• 专题一：双清论坛“ 面向未来的智能材料物质科学 ” •
DOI: 10.3724/BNSFC-2025.03.19.0002

智能纤维材料与器件*

虞思汇 江海波 唐成强 宋佳恬 郑园园
朱正峰 李天睿 姜 怡 张松林** 孙雪梅**

复旦大学 聚合物分子工程全国重点实验室/高分子科学系/纤维电子材料与器件研究院，上海 200438

[摘 要] 智能纤维器件作为新一代电子器件的重要组成部分，已成为多学科交叉研究领域的前沿方向，在智能交互、能源革新和医疗健康等领域展现出广阔的应用前景。随着该领域的不断发展，现有的纤维材料、器件结构及制备工艺已难以满足尖端应用日益增长的性能需求。因此，亟需面向前沿领域开展纤维材料与器件结构的协同设计。本文以“材料—原理—器件—应用”为组织框架，系统综述了智能纤维材料（包括金属材料、高分子材料与碳纳米材料）及其相关智能纤维器件（涵盖传感检测、能量转化、能量储存与发光显示）在材料与结构设计、性能优化、连续化制备工艺以及前沿应用方面的最新研究进展。最后，结合新兴材料研究方法及智能织物生态系统的构建需求，展望了智能纤维及器件领域的未来发展与关键研究方向。

[关键词] 智能纤维材料；纤维器件；可穿戴；纤维锂离子电池；可植入传感；织物显示

纵观人类文明发展史，纤维材料的创新始终引领着技术革命：从新石器时代天然植物纤维的编织，到19世纪金属纤维驱动的电气化革命，再到20世纪光纤技术奠基的信息时代，材料形态的不断演变深刻重塑了生产力格局。如今，随着化学合成和纳米技术的迅速发展，纤维材料的功能应用不仅突破了传统的力学载体，还被赋予了能量转化、能量储存、信息感知与显示等多种智能特性。复旦大学团队率先提出了纤维电子学概念，并构建出20余种功能纤维器件，涵盖传感、发电、储能、显示等领域。这些器件在继承传统纤维柔韧性与舒适性的同时，还展现出智能化、集成化与多功能化的特点，能够满足现代社会对智能设备的需求。当前，智能纤维器件凭借其独特优势，正迅速向人机交互、智能诊疗及国防装备等战略领域拓展，逐渐成为新一代电子产品的重要组成部分。但是，现有纤维材料尚不能完全满足尖端领域所提出的性能需求，而智能纤维器件也亟需进一步综合材料与结构设计，以应用导向解决重大前沿挑战。本文将从智能纤维材料入手，详细介绍传感纤维、能量转化纤维、能量储存纤维及纤维显示器件的发展历程、关键技术与前沿应用，探讨其在各领域的应用实例，分析优势与局限，并展望未来智能纤维材料及器件的发展趋势，为推动纤维器件的进一步研究和产业化应用提供参考。

1 智能纤维材料

智能纤维材料作为纤维器件的核心基石，其材料特性直接决定了器件整体性能。为了满足高导电性、高柔性及优异电化学活性等要求，须在材料组分与结构设计上实现精准平衡（图1）。当前，研究者不仅关注单一材料的固有性能，更致力于通过多功能组分的复合协同优化，兼顾电导率、力学强度、柔性和生物相容性等关键指标。智能纤维器件在实际应用中需适应复杂环境和长期动态应力，对材料的耐久性和环境适应性提出了很高要求。金属、聚合物和碳纳米材料等都被引入智能纤维

收稿日期：2025-03-19；修回日期：2025-04-20
* 本文根据国家自然科学基金委员会第391期“双清论坛”讨论的内容整理。
** 通信作者，Email：sunxm@fudan.edu.cn；zhangsonglin@fudan.edu.cn
本文受到国家自然科学基金项目（L2424206，T2321003）的资助。

引用格式：虞思汇, 江海波, 唐成强, 等. 智能纤维材料与器件. 中国科学基金, 2025, 39(3): 408–418.
Yu SH, Jiang HB, Tang CQ, et al. Intelligent fiber materials and devices. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(3): 408–418. (in Chinese)

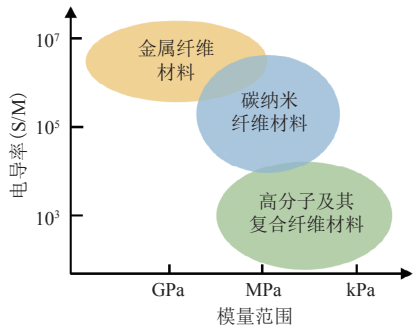


图1 不同纤维材料的导电性与模量之间的关系示意图
Fig.1 A Schematic Diagram Illustrating the Relationship between the Conductivity and Modulus of Different Fiber Materials

器件,并通过结构设计、表面修饰及多层次组装等方法,实现了高柔性、高效电荷传输及高电化学反应速率等性能。本节介绍智能纤维电极材料的基本特性、制备工艺及其在柔性电子、能量存储与转换、传感检测和生物医疗等领域中的应用优势。

1.1 金属纤维材料

金属纤维作为最早应用于导电纤维领域的材料之一,因其成熟的制备工艺、丰富的原材料以及较低成本而受到广泛关注。传统金属(如金、银、铜、钛等)凭借其高电导率,有效降低了器件内部阻抗,促进了电荷传输和电化学反应动力学,是实现高效能器件设计的常用材料。然而,金属纤维通常质量较大、刚性较大,在长期使用中易产生内部应力,导致器件疲劳断裂,从而限制了其在动态及柔性场景中的应用。为克服这一缺陷,研究者提出了多种改进策略:一方面,利用金属纳米材料的自组装技术构建出兼具轻量化、高柔性、高电导率的新型纳米金属纤维材料。例如,利用银纳米线水分散液在饱和硫酸铵溶液中进行溶液纺丝,并经过化学焊接形成宏观银纳米线纤维,其模量低至75 MPa,同时保持了与原始水平相当的电导率,可以满足高精度生物信号检测[1]。另一方面,还可以向其他新兴金属元素发展,如将液态金属(镓铟合金等)灌注于柔性中空管道中,得到可任意弯折的金属基智能纤维材料,可用于制备食管压力传感器,其具有良好的精度与工作稳定性,可实现对消化道剧烈运动的动作捕捉[2]。除此之外,还可以向金属杂化纳米材料方面发展,如通过引入铵根离子可以将MXene薄片制备为连续纤维,其优异的电热学性能及力学性能具有广泛的应用前景。

1.2 高分子纤维材料

常规高分子纤维材料通常不具备导电性,难以直接满足智能纤维器件对高导电性的要求。为此,研究者在纤维表面采用涂膜、溅射、蒸镀、原位合成等手段修饰导电高分子、碳纳米材料、金属涂层或金属纳米粒子等导电材料,通过复合手段对高分子纤维进行改性,在保持原有力学性能的同时显著提升其导电能力[3]。例如,利用多步浸涂工艺在尼龙纤维表面涂覆具有多孔结构的碳纳米管浆料,制备了超稳态纤维超级电容器,其中尼龙纤维内核为整体器件提供了稳定的机械性能。在非导电性聚合物的改性上,新兴材料正在不断涌现,如新型金属主链高分子在能量吸收和热电转换方面也显示出良好应用前景,可以在与通用聚合物织物基底复合后用于电磁屏蔽[4]。除了对非导电的聚合物进行改性之外,还可以直接利用导电聚合物,采用溶液纺丝、静电纺丝等技术制备导电高分子纤维(如PEDOT纤维、聚吡咯纤维等),其制备过程简单,易于大规模生产。如PEDOT纤维具有极佳的柔性,在植入脑内后可以随大脑共同运动,避免了传统刚性神经电极对大脑的损伤。此外,还可以调控纤维间相互作用,制备水凝胶纤维材料,实现可调离子电导,并得到与脆弱的生物组织匹配性极佳的生物—电子界面[5]。来源于生物质基的高分子材料因其来源广泛、经济环保而得到广泛关注。如竹质、木质纤维素具有高度可加工性,在与氮化硼复合后可以经由3D打印制备高度可调、功能多样的纤维材料[6,7],源自竹材料的高强度纤维素材料的拉伸强度可达1.9 GPa[8]。

1.3 碳纳米纤维材料

碳纳米纤维材料如石墨烯纤维、碳纳米管纤维等因其优异的力学和电学性能,在智能纤维器件中占据着不可替代的重要地位。石墨烯纤维通常采用湿法纺丝技术制备氧化石墨烯纤维,随后经过还原处理得到还原氧化石墨烯纤维。其多孔轻质结构不仅提升了作为超级电容器和柔性电池的能量存储效率,同时也改善了智能织物的柔韧性和耐用性。相比直接分散的石墨烯材料,石墨烯纤维在加工和集成方面更为便捷。碳纳米管纤维主要使用气相浮动纺丝、阵列纺丝、湿法纺丝等途径制备[9],其兼具低密度、高电导性、优异力学性能和良好生物相容性。得益于多重优异性能,碳纳米管纤维已被应用于纤维电池的电极材料、纤维生物传感器的导电基底及变色纤维的导电内芯。更进一步地,得益于碳纳米管微观层面的纳米取向结构,碳纳米管纤维还可作为良好的生物材料用作人工韧带,展现出比现有高分子基人工韧带与骨组织更强的整合能力[10,11]。碳纳米管纤维在酸处理后还可以得到超高模量材料,从而有望应用于航空航天等特殊场景中;其大比表面积也有利于电荷的快速注入,可以被用于制备快速响应并大幅运动的人工肌肉。

2 智能纤维器件

在根据具体应用场景灵活选用合适的智能纤维材料之外,还需要设计契合使用场景的器件结构。相比传统平面块体器件,具有独特一维结构的纤维器件可更灵活地应用于智能生活的各个方面。经过十余年的发展,智能纤维器件已在多个领域取得了系列成果。在医疗健康领域,智能纤维传感器可实时监测生理信号,为疾病预防、诊断、治疗提供支持;在能源领域,智能纤维通过集成能量转换技术与高性能储能材料,实现了能量的高效转化和储存;而在电子信息领域,智能纤维显示器件具有轻薄透气、任意弯折的优异性能,为未来穿戴设备提供了全新的解决方案。迅速、稳定的电荷传输过程是电子器件不可或缺的重要保障,本节从结构设计对电荷传输过程的影响开始,依次讨论纤维传感器件、纤维光伏器件、纤维储能器件及织物显示器件的关键技术突破及前沿应用。

2.1 纤维器件的组装结构

纤维器件的单维结构使其在电荷传输路径上与传统平面器件存在显著差异。为实现器件稳定高效的电荷传输及长期稳定运行,智能纤维器件主要采用同轴、平行、对绞和交织四种组装方式(图2)。

同轴结构:以纤维电极为基底,从内向外依次涂覆各功能活性材料,形成紧密稳定的界面,有利于电荷的快速传递。该结构不仅在能量储存、能量转化、传感和显示器件中得到广泛应用,而且适合挤出、浸涂等大规模制备技术,是实现智能纤维器件商业化的重要途径。

平行结构:通常应用于由双电极构成的储能或光伏器件,通过在两根平行电极之间引入液体或凝胶电解质,实现稳定电荷传输,其结构稳定且工艺简单,为大规模生产提供了有效途径。

对绞结构:由若干纤维电极按特定角度和螺距交织而成,虽各功能层接触面积较小,但适用于多组纤维电极协同工作的场景,如三电极纤维电化学传感器或由不同功能纤维构成的多功能传感器。该结构可以提升器件整体稳定性。

交织结构:以两根纤维电极的交叉点为基本功能单元,通过针织、机织或梭织等多种编织方法实现发光、显示等多种功能;同时通过调控纤维材料的种类、直径和表面功能,可实现性能的高度可调性,特别适合大规模生产智能织物系统。

2.2 纤维传感器件

人体活动的本质是化学能与机械能的动态耦合过程。在临床医学层面,关键生物标记物(如神经递质、细胞因子、代谢小分子)的原位实时监测是推动精准医疗从"组学分析"迈向"动态干预"的核心;在健康管理领域,现有传感器虽在糖尿病、心血管疾病等慢病监测中取得初步应用,却受限于刚性器件与生物组织的力学失配(模量差异达3~5个数量级),难以实现深部组织(如脑、心脏)的多参数同步感知。针对上述局限,纤维传感器可以实现与软组织的力学适配(模量匹配至千帕级),并与动态组织形成共形接触,从而在深部组织内实现多物理化学信号的原位监测。

对物理参数的检测依赖传感单元对外界环境刺激的响应。通过电极结构的拓扑优化设计,物理参数(如应变、压力、温度等)可被转化为电阻或电容变化(图3A)。在生物标记物检测方面以电化学传感为核心,当待测物质与活性物质发生特异性反应时,界面电荷分布或电流通量随之改变,从而将化学信息转化为电信号(图3B)。

在可穿戴纤维传感器领域,传感对象主要涵盖身体运动、温度、电信号及生化指标等多维生理参数。在压力传感方面,同轴结构电容式纤维传感器展现了优异的

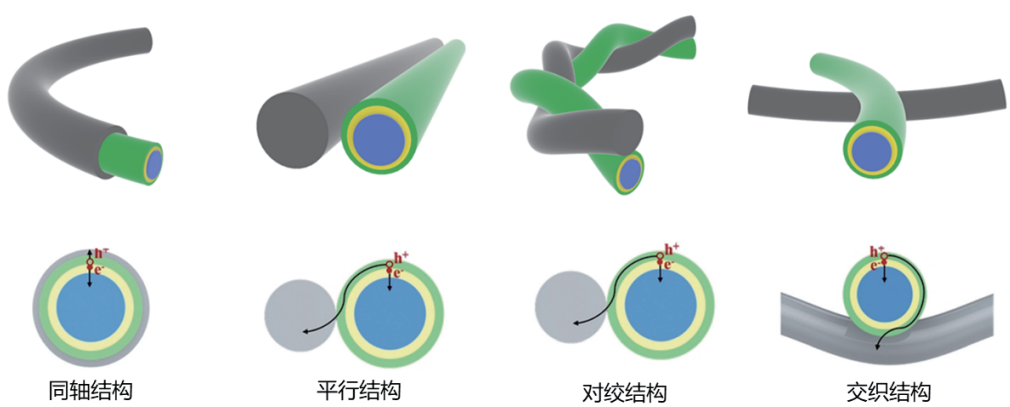


图2 纤维器件的不同组装结构,包括同轴结构、平行结构、对绞结构和交织结构[12]

Fig.2 Different Assembly Structures of Fiber Devices,Including Coaxial Structure,Parallel Structure,Twisted Structure,and Intertexture Structure[12]

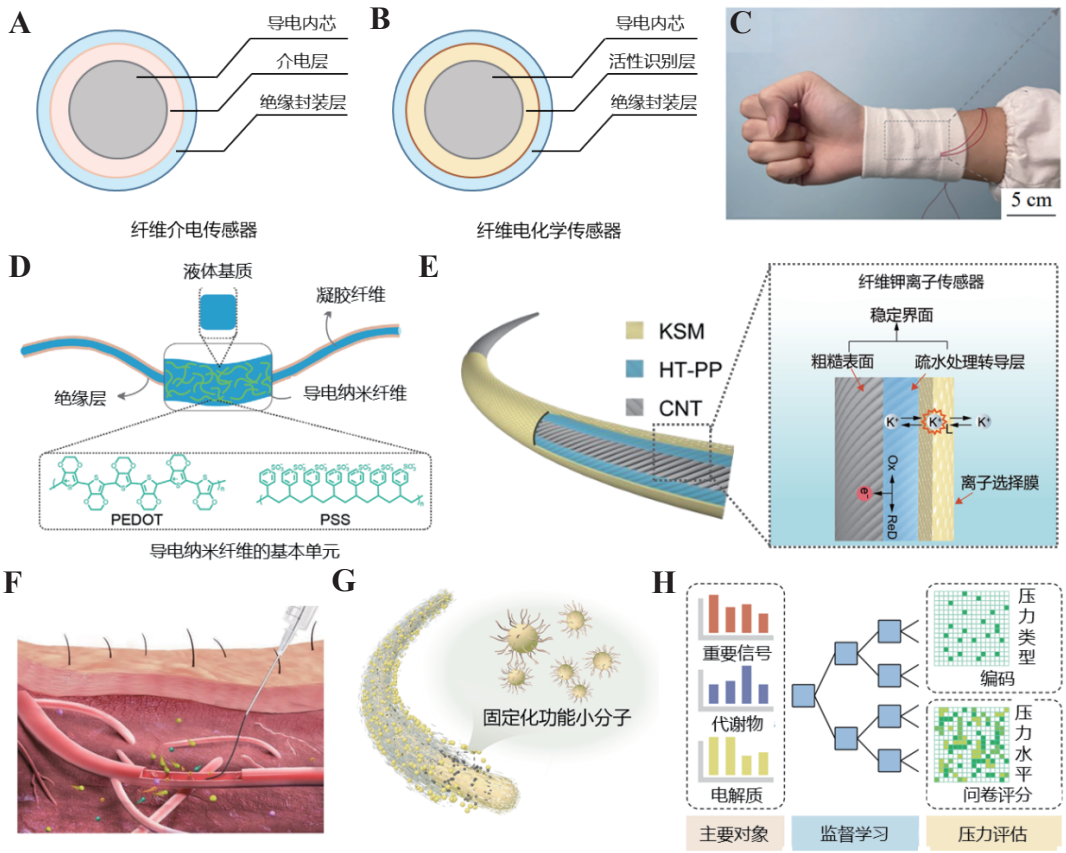


图3　纤维传感器件:A. 纤维物理传感器的基本结构;B. 纤维电化学传感器的基本结构;C. 用于监测汗液中葡萄糖浓度的可穿戴织物传感器[16];D. 用于监测神经信号的纤维神经电极[17];E. 用于监测脑内钾离子浓度的纤维传感器[15];F. 纤维生物传感器可通过注射器便捷地植入体内[20];G. 可生物降解的纤维传感器[21];H. 利用机器学习实现高质量传感结果分析[22]

Fig.3 Fiber Sensors: A. The Basic Structure of Fiber Physical Sensors; B. The Basic Structure of Fiber Electrochemical Sensor; C. Wearable Fabric Sensor for Monitoring Glucose Concentration in Sweat[16]; D. Fiber Electrode for Neural Monitoring[17]; E. Fiber Sensor for Monitoring Potassium Ion Concentration in the Brain[15]; F. Fiber Biosensors Implanted into the Body through a Syringe[20]; G. Biodegradable Fiber Sensor[21]; H. Machine Learning Assisted High-quality Data Analysis[22]

压力响应特性。通过与口罩集成,可实时监测面部微表情变化,为情感计算和人机交互提供了新的技术途径[13]。在生化传感方面,可穿戴纤维传感器可对汗液、泪液等实时检测,如同轴结构的纤维离子传感器可实时检测汗液中Na^+、K^+、Ca^{2+}等离子的浓度变化[14,15]。此外,通过将葡萄糖氧化酶固定在碳纳米管纤维表面,可以开发基于电化学的葡萄糖传感器,为运动代谢监测和糖尿病管理提供了创新解决方案(图3C)[16]。

为实现对病灶或重点部位的原位、实时监测,植入式纤维传感器凭借其独特的结构优势,能够显著提高检测结果的时空分辨率,在基础研究与临床诊疗中展现出广阔的应用前景。然而,在实际应用中仍需解决一系列关键科学问题,包括传感器与生物组织的力学匹配性、检测限与灵敏度、深部组织植入的长期生物安全性,以及器件寿命管理等。

为克服传统硅基和金属神经电极刚性大、易造成组织损伤的局限,研究者开发了基于高分子凝胶与导电高分子纤维的柔性神经探针,其模量低至千帕级别,能够在剧烈活动的小鼠脑内实现长达数月的稳定神经信号记录,为长期神经界面研究提供了新的工具(图3D)[17];进一步优化的传感器内部界面可以实现脑内离子的长期监测(图3E)[15]。为进一步实现高灵敏度检测,纤维状可植入电化学有机晶体管能够有效放大过氧化氢、多巴胺及抗坏血酸等生物分子的检测电流[18,19]。得益于纤维传感器的一维特性,研究者开发了基于注射器的微创植入技术(图3F)[20],为临床转化提供了重要支持。此外,为实现传感器的全生命周期管理,研究者在惰性纳米粒子上固定功能小分子,开发了可生物降解的纤维传感器,避免了传感器长期滞留体内的安全隐患(图3G)[21]。

展望未来,纤维传感器在神经科学、精准医疗和慢性病管理等领域中凭借其出色的柔性、高灵敏性与实时监测能力,有望成为新一代生物医疗器械的重要组成部分。未来,纤维传感器将实现与其他功能模块的高度集

成,形成具备多物理—化学参数同时感知与处理的综合监测系统(图3H)[22]。同时,随着人工智能、无线通讯和大数据处理技术的进步,纤维传感器还可进一步拓展至纤维刺激器,实现动态医疗干预闭环系统,推动在精准医疗、神经科学探索、个性化健康管理及具身智能技术等多领域的创新应用,实现从基础研究到实际临床和生活场景中的落地转化。

2.3 纤维光伏器件

目前纤维太阳能电池主要分为染料敏化、钙钛矿、有机三种体系。其中,纤维染料敏化太阳能电池主要由纤维光阳极、纤维对电极和电解质组成(图4A),最初采用同轴结构组装,使用高电阻的导电聚合物作为外部电极,导致性能较低,仅获得0.30~0.35 V的开路电压[23]。Qiu等[24]于2014年首次发展出纤维钙钛矿太阳能电池,其效率可达3.3%(图4B)。为适应可穿戴应用中各种形变需求,进一步采用弹簧状钛丝作为弹性阳极,沉积功能层后插入碳纳米管包覆的弹性纤维,制备出形变稳定的弹性纤维光伏器件[25]。纤维有机太阳能电池和纤维钙钛矿太阳能电池结构相似,均由内电极、电子传输层、光活性层、空穴传输层、纤维外电极组成。其中,光活性层为聚合物或有机功能分子(图4C),最早于2007年报道,其效率为1.1%[26]。经过十余年的材料优化和

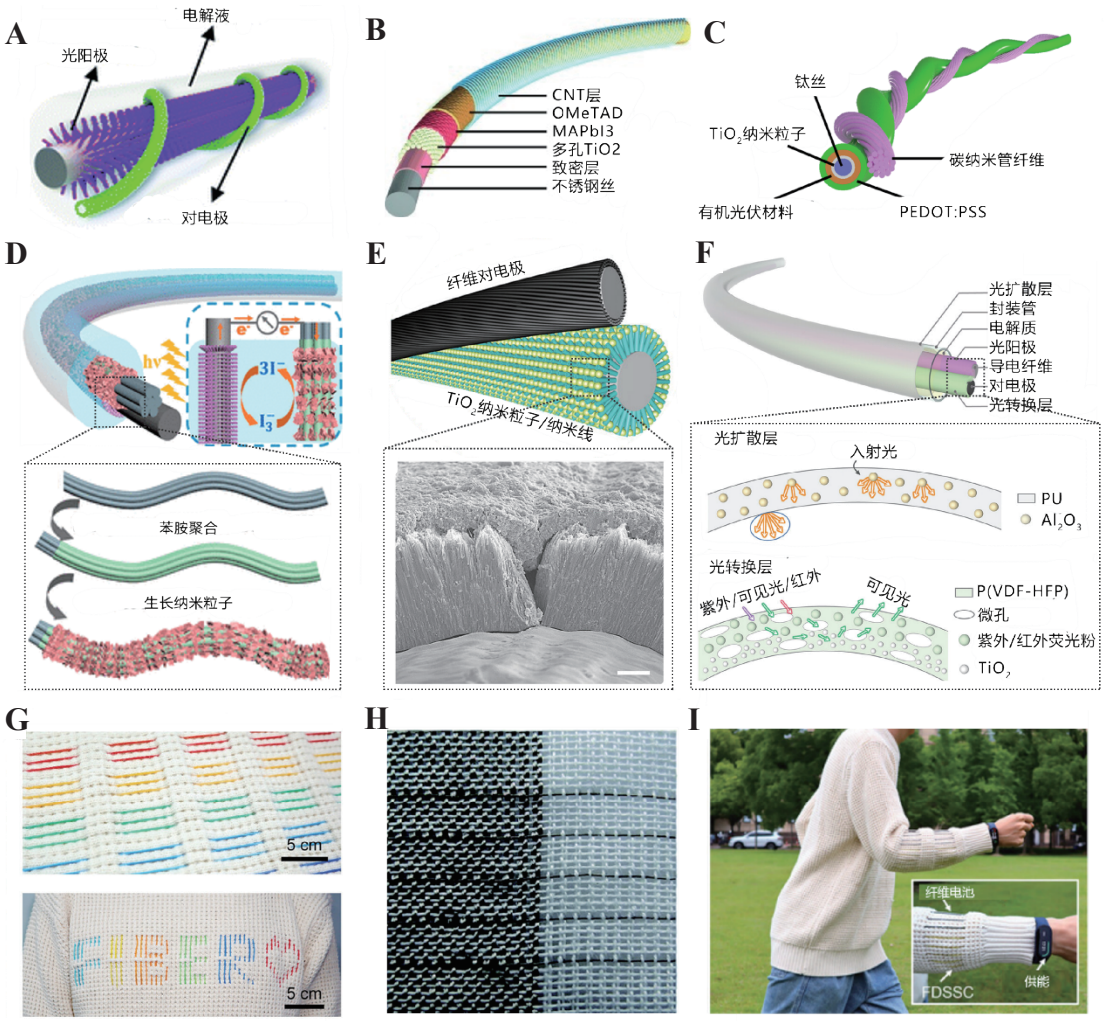


图4 纤维光伏器件:A. 纤维染料敏化光伏器件典型结构[30];B. 纤维钙钛矿光伏器件典型结构[24];C. 纤维有机聚合物光伏器件典型结构[31];D. 以碳纳米管复合纤维为对电极的纤维光伏器件[28];E. 以高性能二氧化钛复合纤维为光阳极的纤维光伏器件[29];F. 具有光扩散层和光反射层的高性能纤维光伏器件[30];G. 具有多色外观的纤维光伏器件[30];H. 具有光伏性能的织物光伏器件[32];I. 集成到衣物中的纤维光伏器件[33]

Fig.4 Fiber Photovoltaic Devices: A. Typical Structure of Fiber Dye Sensitized Photovoltaic Devices[30]; B. Typical Structure of Fiber Perovskite Photovoltaic Devices[24]; C. Typical Structure of Fiber Organic Polymer Photovoltaic Devices[31]; D Fiber Photovoltaic Devices Using Carbon Nanotube Composite Fibers as Counter Electrodes[28]; E. Fiber Photovoltaic Devices Using Titanium Dioxide Composite Fibers as Photoanodes[29]; F. High Performance Fiber Photovoltaic Devices with Light Diffusion Layer and Light Reflection Layer[30]; H. Fabric Photovoltaic Devices[32]; G. Multicolored Fiber Photovoltaic Devices[30]; I. Fiber Photovoltaic Devices Integrated into Clothing[33]

结构改进,目前已实现最高9.4%的效率[27]。

相较于其他两类器件,纤维染料敏化太阳能电池具有制备简单、效率较高等优势,受到广泛关注。研究人员在钛丝上原位制备了TiO_2纳米管阵列(图4D),获得高效的纤维光阳极,有效改善了界面电荷传输[28],并发展出缠绕结构的纤维染料敏化太阳能电池,有效提升了光伏性能。在材料方面,研究人员在光阳极表面引入极性聚合物中间层,钝化表面缺陷,减少电子复合,并增加染料负载提升光电流。通过在TiO_2纳米管阵列的"V型"孔道中复合TiO_2纳米颗粒,制备出复合纳米结构新型纤维光阳极,得到了高性能室内纤维光伏器件(图4E)[29]。在结构方面,通过引入光扩散层和光转换层,充分利用了纤维电极360°受光的独特优势,并扩大了太阳光谱的利用范围,使得纤维染料敏化太阳能电池效率达到13.11%(图4F),同时实现了器件的多色外观,极大地提高了光伏织物在实际应用中的可设计性与兼容性(图4G)[30]。

虽然纤维光伏器件的研究取得了重要进展,但是仍面临一些瓶颈难题。首先是高效率的纤维染料敏化太阳能电池均使用液态电解质,存在泄漏、易燃甚至毒性等风险,亟需发展高性能和高安全性的准固态、固态纤维太阳能电池,以满足可穿戴领域的应用要求(图4H、4I)。此外,纤维太阳能电池还停留在实验室阶段,厘米长度的纤维太阳能电池难以实现有效的编织应用,需要进一步发展制备技术,大规模构建出高性能和高一致性的纤维太阳能电池,匹配电学与力学性能,推动纤维太阳能电池的规模化应用。

2.4 纤维储能器件

电池作为智能电子设备中不可或缺的能量供应单元,其传统刚性三维块状形态在诸多应用场景中存在局限,难以满足可穿戴设备对柔性、形变适应性的需求。相比之下,纤维电池凭借其独特的一维结构能够适应弯曲、拉伸和扭曲等多种复杂形变,并在大幅变形下保持稳定运行,是可穿戴设备的理想能源供应体系。自2013年首次制备出纤维锂电池以来[34],纤维锂离子电池不断向实际应用及产业化方向迈进,其研究围绕以下三方面:提升纤维电池的能量密度、增强纤维电池的安全性及提高纤维电池的循环性能。

在早期研究中,研究者使用锰酸锂—碳纳米管纤维作为正极,纳米颗粒—碳纳米管复合纤维作为负极,规避了传统硅材料在充放电循环中因体积变化大而导致的失效(图5A)[35]。但是,早期纤维电池的应用受限于能量密度低(<1 Wh/kg)。为了提升纤维电池的能量密度,研究者提出了高负载量涂覆、轻量化集流体、改进正极材料等多种方案。2021年,在理论探索的支撑下,研究者开发了用于纤维锂离子电池的连续制造方法,包括顺序涂层、热拉伸和溶液挤出,辅以精确控制涂覆浆料的物理性质(表面能、黏度等),可以稳定负载更多活性材料,进而大规模连续化生产(图5B、5C),其能量密度达85.69 Wh/kg [36]。目前,通过设计电解质,纤维锂离子电池对的能量密度已达到了128 Wh/kg。此外,还可以采用编织工艺构建多通道结构,降低集流体质量,优化锂离子传导路径,有助于进一步提高能量密度[37]。

与可穿戴器件高度集成,实现与人体的高度兼容是纤维储能器件的核心应用之一。为增强安全性,研究者采用有机凝胶电解质,在纤维电极之间构建了高性能凝胶网格,有效改善了纤维电极的界面稳定性,降低了纤维电池的漏液风险,实现了高能量密度与高安全性的平衡(图5D)[38]。针对有机凝胶的易燃问题,研究者通过原位聚合构建了阻燃凝胶电解质,成功开发了具备耐火性能的准固态纤维锂离子电池,在严苛环境下亦能安全运行[39]。为彻底规避有机电解质中的可燃组分,水系纤维锂离子电池采用水溶性锂盐和水作为溶剂,大幅提升了安全性[40]。

循环寿命是商业化成功的重要保障。降低水汽渗透率对于延长电池循环寿命具有显著作用,为此研究者设计了一种高阻隔性的聚三氟氯乙烯/有机改性蒙脱土复合管材用于电池封装,其水汽透过率仅为传统管材的30%,纤维电池在空气中连续充放电200天后仍能保持超过80%的容量[41]。此外,为根本解决活性锂耗尽引起的电池失效问题,Chen等[42]利用人工智能筛选开发出一种电解液补锂剂,可按需注入电池实现容量恢复,从而显著延长循环寿命。

最终,纤维电池需要作为能量储存器件在智能纤维设备中发挥实际应用,如与织物集成后可作为智能供电器件,其功率可为智能手机供电。进一步地,在与传感、显示器件高度集成后,可以使用纤维电池为智能纤维器件供电,实现智能织物系统的独立能量供应,在下一代可穿戴系统中有良好的前景(图5E、5F)[43]。

2.5 纤维发光与织物显示器件

视觉是人类获取信息最为高效的途径之一,显示器件作为人机交互和信息输出的核心载体,极大地改变了人们的信息获取和沟通方式。随着可穿戴技术的飞速发展,应用端对显示器件的柔性要求不断提升。相比传统LED、OLED等平面显示器件,基于发光纤维构建的织物显示器件具有高度柔性、舒适性和透气性,且在大变形时仍具有稳定的发光结构,因而成为柔性显示领域的

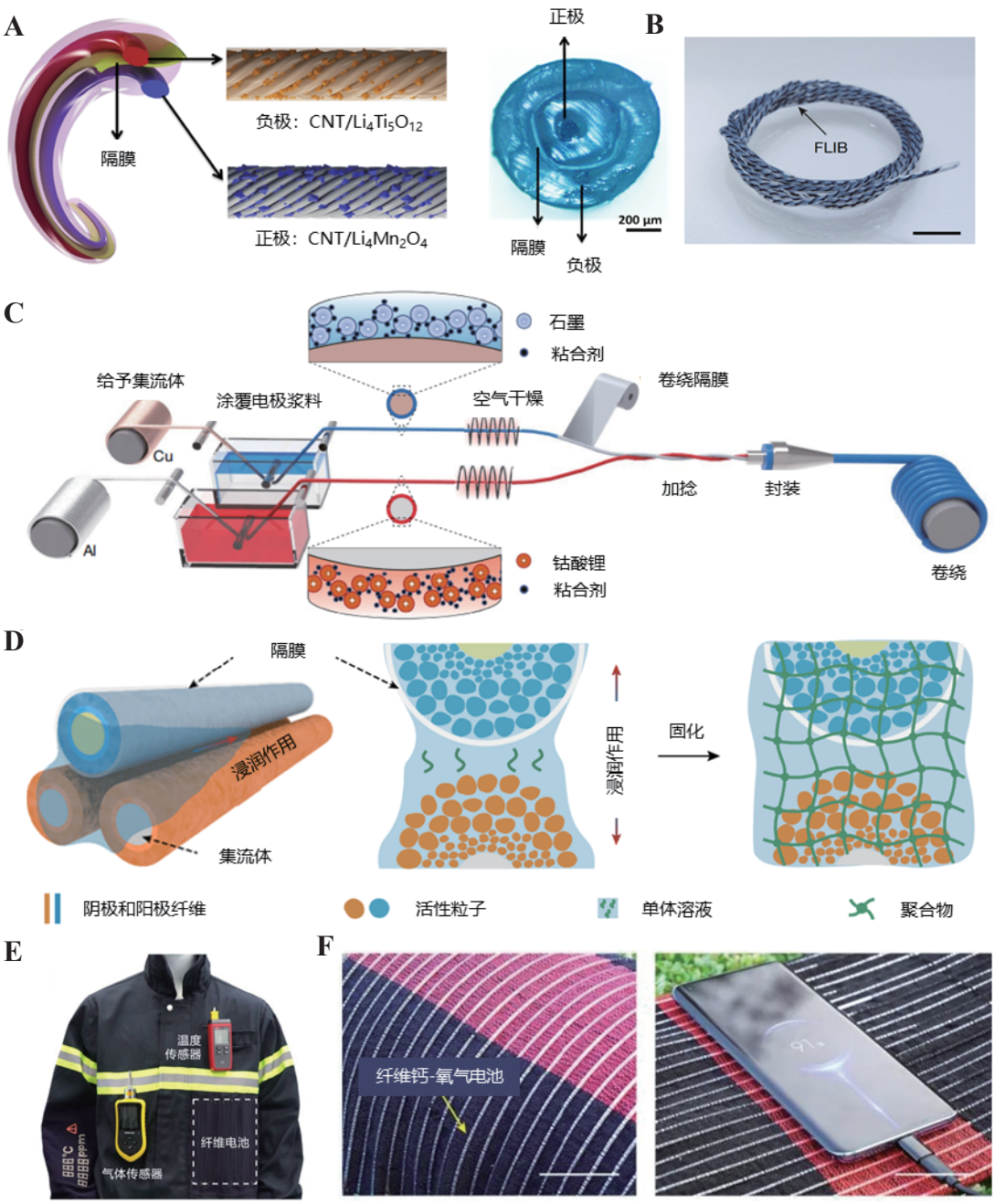


图5 纤维储能器件：A. 纤维锂离子电池结构示意图[35]；B. 纤维锂离子电池实物图[36]；C. 可纺纤维锂离子电池制备流程示意图[36]；D. 凝胶纤维锂离子电池电极结构示意图[38]；E. 纤维电池集成于可穿戴系统中[38]；F. 室温可充钙—氧电池集成于纺织品中为手机供能[43]

Fig.5 Fiber Based Energy Storage Devices: A. Schematic Diagram of Fiber Lithium-ion Battery Structure[35]; B. Photo of Fiber Lithium-ion Battery[36]; C. Schematic Diagram of Spinning Fiber Lithium-ion Batteries[36]; D. Schematic Diagram of the Gel Fiber Lithium-ion Battery[38]; E. Fiber Batteries Integrated into Wearable Systems[38];F. Room Temperature Rechargeable Calcium-Oxygen Battery Integrated into Textiles to Power Mobile Phones[43]

新一代解决方案，在人机交互、具身智能及智慧医疗等领域展现出广阔应用前景。

织物显示器件由负载交流电致发光活性层的发光纤维电极和透明导电纤维电极经纬编织构建而成，每个交织点均可视为一个独立像素单元(图6A)[44]。发光纤维电极由导电芯线、介电层及荧光层构成，透明导电纤维电极则通常采用离子液体与透明弹性聚合物熔融纺丝制备。其中，透明导电纤维电极应具备低模量、高弹性的特性，以在发光像素单元处形成紧密、均匀的面状接触，从而在纤维高曲率接触区域构建均匀电场，实现像素单元的稳定发光[45]。当交流电场施加到发光像素单元时，强电场促使荧光层中半导体材料的电子由价带跃迁至导带，随后在电场反向作用下，电子与空穴复合并释放出光能。目前，发光纤维器件主要采用硫化锌体

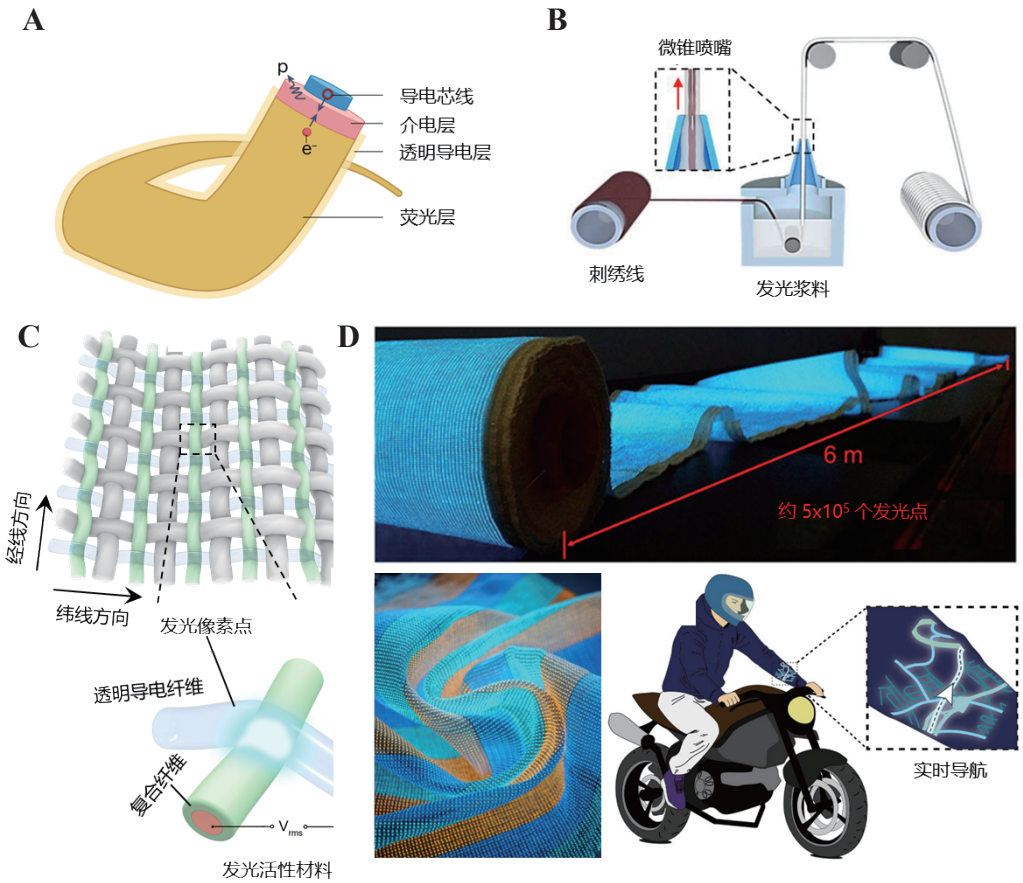


图6 发光纤维及织物显示器件:A. 交流电致发光纤维器件工作原理图[44];B. 发光纤维器件连续化制备过程[46];C. 织物显示器件及交织点发光原理[45];D. 大面积制备的织物显示器件及其应用展示[45]

Fig.6 Luminescent Fiber and Fabric Display Devices: A. Working Principle of AC Electroluminescent Fiber Devices[44]; B. Continuous Preparation Process of Luminescent Fiber Devices[46]; C. Fabric Display Devices and the Luminescence Principle of Interweaving Points[45]; D. Large Scale Preparation of Fabric Display Devices and Their Application Demonstration[45]

系发光材料,通过掺杂铜、锰等金属离子可调控发光波长,具备优异的化学稳定性和膜层缺陷不敏感性,且无需真空封装即可抵抗氧气和水分侵蚀,满足汗液、摩擦等复杂穿戴环境的需求。织物显示器件不仅可借助工业化设备实现大规模生产(图6B)[46],还可在编织后与驱动电路集成,利用无源控制实现动态显示。此外,这类器件还能与供能、传感、无线通信等其他纤维电子器件协同集成,构建智能电子织物系统,实现导航、报警、传感和通讯等多种功能,有望引领下一代可穿戴电子器件的发展(图6C、6D)[38,45]。

虽然织物显示器件已经实现了初步应用,但其在实际应用中仍然面临着诸多挑战,如驱动电压较高、发光亮度较低、分辨率较低、色彩单一、交互形式单一等问题。为降低驱动电压、提高发光亮度,研究者试图提高材料的介电常数。如研究者开发了高介电常数的聚偏氟乙烯弹性体,仅需23 V即可实现最高1 460 cd/m²的发光亮度[47]。为了提高分辨率,发展了超细发光纤维电极,通过优化织造工艺,可以实现微米级发光像素单元阵列的制备。织物显示器件的显示色彩丰富度可以通过开发多种颜色的发光纤维,并利用混光技术实现多彩织物显示。织物显示器件还可以和传感织物高度集成,进而实现多种交互功能及丰富的交互形式,进一步引领人机交互领域。

3 总结与展望

3.1 发展高性能纤维材料

作为直接面向消费者的终端消费电子器件,智能纤维器件的功能设计必须与实际应用需求相匹配,而其核心性能又依赖高性能材料的有力支撑。因此,高性能智能纤维材料的设计是推动器件发展的根本性问题。目前,针对智能纤维器件的应用场景,已有一套初步的高性能材料选用与设计方法。例如,在能量储存和转换器件中,纤维材料不仅需要具备高电导率,还必须同时满足高柔性与高稳定性,确保在剧烈机械变形条件下电荷能够高效、稳定传输;而面向生物医学传感的可穿戴或植入式纤维器件则要求材料在宏观上实现与生物组织

的良好力学匹配,同时在微观层面确保本征安全性;对于织物显示系统,纤维材料则需兼具良好的透光性、透气性,并能耐受高频刷新电流。未来,还需针对航空航天、高温高压、深海低温等极端环境,系统研究高性能智能纤维材料的耐受能力及工作特性。

从现有材料库中挑选合适组合虽可提高研发效率,但随着应用场景日益细化,为真正解决实际问题并实现实验室成果向消费市场转化,必须依据具体需求研制新材料,开展自下而上的系统研发设计。伴随人工智能技术的不断突破,基于材料基因库的AI辅助设计正逐步实现多参数、多需求、多功能材料的快速筛选与设计,这将推动基础材料科学的创新突破,并成为智能纤维材料持续进步的重要驱动力。

3.2 开发规模化制备技术路线

尽管目前在纤维锂离子电池、发光纤维等领域已实现智能纤维器件的连续制备,但整体上仍处于中试阶段,与其广阔的应用前景相比,规模化生产能力尚需大幅提升。目前,大规模生产设备主要针对平面器件设计,面对大长径比和高柔性的纤维器件存在明显局限。因此,亟需设计专门面向智能纤维器件的标准化生产装置和流水线。虽然部分传统设备经过改造后已能适应纤维器件的生产,但从头设计专用产线将更有助于提升产品一致性和降低生产成本。在材料方面,可通过连续等离子处理、分散液浸润、洗涤及烘干等工序,实现金属纤维、高分子纤维和碳管纤维等特定功能材料的规模化生产;而在器件组装上,则需发展活性材料涂覆、烘干、纤维器件组装、封装以及功能溶液灌注与封端等连续工艺。此外,还应开发孔道设计、限域涂覆和多尺度组装等特定技术,确保器件满足产业化应用的严格要求。工程化研究不仅能够显著提升制备效率,也能反哺上游基础科学研究,为智能纤维器件的全面推广奠定坚实基础。

3.3 构建集成系统与应用拓展

随着人工智能技术的突破,多功能智能织物器件正迈向系统集成化的新纪元。未来,智能纤维器件将不再作为孤立单元存在,而是通过高度集成,实现传感、能量采集、能量储存、显示和通信等多维功能的协同作用。近年来,具有计算功能的智能纤维及织物器件取得了较大突破,在单根纤维上实现数据存储或处理功能,在集成单根纤维计算机形成分布式网络后,可以显著提升智能衣物的监测性能[48]。在具身智能的大背景下,智能织物系统应整合各类模块,实现深度人机交互;当外部环境发生变化时,系统能够自动调控能量管理模块,通过电刺激或机械动作辅助穿戴者做出响应。特别是在大健康领域,智能织物系统可融合环境、行为和生理等多维数据,通过人工智能实时分析心率、体温、血糖、运动、饮食和睡眠等信息,构建完整的个体健康画像,并在必要时通过反馈机制实现早期干预和治疗。总之,涵盖传感、能量采集、储存、显示及通信等功能的智能织物系统将成为具身智能的重要载体,并有望引领下一代人机交互和智慧医疗领域的革命性进展。

参 考 文 献

[1] Zhang KL,Tang CQ,Yu SH,et al. High-performing fiber electrodes based on a gold-shelled silver nanowire framework for bioelectronics. Journal of Materials Chemistry B,2024,12(23): 5594—5599.

[2] Nan KW,Babaee S,Chan WW,et al. Low-cost gastrointestinal manometry *via* silicone-liquid-metal pressure transducers resembling a quipu. Nature Biomedical Engineering,2022,6(10): 1092—1104.

[3] 任婧,孙雪梅,陈培宁,等. 纤维电化学储能器件的研究进展. 科学通报,2020,65(S2): 3150—3159.
Ren J,Sun XM,Chen PN,et al. Research progress of fiber-shaped electrochemical energy storage devices. Chinese Science Bulletin,2020,65(S2): 3150—3159. (in Chinese)

[4] Xu JN,Zeng KW,Zhang YF,et al. High performance microwave absorption material based on metal-backboned polymer. Chinese Journal of Polymer Science,2024,42(12): 1881—1887.

[5] Chen XM,Feng YH,Zhang P,et al. Hydrogel fibers-based biointerfacing. Advanced Materials,2025,37(4): 2413476.

[6] Yu L,Gao TT,Mi RY,et al. 3D-printed mechanically strong and extreme environment adaptable boron nitride/cellulose nanofluidic macrofibers. Nano Research,2023,16(5): 7609—7617.

[7] Li YY,Zhu HL,Wang YB,et al. Cellulose-nanofiber-enabled 3D printing of a carbon-nanotube microfiber network. Small Methods,2017,1(10): 1700222.

[8] Li ZH,Chen CJ,Xie H,et al. Sustainable high-strength macrofibres extracted from natural bamboo. Nature Sustainability,2022,5(3): 235—244.

[9] 彭慧胜. 纤维电子学. 北京: 科学出版社,2021.
Peng HS. Fiber electronics. Beijing: Science Press,2021. (in Chinese)

[10] Wang LY,Jiang HY,Wan F,et al. High-performance artificial ligament made from helical polyester fibers wrapped with aligned carbon nanotube sheets. Advanced Healthcare Materials,2023,12(31): 2301610.

[11] Wang LY,Wan F,Xu YF,et al. Hierarchical helical carbon nanotube fibre as a bone-integrating anterior cruciate ligament replacement. Nature Nanotechnology,2023,18(9): 1085—1093.

[12] Chen CR,Feng JY,Li JX,et al. Functional fiber materials to smart fiber devices. Chemical Reviews,2023,123(2): 613—662.

[13] Lu LJ,Zhou YJ,Pan J,et al. Design of helically double-leveled gaps for stretchable fiber strain sensor with ultralow detection limit,broad sensing range,and high repeatability. ACS Applied Materials & Interfaces,2019,11(4): 4345—4352.

[14] Yang H,Qian Z,Wang J,et al. Carbon nanotube array-based flexible multifunctional electrodes to record electrophysiology and ions on the

cerebral cortex in real time. Advanced Functional Materials,2022,32(38): 2204794.

[15] Wang J,Wang L,Yang Y,et al. A fiber sensor for long-term monitoring of extracellular potassium ion fluctuations in chronic neuropsychiatric diseases. Advanced Materials,2024,36(13): e2309862.

[16] 李金妍,唐成强,李雯君,等. 基于直接电子转移的柔性纤维葡萄糖传感器. 高分子学报,2024,55(7): 872—880.
Li JY,Tang CQ,Li WJ,et al. Flexible fiber glucose sensor based on direct electron transfer. Acta Polymerica Sinica,2024,55(7): 872—880. (in Chinese)

[17] Tang C,Han Z,Liu Z,et al. A soft-fiber bioelectronic device with axon-like architecture enables reliable neural recording *in vivo* under vigorous activities. Advanced Materials,2024,36(38): e2407874.

[18] Feng JY,Fang Y,Wang C,et al. All-polymer fiber organic electrochemical transistor for chronic chemical detection in the brain. Advanced Functional Materials,2023,33(30): 2214945.

[19] Fang Y,Feng J,Shi X,et al. Coaxial fiber organic electrochemical transistor with high transconductance. Nano Research,2023,16(9): 11885—11892.

[20] Wang L,Xie S,Wang Z,et al. Functionalized helical fibre bundles of carbon nanotubes as electrochemical sensors for long-term *in vivo* monitoring of multiple disease biomarkers. Nature Biomedical Engineering,2020,4(2): 159—171.

[21] Yu SH,Tang CQ,Yu SJ,et al. A biodegradable fiber calcium ion sensor by covalently bonding ionophores on bioinert nanoparticles. Advanced Healthcare Materials,2024,13(22): e2400675.

[22] Xu CH,Song Y,Sempionatto JR,et al. A physicochemical-sensing electronic skin for stress response monitoring. Nature Electronics,2024,7(2): 168—179.

[23] Baps B,Eber-Koyuncu M,Koyuncu M. Ceramic based solar cells in fiber form. Key Engineering Materials,2001,206—213: 937—940.

[24] Qiu LB,Deng J,Lu X,et al. Integrating perovskite solar cells into a flexible fiber. Angewandte Chemie International Edition,2014,53(39): 10425—10428.

[25] Deng J,Qiu LB,Lu X,et al. Elastic perovskite solar cells. Journal of Materials Chemistry A,2015,3(42): 21070—21076.

[26] Liu JW,Namboothiry MAG,Carroll DL. Optical geometries for fiber-based organic photovoltaics. Applied Physics Letters,2007,90(13): 133515.

[27] Lv D,Jiang QQ,Shang YY,et al. Highly efficient fiber-shaped organic solar cells toward wearable flexible electronics. NPJ Flexible Electronics,2022,6: 38.

[28] Zhang JX,Wang ZP,Li XL,et al. Flexible platinum-free fiber-shaped dye sensitized solar cell with 10.28% efficiency. ACS Applied Energy Materials,2019,2(4): 2870—2877.

[29] Zhu ZF,Lin ZM,Zhai WJ,et al. Indoor photovoltaic fiber with an efficiency of 25.53% under 1500 lux illumination. Advanced Materials,2024,36(11): 2304876.

[30] Song JT,Gu Y,Lin ZM,et al. Integrating light diffusion and conversion layers for highly efficient multicolored fiber-dye-sensitized solar cells. Advanced Materials,2024,36(16): 2312590.

[31] Zhang ZT,Yang ZB,Wu ZW,et al. Weaving efficient polymer solar cell wires into flexible power textiles. Advanced Energy Materials,2014,4(11): 1301750.

[32] Liu P,Gao Z,Xu LM,et al. Polymer solar cell textiles with interlaced cathode and anode fibers. Journal of Materials Chemistry A,2018,6(41): 19947—19953.

[33] Zhu ZF,Lin ZM,Gu Y,et al. Designing reflective hybrid counter electrode for fiber dye-sensitized solar cell with record efficiency. Advanced Functional Materials,2023,33(52): 2306742.

[34] Ren J,Li L,Chen C,et al. Twisting carbon nanotube fibers for both wire-shaped micro-supercapacitor and micro-battery. Advanced Materials,2013,25(8): 1155—1159.

[35] Ren J,Zhang Y,Bai WY,et al. Elastic and wearable wire-shaped lithium-ion battery with high electrochemical performance. Angewandte Chemie International Edition,2014,53(30): 7864—7869.

[36] He JQ,Lu CH,Jiang HB,et al. Scalable production of high-performing woven lithium-ion fibre batteries. Nature,2021,597(7874): 57—63.

[37] Huang X,Wang C,Li C,et al. Braided fiber current collectors for high-energy-density fiber lithium-ion batteries. Angewandte Chemie International Edition,2023,62(24): e202303616.

[38] Lu CH,Jiang HB,Cheng XR,et al. High-performance fibre battery with polymer gel electrolyte. Nature,2024,629(8010): 86—91.

[39] Cheng XR,Lu CH,Gong XC,et al. Quasi-solid fiber-shaped lithium-ion batteries with fire resistance. Angewandte Chemie International Edition,2025,64(16): e202423419.

[40] Yu Z,Curtiss LA,Winans RE,et al. Asymmetric composition of ionic aggregates and the origin of high correlated transference number in water-in-salt electrolytes. The Journal of Physical Chemistry Letters,2020,11(4): 1276—1281.

[41] Gong XC,Jiang HB,Lu CH,et al. Extending the calendar life of fiber lithium-ion batteries to 200 days with ultra-high barrier polymer tubes. Advanced Materials,2024,36(45): 2409910.

[42] Chen S,Wu G,Jiang H,et al. External Li supply reshapes Li deficiency and lifetime limit of batteries. Nature,2025,638(8051): 676—683.

[43] Ye L,Liao M,Zhang K,et al. A rechargeable calcium-oxygen battery that operates at room temperature. Nature,2024,626(7998): 313—318.

[44] Wang Z,Liu Y,Zhou ZH,et al. Towards integrated textile display systems. Nature Reviews Electrical Engineering,2024,1(7): 466—477.

[45] Shi X,Zuo Y,Zhai P,et al. Large-area display textiles integrated with functional systems. Nature,2021,591(7849): 240—245.

[46] Cho S,Chang T,Yu TH,et al. Machine embroidery of light-emitting textiles with multicolor electroluminescent threads. Science Advances,2024,10(1): eadk4295.

[47] Tan YJ,Godaba H,Chen G,et al. A transparent,self-healing and high-κ dielectric for low-field-emission stretchable optoelectronics. Nature Materials,2020,19(2): 182—188.

[48] Gupta N,Cheung H,Payra S,et al. A single-fibre computer enables textile networks and distributed inference. Nature,2025,639(8053): 79—86.

Intelligent Fiber Materials and Devices

Sihui Yu Haibo Jiang Chengqiang Tang Jiatian Song Yuanyuan Zheng
Zhengfeng Zhu Tianrui Li Yi Jiang Songlin Zhang* Xuemei Sun*

State Key Laboratory of Molecular Engineering of Polymers, Department of Macromolecular Science, Institute of Fiber Materials and Devices, Fudan University, Shanghai 200438, China

Abstract Intelligent fiber devices, as a vital component of next-generation electronics, have emerged as a cutting-edge interdisciplinary research field, demonstrating broad application prospects in many fields such as human-centered intelligent interaction, energy innovation, and healthcare. With the rapid advancement of this field, existing fiber materials, device architectures, and fabrication techniques can no longer meet the growing performance demands of frontier applications. Consequently, there is an urgent need for co-design strategies integrating fiber materials and device structures to address related challenges. This review adopts a "materials–principles–devices–applications" framework to systematically summarize recent research progress in intelligent fiber materials (including metallic materials, polymers, and carbon nanomaterials) and their related fiber devices (encompassing sensing, energy conversion, energy storage, and light-emitting displays). The discussion focuses on material and structural design, performance optimization, scalable manufacturing processes, and emerging applications. Finally, in light of novel materials research methodologies and the growing demand for building intelligent fabric ecosystems, this paper outlines key scientific challenges and future research directions in the field of intelligent fibers and devices.

Keywords fiber materials; fiber devices; intelligent materials; wearable; fiber lithium-ion battery; implantable sensors; textile display

孙雪梅 复旦大学高分子科学系教授、副系主任,"十四五"国家重点研发计划"高端功能与智能材料"总体专家组成员。主要研究方向为纤维生物传感材料与器件。主持国家自然科学基金青年科学基金项目(B类)等课题,在*Nature Nanotechnology*、*Nature Biomedical Engineering*等期刊上发表论文50余篇,申请中国发明专利30项,授权15项,其中4项实现了转让转化。相关成果入选"中国2023年度重要医学进展"。

张松林 复旦大学纤维电子材料与器件研究院青年研究员。研究工作专注于柔性智能纤维传感材料及其可穿戴/可植入器件在个体健康监测与管理领域的应用。以第一作者身份在*Nature Electronics*、*Nature Communications*、*Science Advances*、*Advanced Materials*等期刊上发表多篇论文。主持国家自然科学基金青年科学基金项目(C类)等课题。

虞思汇 复旦大学高分子科学系在读博士研究生。主要研究领域为生物电子材料与器件、纤维传感材料与器件、可穿戴设备等。曾获上海市优秀毕业生。

(责任编辑 陈 鹤 张 强)

* Corresponding Authors, Email: sunxm@fudan.edu.cn; zhangsonglin@fudan.edu.cn