服饰应用性能。塞贝克系数 S 决定单位温差产生的电压,电导率 σ 和器件内阻共同影响匹配负载下的输出功率,热导率 κ 及织物热流路径决定人体与环境之间的有效温差能否维持。因此,较高PF并不必然对应较高穿戴输出:若材料 κ 较高、界面接触热阻过大或织物产生热短路,作用于热电臂的实际温差仍会显著降低。三维间隔织物通过低于 $0.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的有效热导率和静态空气层维持厚度方向热梯度,使材料响应转化为0.02 K温差识别能力和稳定穿戴输出^[2]。

材料稳定性同样需要经由器件封装和纺织结构转化为服饰可靠性。PEDOT:PSS的PSS相吸水会引起电阻漂移,n型聚合物的掺杂态变化会降低长期输出;交联、界面增强和柔性封装能够抑制组分迁移及导电网络断裂,但过厚封装又会增加热阻并降低透气性。由此,材料层面的PF、ZT、湿热稳定性和力学性能,应与器件层面的有效温差、内阻、响应时间及循环保持率联合评价,并最终对应供能、健康监测、动作识别或局部温控等具体服饰功能。

5 服饰级可靠性评价

服饰级评价需将材料PF和ZT进一步转化为低温差输出、水洗、机械循环、汗液稳定性及皮肤接触安全性等可量化指标。

5.1 基于ISO 6330的水洗耐久性评价

智能服饰在实际使用中不可避免地经历家庭洗涤。ISO 6330:2021规定了纺织品测试用家庭洗涤和干燥程序,可为热电织物耐洗评价提供标准化依据^[41]。对于PEDOT:PSS、CNT/聚合物复合物和印刷热电织物,耐洗性评价包括洗涤程序、洗涤剂、温度、机械作用、干燥方式、循环次数、电阻变化率和输出保持率^[41]。

PEDOT:PSS涂层的水洗失效主要来自PSS吸水溶胀、界面脱黏和导电网络断裂。等离子体活化、交联和柔性保护层可改善耐洗性^[24,25]。

5.2 机械耐久性与汗液稳定性

服饰中的热电单元会持续经历弯折、拉伸、

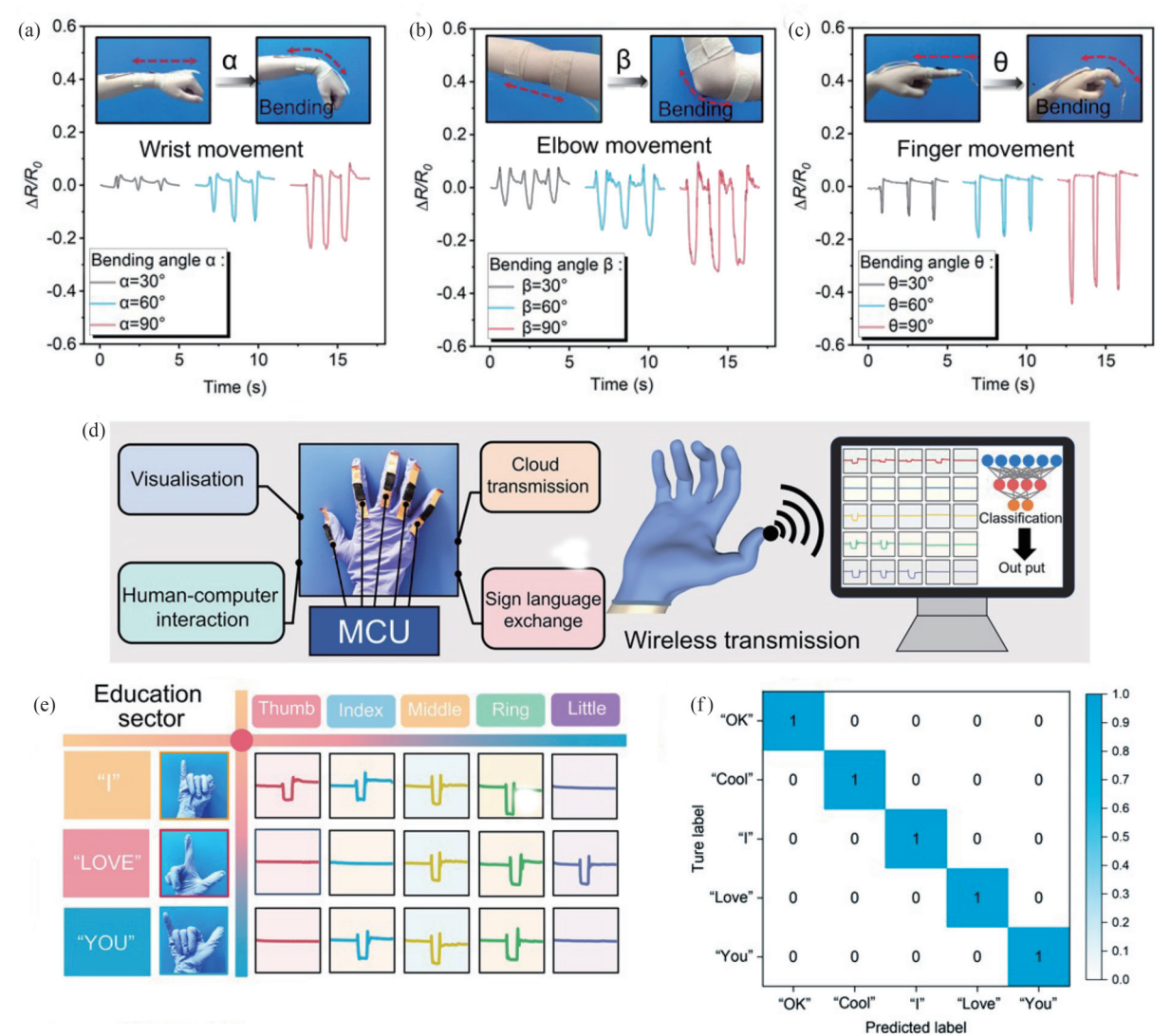


图 5 三维热电织物在肢体运动识别和人机交互中的应用示例:(a)腕部弯曲角度识别;(b)肘部弯曲角度识别;(c)手指弯曲角度识别;(d)基于手套的无线人机交互系统;(e)手势信号与字母/词语识别示例;(f)手势识别混淆矩阵^[2] (2025 Springer Nature, CC BY-NC-ND 4.0 许可)

Figure 5 Application examples of three-dimensional thermoelectric fabrics in limb-motion recognition and human-computer interaction: (a) Wrist bending-angle recognition; (b) Elbow bending-angle recognition; (c) Finger bending-angle recognition; (d) Glove-based wireless human-computer interaction system; (e) Examples of gesture signals for letter/word recognition; (f) Confusion matrix of gesture recognition (Reproduced from Ref.[2] under the CC BY-NC-ND 4.0 license; Copyright (2025) Springer Nature)

表 3 典型聚合物热电织物器件的应用性能参数					
Table 3 Application-level performance metrics of representative polymer thermoelectric textile devices					
器件体系	测试边界	输出能力	响应与识别性能	可靠性	应用指向
三维 p/n 热电间隔织物 ^[2]	腕部穿戴; $\Delta T \approx 8\text{ K}$	稳定输出 5.44 mV	最小识别温差 0.02 K; 温度响 应 240 ms; 压缩响应 20 ms; 手 势分类准确率 100%	>1 万次压缩循环; 50% 压缩应 变下稳定; 可洗	体温监测、动作 识别、人机交互
n-PBDF/PEDOT:PSS 两 对纤维器件 ^[32]	$\Delta T = 22\text{ }^\circ\text{C}$	输出功率 2.40 nW	未报告	n-PBDF 纤维在 80% 湿度空气 放置 14 d 后电导率保持 81%	全聚合物纺织 能量采集
SWCNT/PEDOT:PSS/SA 纱线器件 ^[26]	加热端 100 $^\circ\text{C}$	两根纱线输 出 0.21 mV	未报告	拉伸强度 151 MPa; 断裂应变 12.7%	可编织热电纱 线与穿戴传感

压缩、扭转和摩擦。机械可靠性评价应关注弯折半径、循环次数、拉伸应变、压缩载荷以及电阻或输出保持率。对于纤维和纱线型器件，还需考虑织造、针织、缝纫或刺绣过程对导电网络和p/n热电连接的影响。

汗液环境会进一步加速材料和界面失效。人工汗液中的盐分、乳酸和尿素可能改变导电聚合物掺杂态，并促进界面剥离或组分迁移。对于n型聚合物和无机/高分子复合材料，汗液稳定性评价还应关注掺杂态保持、金属或半导体组分析出以及封装完整性。

5.3 基于ISO 10993的生物相容性风险评价

长期贴肤穿戴要求材料具有明确的皮肤接触安全性。对于接触完整皮肤且可能连续穿戴超过24 h的电子服饰，可依据材料接触时间、接触面积和可浸提物风险开展生物相容性评价。皮肤接触聚合物材料研究表明，细胞相容性、表面形貌和材料浸提物是判断贴肤安全性的重要依据^[40]。对于热电智能服饰，残留溶剂、掺杂剂、交联剂和无机微纳组分的潜在释放是影响贴肤安全性的主要风险来源。

亲肤隔离层可降低皮肤曝露风险，但其设计不能仅强调化学屏障作用，还应兼顾透湿性、柔软性、耐洗性和热阻控制。由此，生物相容性评价应与材料封装、热流传输和服饰舒适性共同考虑。

5.4 动态微气候与系统输出评价

人体热能采集可在包含温度、湿度、风速、运动和出汗模拟的动态微气候中评价，并同步记录热流、有效温差和电输出，以确定器件在真实穿戴边界下的输出稳定性。面向自供能智能服饰的主要失效原因、参考测试方法汇总见表4。

6 关键问题与发展趋势

6.1 从单一性能指标转向综合服饰性能

聚合物热电服饰的性能评价可从PF或ZT等单一材料指标，拓展为涵盖材料输运、器件输出和穿戴可靠性的综合评价体系。较高PF有利于提升材料电输运能力，但真实穿戴输出还受到有效温差、器件内阻、界面接触热阻、封装厚度和织物热流路径影响。因此，服饰应用需要建立“材料参数-器件输出-穿戴可靠性”的综合评价框架，将PF、ZT、低温差输出、响应时间、机械循环、水洗耐久、汗液稳定性、透气性和生物相容性纳入

表4 面向自供能智能服饰的可靠性测试
Table 4 Reliability tests and engineering constraints for self-powered smart clothing

评价维度	主要失效原因	参考测试方法
水洗耐久性	PSS溶胀、涂层脱落、导电网络断裂	ISO 6330: 2021 家庭洗涤和干燥程序; 记录循环次数、电阻变化率和输出保持率
机械耐久性	弯折和拉伸导致裂纹、界面剥离和互连失效	弯折半径、循环次数、拉伸应变、压缩载荷及电输出同步测试
汗液稳定性	盐分和酸性组分改变掺杂态或造成组分析出	人工汗液浸泡; 输出、电阻、形貌和化学组分测试
生物相容性	残留溶剂、交联剂、掺杂剂或无机颗粒接触皮肤	ISO 10993 风险评估; 细胞毒性、刺激和致敏评价
动态微气候	运动、风速和出汗导致温差波动	环境舱、红外热像、热流计和电输出同步测试
多模态解耦	温度、压力、湿度和运动信号耦合	多物理场加载; 分层结构响应和低功耗算法验证

统一比较。
6.2 n型聚合物仍是全聚合物热电服饰的关键变量

PBFDO等n型聚合物的发展提高了全聚合物p/n热电器件的可行性，但其服饰化应用仍受掺杂态稳定、空气氧化、汗液耐受、水洗保持和长期弯折可靠性限制。与p型PEDOT体系相比，n型聚合物在纤维化、织物集成和环境稳定性方面仍缺乏系统数据。后续研究需要从薄膜导电性评价拓展到服饰可靠性评价，重点关注掺杂剂固定、界面封装、p/n分区保护和水洗后性能保持。

6.3 热流管理是提升真实穿戴输出的核心路径

人体热电服饰的输出由材料性能和有效温差共同决定。由于人体与环境之间的温差较小，并且容易受到风速、出汗、服装层叠和贴合状态等影响，单纯提高材料PF或ZT并不一定能够带来更高系统输出。三维间隔层、局部隔热、导热通道和冷端散热可改善织物内部热流分布，使更多温差作用于热电臂。未来聚合物热电服饰的结构设计应从材料优化进一步扩展到热流路径、服装版型和动态微气候的协同调控。

7 结论

聚合物热电材料为自供能智能服饰提供了兼具柔性、可加工性和低热导率的材料基础。PEDOT:PSS体系在p型热电单元中最成熟，但其

性能提升应从二次掺杂扩展到多胺去掺杂、费米能级调控和链段重构。聚合物/碳基复合体系不应只强调导电网络,还应通过界面能量过滤缓解塞贝克系数与电导率之间的矛盾。PBFDO类n型聚合物正在通过原位掺杂和异构化缺陷抑制突破传统n型材料稳定性瓶颈。PMHJ和纳米黏结剂等前沿设计则为热-电解耦和大面积柔性制备提供了新思路。

然而,智能服饰不是简单的柔性热电器件。其应用成败取决于材料输运、织物结构、人体微气候、水洗耐久性、机械可靠性和皮肤安全性的系统协同。未来研究应减少单纯追逐高PF或高ZT,更多面向真实穿戴场景建立标准化测试和结构设计方法。只有将分子尺度的掺杂与界面机制、介观尺度的热-电-力耦合结构和宏观尺度的服饰工程标准结合起来,聚合物热电材料才能真正进入下一代自供能智能服饰。

参考文献

- Yang, Y.; Li, H.; Xu, Z.; Luo, S. Y.; Chen, L. D. Wearable self-powered devices based on polymer thermoelectric materials. *Moore More*, **2025**, 2(1), 4.
- He, X. Y.; Shi, X. L.; Wu, X. Y.; Li, C. Z.; Liu, W. D.; Zhang, H. H.; Yu, X. L.; Wang, L. M.; Qin, X. H.; Chen, Z. G. Three-dimensional flexible thermoelectric fabrics for smart wearables. *Nat. Commun.*, **2025**, 16, 2523.
- 王子洵, 魏传辉, 吕天梅, 王佩红, 董凯. 自供电可穿戴智能纺织品研究进展. *纺织工程学报*, **2023**, 1(6), 35–53.
- 王思远, 王军. 柔性电子材料在可穿戴设备中的研究进展. *纺织导报*, **2024**, (3), 51–55.
- 郑园园, 韩雪, 景媛媛, 陈馨逸, 张坤. 纺织结构热电器件的设计制备及应用. *纺织高校基础科学学报*, **2022**, 35(1), 34–47.
- Suarez, F.; Nozariasbmarz, A.; Vashae, D.; Öztürk, M. C. Designing thermoelectric generators for self-powered wearable electronics. *Energy Environ. Sci.*, **2016**, 9(6), 2099–2113.
- Chen, X. Y.; Yang, X. N.; Han, X.; Ruan, Z. P.; Xu, J. C.; Huang, F. L.; Zhang, K. Advanced thermoelectric textiles for power generation: principles, design, and manufacturing. *Glob. Chall.*, **2024**, 8(2), 2300023.
- 许子傲, 吴雅梦, 郭浩, 俞建勇, 丁彬, 李召岭. 纤维基摩擦纳米发电机的构建及其在可穿戴技术领域的研究进展. *纺织工程学报*, **2023**, 12(6), 71–85.
- Russ, B.; Glauddell, A.; Urban, J. J.; Chabiny, M. L.; Segalman, R. A. Organic thermoelectric materials for energy harvesting and temperature control. *Nat. Rev. Mater.*, **2016**, 1, 16050.
- Chen, W. Y.; Shi, X. L.; Li, M.; Liu, T.; Mao, Y. Q.; Liu, Q. Y.; Dargusch, M.; Zou, J.; Lu, G. Q. M.; Chen, Z. G. Nanobinders advance screen-printed flexible thermoelectrics. *Science*, **2024**, 386(6727), 1265–1271.
- 郭凯, 骆军, 赵景泰. 热电材料的基本原理、关键问题及研究进展. *自然杂志*, **2015**, 37(3), 175–187.
- 黄轩, 刘卓鑫, 刘福生, 陈光明. 聚(3,4-乙烯二氧噻吩): 聚苯乙烯磺酸盐热电性能的提升策略研究进展. *高分子学报*, **2021**, 52(4), 339–349.
- Wang, D. Y.; Ding, J. M.; Ma, Y. Q.; Xu, C. L.; Li, Z. Y.; Zhang, X.; Zhao, Y.; Zhao, Y.; Di, Y. Q.; Liu, L. Y.; Dai, X. J.; Zou, Y.; Kim, B.; Zhang, F. J.; Liu, Z. T.; McCulloch, I.; Lee, M.; Chang, C.; Yang, X.; Wang, D.; Zhang, D. Q.; Zhao, L. D.; Di, C. A.; Zhu, D. B. Multi-heterojunctioned plastics with high thermoelectric figure of merit. *Nature*, **2024**, 632(8025), 528–535.
- 钱伯章. 我国科学家研制出高性能塑料基热电材料. *合成材料老化与应用*, **2024**, 53(5), 87.
- Luan, Y. D.; Liao, J. Q.; Cui, W.; Wang, X. Y.; Dai, T. Y.; Wang, S. J.; Liu, X. Y.; Chen, S.; Hou, B. M.; Ye, F.; Zhang, R. M.; Ye, F.; Zhang, R.; Ding, R.; Li, J.; Guo, Z. H. Elemental sulfur mediated one-pot synthesis of poly(benzodifurandione) (PBFDO) with high conductivity for organic electronics. *ChemRxiv*, **2026**, DOI: 10.26434/chemrxiv.15000671/v2.
- Hwang, J.; Zhao, Q. Y.; Ahmed, M.; Yakisan, A. C.; Espenship, M. F.; Laskin, J.; Savoie, B. M.; Mei, J. G. Reductive doping inhibits the formation of isomerization-derived structural defects in N-doped poly(benzodifurandione) (n-PBDF). *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2024**, 63(18), e202401465.
- Floris, P. S.; Zozoulenko, I.; Rurali, R. Doping efficiency of poly(benzodifurandione) from first principles. *J. Phys. Chem. C*, **2025**, 129(9), 4354–4357.
- Yemata, T. A.; Kyaw, A. K. K.; Zheng, Y.; Xu, J. W.; Chin, W. S.; Zhu, Q.; Hayashi, Y. Interface engineering in polymer thermoelectric composites: harnessing energy-filtering effects to overcome the seebeck-conductivity trade-off. *J. Mater. Chem. A*, **2025**, 13(42), 35976–35998.
- Wang, Y.; Zhang, Q. C.; Zhang, Z. D. Dual-mode textile sensor based on PEDOT:PSS/SWCNTs composites for pressure-temperature detection. *Micromachines*, **2025**, 16(1), 92.
- Ji, J.; Luo, H. Y.; Su, J. T.; Wang, S. H.; Chen, X. D.; Song, J. Z. Multisensory electronic skin with decoupled pressure-temperature-sensing capabilities for similar

- object recognition. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **2025**, 122(41), e2519693122.
- 21 朱诗倩, 谈伊妮, 刘晓刚. 柔性复合导电纤维在智能纺织品中的研究进展. *现代纺织技术*, **2022**, 30(4), 1–11.
- 22 Bubnova, O.; Khan, Z. U.; Malti, A.; Braun, S.; Fahlman, M.; Berggren, M.; Crispin, X. Optimization of the thermoelectric figure of merit in the conducting polymer poly(3,4-ethylenedioxythiophene). *Nat. Mater.*, **2011**, 10(6), 429–433.
- 23 Ryan, J. D.; Mengistie, D. A.; Gabrielsson, R.; Lund, A.; Müller, C. Machine-Washable PEDOT:PSS dyed silk yarns for electronic textiles. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2017**, 9(10), 9045–9050.
- 24 Tseghai, G. B.; Mengistie, D. A.; Malengier, B.; Fante, K. A.; van Langenhove, L. PEDOT: PSS-based conductive textiles and their applications. *Sensors*, **2020**, 20(7), 1881.
- 25 Adamu, M.; Nadeem, M.; Hasnain, M.; Ullah, A.; Afzal, T.; Fan, N.; Bao, Y. R.; Jiao, F. Enhanced thermoelectric performance of PEDOT: PSS/SWCNT/PDDA three-component composite films. *RSC Adv.*, **2025**, 15(58), 50142–50150.
- 26 Uchida, K.; Shinozaki, Y.; Nakayama, H.; Ochiai, S.; Nakazawa, Y.; Takashiri, M. SWCNT/PEDOT: PSS/SA composite yarns with high mechanical strength and flexibility via wet spinning for thermoelectric applications. *Sensors*, **2025**, 25(19), 6202.
- 27 Liu, S. Q.; Zhang, M. X.; Kong, J. H.; Li, H.; He, C. B. Flexible, durable, green thermoelectric composite fabrics for textile-based wearable energy harvesting and self-powered sensing. *Compos. Sci. Technol.*, **2023**, 243, 110245.
- 28 Gao, X. Z.; Gao, F. L.; Liu, J.; Li, Y. J.; Wan, P. B.; Yu, Z. Z.; Li, X. F. Self-powered resilient porous sensors with thermoelectric poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrenesulfonate) and carbon nanotubes for sensitive temperature and pressure dual-mode sensing. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2022**, 14(38), 43783–43791.
- 29 Li, M. F.; Chen, J. X.; Zhong, W. B.; Luo, M. Y.; Wang, W.; Qing, X.; Lu, Y.; Liu, Q. Z.; Liu, K.; Wang, Y. D.; Wang, D. Large-area, wearable, self-powered pressure-temperature sensor based on 3D thermoelectric spacer fabric. *ACS Sens.*, **2020**, 5(8), 2545–2554.
- 30 马珮珮, 李龙, 吴磊. 导电纱线的制备及其在智能可穿戴装置中的应用研究进展. *材料工程*, **2021**, 49(10), 31–42.
- 31 Darabi, S.; Yang, C. Y.; Li, Z. R.; Huang, J. D.; Hummel, M.; Sixta, H.; Fabiano, S.; Müller, C. Polymer-based n-type yarn for organic thermoelectric textiles. *Adv. Electron. Mater.*, **2023**, 9(4), 2201235.
- 32 Sarabia-Riquelme, R.; Noble, L. E.; Alarcon Espejo, P.; Ke, Z. F.; Graham, K. R.; Mei, J. G.; Paterson, A. F.; Weisenberger, M. C. Highly conductive n-type polymer fibers from the wet-spinning of n-doped PBDF and their application in thermoelectric textiles. *Adv. Funct. Mater.*, **2024**, 34(9), 2311379.
- 33 孙敏, 路旭, 袁刚, 曹津维, 卢荣泰, 唐国武, 陈东丹, 钱奇. 微纳热电纤维的研究进展. *激光与光电子学进展*, **2023**, 60(13), 1316012.
- 34 Kim, Y.; Lund, A.; Noh, H.; Hofmann, A. I.; Craighero, M.; Darabi, S.; Zokaei, S.; Park, J. I.; Yoon, M. H.; Müller, C. Robust PEDOT: PSS wet-spun fibers for thermoelectric textiles. *Macromol. Mater. Eng.*, **2020**, 305(3), 1900749.
- 35 Deng, Y. Y.; Shi, X. L.; Wu, T.; Yue, Y. C.; Liu, W. D.; Li, M.; Yue, F.; Huang, P.; Liu, Q. F.; Chen, Z. G. Optimization of wet-spun PEDOT: PSS fibers for thermoelectric applications through innovative triple post-treatments. *Adv. Fiber Mater.*, **2024**, 6(5), 1616–1628.
- 36 Ding, T. P.; Chan, K. H.; Zhou, Y.; Wang, X. Q.; Cheng, Y.; Li, T. T.; Ho, G. W. Scalable thermoelectric fibers for multifunctional textile-electronics. *Nat. Commun.*, **2020**, 11, 6006.
- 37 He, X. Y.; Gu, J. T.; Hao, Y. N.; Zheng, M. R.; Wang, L. M.; Yu, J. Y.; Qin, X. H. Continuous manufacture of stretchable and integratable thermoelectric nanofiber yarn for human body energy harvesting and self-powered motion detection. *Chem. Eng. J.*, **2022**, 450, 137937.
- 38 Jing, Y. Y.; Luo, J.; Han, X.; Yang, J. W.; Liu, Q. L.; Zheng, Y. Y.; Chen, X. Y.; Huang, F. L.; Chen, J. W.; Zhuang, Q. L.; Shen, Y. N.; Chen, H. S.; Zhao, H. Z.; Snyder, G. J.; Li, G. D.; Zhang, T.; Zhang, K. Scalable manufacturing of a durable, tailorable, and recyclable multifunctional woven thermoelectric textile system. *Energy Environ. Sci.*, **2023**, 16(10), 4334–4344.
- 39 Cao, Z.; Koukharenko, E.; Tudor, M. J.; Torah, R. N.; Beeby, S. P. Screen printed flexible Bi₂Te₃-Sb₂Te₃ based thermoelectric generator. *J. Phys. Conf. Ser.*, **2013**, 476(1), 012031.
- 40 朱国建, 陈爱英, 王冉冉, 孙静. 用于人体健康监测的可穿戴传感器件研究进展. *分析化学*, **2022**, 50(11), 1673–1684.
- 41 ISO 6330:2021. Textiles—Domestic washing and drying procedures for textile testing [S]. Geneva: International Organization for Standardization, **2021**.