



航空航天用智能纤维与制品

朱宇文, 王浩宇, 孙恒达, 王刚*, 朱美芳

东华大学材料科学与工程学院纤维材料改性国家重点实验室, 上海 201620

* 联系人, E-mail: gwf8707@dhu.edu.cn

2024-05-31 收稿, 2024-08-11 修回, 2024-08-14 接受, 2024-08-15 网络版发表

国家自然科学基金(9216310060)和中央高校基本科研业务费专项资金(2232024Y-01)资助

摘要 近年来, 智能纤维与制品在航空航天领域的应用受到了广泛关注. 这些智能材料通过将传感、能量收集、自修复等功能集成到传统纺织结构中, 不仅提高了航空器的性能, 还大大增强了其安全性和可靠性. 本文综述了智能纤维与制品在航空航天领域的最新研究进展, 包括其在结构健康监测、能量回收、振动和噪声控制等方面的应用. 通过详细分析不同类型智能纤维的材料特性和功能机制, 探讨了其在实际应用中的潜力与挑战. 此外, 本文还展望了未来智能纤维与织物在航空航天领域的发展方向, 提出了可能的研究热点和技术突破点, 以期对相关领域的研究和应用提供参考.

关键词 智能纤维, 航空航天, 结构健康监测, 能量采集, 振动控制

高性能纤维和基质的添加允许构建用于航空航天等极端应用中的纺织品功能材料, 且得益于纤维增强技术的开发, 更多具备高模量、高强度、耐腐蚀和射线等的复合材料相继出现在航空航天设备中. 早在20世纪40年代, 玻璃纤维/聚酯复合材料已被开发并用于飞机的机身和机翼. 之后, 这种材料于20世纪50年代被进一步应用于基于真空袋和压力袋成型工艺制造的直升飞机螺旋桨, 并在后续的10年中与纤维缠绕技术相结合, 在美国北极星、土星等大型固体火箭发动机壳体的制造中得到使用. 这种以纤维作为功能组分的复合材料平衡了设备自重与强度的要求, 预示航天产业正式进入轻质高强结构的发展道路. 自20世纪70年代开始, 碳纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维、硼纤维、芳纶纤维、高密度聚乙烯纤维等高性能增强材料被相继研发, 并通过与高性能树脂、金属或陶瓷基体的结合, 制成性能更好的先进纺织复合材料, 以进一步完善纺织品复合材料在构建高性能航空航天结构材料中的使用需求.

当前, 随着国际上航空航天产业的发展, 智能化成为航空航天纺织材料的研究热点. 结合纺织材料固有的柔性、轻质性以及高强度, 通过编织结构实现复杂构型, 进而制备的一系列兼具机械和功能特性的特种纺织品复合材料引发了强烈的研究兴趣. 通过赋予纺织品电学、光学、磁学等属性, 可使之具有感知、通讯、信号处理等功能, 并能对外部刺激做出响应, 如基于微张力编织技术的极细金属单丝网状织物, 可展开为大面积超轻网面天线, 解决了高轨卫星信号反射的难题, 为未来航空航天领域研究提供了先进技术(<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1775332324922174100&wfr=spider&for=pc>). 这种与传统高维材料结合进而形成结构-功能一体化复合材料的策略已经被证明可作为在航空航天领域中构建可靠智能设备的路径之一. 2022年, 由工业和信息化部与国家发展和改革委员会联合印发的《关于产业用纺织品行业高质量发展的指导意见》明确指出, 在航空航天领域, 将发力柔性高性能纺织复合材料, 如具有多波段

引用格式: 朱宇文, 王浩宇, 孙恒达, 等. 航空航天用智能纤维与制品. 科学通报, 2025, 70: 2750–2762

Zhu Y, Wang H, Sun H, et al. Smart fibers and products for aerospace applications (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 2750–2762, doi: [10.1360/TB-2024-0584](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0584)

兼容、自适应环境、动态变形等性能的智能材料。基于以上发展路径,本文旨在从智能纤维的种类、制备手段以及功能三方面出发,对当前智能纺织品在航空航天领域中的应用进行综述。

1 智能纤维材料

近十年来,具有高长径比的纤维逐渐开始智能化。与平面设备相比,纤维的几何形状允许其具有更高的灵活性。通过适当的设计和修改,这种独特的一维结构可提供对多种功能的兼容性,例如可对温度、热、光、机械、电磁等环境变化进行识别并做出响应^[1]。航空航天领域目前已面向实际需求,开发有多种智能纤维材料,包括压电纤维材料^[2,3]、压阻纤维材料^[4,5]、形状记忆纤维材料^[6,7]以及光学纤维材料^[8,9]等,如图1所示。

1.1 压电纤维材料

压电纤维材料可实现机械能与电能的相互转化,

具有正压电或逆压电效应。正压电效应指在材料表面施加机械作用,其表面会产生电荷积累,而逆压电效应指对材料施加交变电场会诱导机械变形或振动的产生。如图1所示,正压电性来源于非中心对称的原子结构,当受到应力时会产生对应的电流。目前,常见的压电材料有钛酸钡(BaTiO_3 , BTO)陶瓷、锆钛酸铅($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$, $0 \leq x \leq 1$, PZT)陶瓷等无机压电材料,以及聚丙烯、聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)等有机压电材料。与无机压电陶瓷相比,有机压电材料尤其是PVDF由于其具备柔性、高灵敏度、可加工性和高压电电压常数等优点,基于PVDF的纤维材料能够在低空间占用和轻质的前提下识别微小应变变化并输出电压,进而对一些气流或飞行器部件的振动进行检测,例如用于替代传统微旋臂,以制造用于飞行器的高鲁棒和可扩展低速气流传感器^[10]。

1.2 压阻纤维材料

压阻纤维材料是指具有压阻效应的纤维,当受到

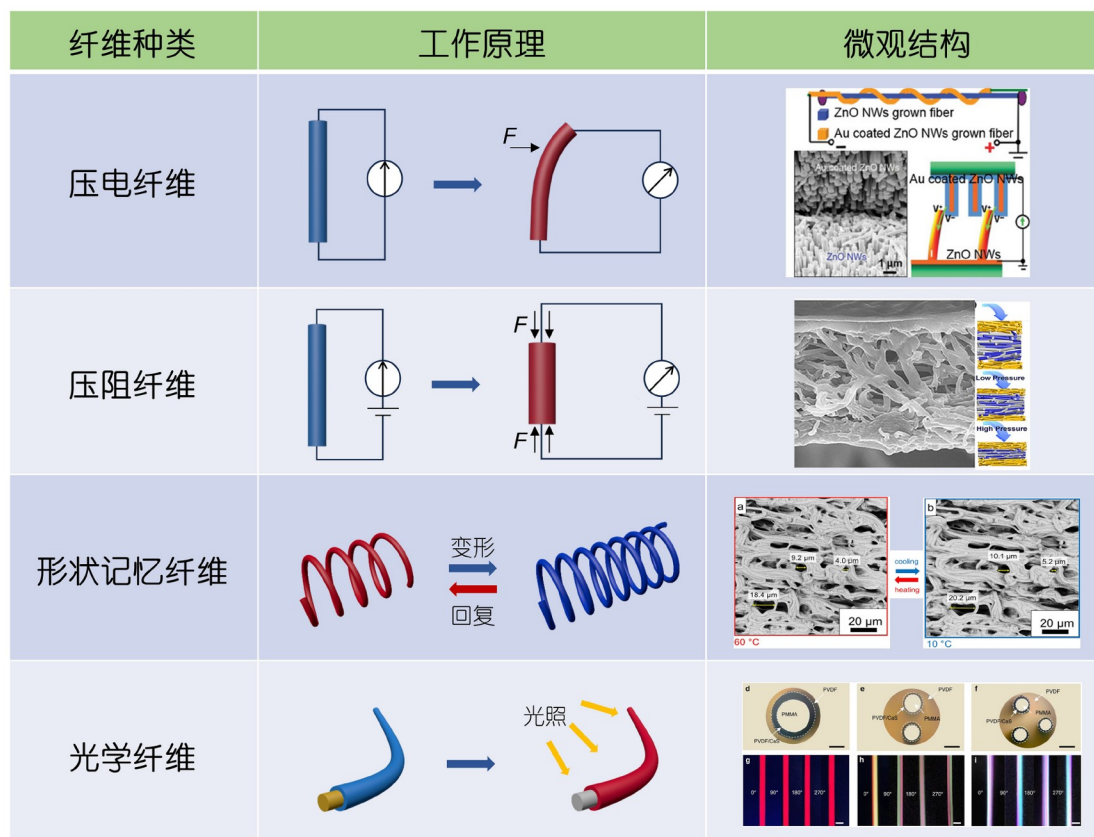


图1 (网络版彩色)不同智能纤维材料的工作原理和微观结构^[2-9]

Figure 1 (Color online) Working principles and microstructures of different smart fiber materials^[2-9]

外力作用时,材料电阻发生变化.如图1所示,在应力作用下,导电纤维间接触点随着纤维直径的减小而显著增加,从而影响电阻值.柔性压阻传感器通常由两个柔性电极与压阻传感活性材料组成,具有结构简单、检测灵敏度高、检测范围广等特点,为最常见的压力传感器之一.当前,一些基于还原氧化石墨烯涂层玻璃纤维的传感设备被证明可为航空航天部件在运行过程中弯曲幅度和频率的实时变化提供参照^[11],将纤维以固定间隔嵌入主体复合材料的层间并保持压阻纤维之间的相互绝缘,以形成每个纤维为基本单元的独立传感元件^[12].这种阵列式的独立自感应器件为后端可视化设备提供可靠和实时反馈的信号,进而准确显示整个部件的弯曲和振动情况,并为特殊情况下的变形预测提供资料.

1.3 形状记忆纤维材料

形状记忆纤维材料是指具有形状记忆效应的纤维,在经过预先的形状编程后,当受到一定的外界刺激(如:压力、温度、光、pH等)时,可以恢复到原来的形状,如图1所示.目前,形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)、形状记忆聚合物(shape memory polymers, SMP)以及液晶弹性体(liquid crystal elastomers, LCE)材料被认为有望在航空航天领域中组成功能性变形部件.相对于SMP在辐射环境中极易老化的特点,SMA被认为在航空航天飞行器中具有使用潜力.通常,SMA纤维被用于制备嵌入式复合板以通过超弹性抵御冲击或损伤,使用记忆材料镍碳诺作为增强材料制成的玻璃纤维复合材料与钢丝增强玻璃纤维复合材料相比,韧性提高18%^[13].通过温度控制的形状记忆超材料可被用于变形机翼或变形进气口等飞行器部件中,可赋予飞行器自发控制部件结构以应对不同外界环境的能力,例如可展开的太阳能板、飞机尾翼等^[14].近期,鉴于SMP在恶劣环境下的劣化问题,Zhang等人^[15]创建了聚醚醚酮基高玻璃化温度(143℃)形状记忆材料,并探索在金属球输运以及部署具备热响应复合接口的飞行器拖帆中的运行能力.此外,形状记忆酚醛树脂、双马来酰亚胺等聚合物材料也开始得到迅速发展,以实现轻质、高强的功能应用^[16,17].LCE可以产生快速且可逆的形状变化,并能够在驱动条件下维持形状,可被用于替代难以发生可逆形变的SMP在某些部件回收中的应用^[18].通常,LCE需要具备高的机械性能以提高其在极端环境中的运行质量和可靠性^[19].基于此,Leng等人^[20]

通过碳纤维增强LCE制备的制动部件在伽马射线辐照下保持可逆的形状变形性能,并保持25 MPa的最高断裂应力,被认为有望制造在近地轨道运行的可逆形变部件.

1.4 光学纤维材料

光学纤维材料一般由内外层介质组成,光线在高折射率的内层介质与低折射率的外层介质之间的界面处发生全反射,进而实现光信息的低损传输.通过芯鞘层结构和材料设计而制备的光纤传感设备由于具备对温度、压力、流量、振动等物理量的准确识别,被认为是一种重要的设备.如图1所示,在受到外界特定波长光照后,纤维颜色发生转变.其中,可穿戴光纤传感器兼具高灵敏度、高精度和抗电磁干扰的能力,在该领域具有广阔的应用前景.光纤布拉格光栅(fiber Bragg gratings, FBG)传感器为基于光纤技术制备的最常用的光学传感器之一^[21],适用于大面积分布式探测,在飞行器电机负载测量、结构变形测量以及热传感器等领域^[22~24]具有极佳的应用现状.

1.5 其他纤维材料

除了上述几种智能纤维材料外,具有防护特性的纤维材料由于在极端环境下对飞行器部件或人体具备保护作用而被研究和开发,如防冰和防隔热等.高空中过冷水在飞行器表面结冰会严重影响飞行安全.威奇托州立大学的研究团队^[25]将含有微米和纳米粒子的坚固超疏水涂层通过简单喷涂的方法引入到碳纤维增强复合材料表面,使其获得了稳定且持久的除冰和防冰性能,可以减轻飞机表面冰的形成和积聚.Zhang课题组^[26]通过将光热生成纳米碳纤维与基于疏水性聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)和亲水性聚乙烯吡咯烷酮(polyvinylpyrrolidone, PVP)链段的两亲材料整合,设计了一种对阳光敏感且稳定的防冰/除冰涂层,为防除冰问题提供了有效的解决思路.

极端环境下航空航天器精密元器件的防隔热问题,是维持器件高性能工作状态的一大重要问题.传统陶瓷器件机械刚性强、成本高,难以有效满足复杂曲面、结构变形等场景下的应用需求,而聚合物基柔性器件在复杂环境下性能会严重下降,甚至完全失效,无法适应极端环境下的严苛要求.因此,轻质隔热陶瓷纤维材料作为可在苛刻条件下工作的柔性器件的潜在材料,引起了广泛的关注,低热导率和极高温条件下的高

强度是该种材料目前重要的发展方向^[27]。Li等人^[28]通过结合溶液吹纺和针刺过程制备的碳氧化硅(SiOC)和碳化硅(SiC)复合纳米纤维和织物具备优异的隔热($0.026 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)和耐高温性能,并且具备强的抗压能力($\varepsilon=60\%$),在航空航天精密元器件的保护框架中具备良好的应用前景。Wang课题组^[29]针对超轻结构设计,开发了一种高空隙率(99.2%)的萤石结构柔性纤维膜材料,在耐受最高 1200°C 的前提下表现出 $0.038 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 的热导率和在 $750\sim 2500 \text{ nm}$ 波段范围内约96.34%的热辐射反射率,有望在极端环境飞行器的耐热外壳中得到应用。此外,准一维结构构建的互连陶瓷网络能够在维持热性能的基础上实现柔性陶瓷传感器的构建,提供了对高密度压电陶瓷器件的可靠替代。这种具备较高空隙率和适当变形性的纤维陶瓷结构可显著降低松弛时间的滞后,以提高电容式传感设备的响应速度和运行稳定性^[30],进而在飞行器结构变形等场景中得到应用。Guo等人^[31]构建了具有高结构弹性的柔性陶瓷纳米纤维网络,制备了具有高灵敏度($\sim 4.4 \text{ kPa}^{-1}$)和快速响应速度($<16 \text{ ms}$)的电容式传感器件,能够在 370°C 下稳定运行。

除器件外,针对航空航天作业人员的个人防护,热响应纤维材料由于可根据感知外界温度而调节自身结构,进而防止高温灼伤人体,成为一个极富前景的研究方向。Zhang课题组^[32]围绕具有良好机械适应性的航空航天智能纺织品,通过将水凝胶表层均匀涂覆到商业纤维,提出了一种具有皮芯结构的热响应纤维智能纤维。该纤维在高温时通过调整疏水相和离子键之间的相互作用以吸收热量,进而降低穿戴者的体表温度,并通过结构转变增强织物抗冲击性能,极大地提高了功能性和防护性。

2 智能纤维制造进展

智能织物器件的构筑主要包括功能纤维和纱线的制备以及通过织物织造方法实现功能组分与基体组分间的异质集成(图2)。基于此,本节主要介绍功能纤维以及织物的制造方式,二者的异质集成方法不在论述范围内。

智能纤维的制造技术主要包括一维纤维的连续制备、复合纤维的制备及二维/三维结构纤维的制备。其中,一维纤维的连续制备主要通过湿法纺丝、熔融纺丝及静电纺丝来实现,复合纤维的制备主要通过涂覆和镀层来实现^[33],二维/三维结构纤维主要为一维纤维

经过编织、针织、非织造等方式制备得到。

2.1 纤维连续制备方法

2.1.1 湿法纺丝

湿法纺丝的步骤包括将聚合物溶解在合适的溶剂中配成纺丝原液,之后将纺丝原液通过喷丝孔进入凝固浴,溶剂从聚合物基体中扩散至凝固浴中,进而使聚合物固化成纤维,再经过牵伸、干燥等后处理制备得到连续的纤维^[34]。该方法成本低、高效、可规模化。进一步地,湿法纺丝能够便捷地实现具备核壳结构纤维的连续化制备,通过配置不同的组分以形成同轴结构,将功能组分包覆在基体中以抵抗外界腐蚀,或调整纺丝原液和凝固浴参数以控制核壳界面相结构,进而制备高相互作用或高度相分离的多层功能纤维,这有助于异质材料之间的有效集成。例如,通过核壳湿法纺丝工艺制备MXene/芳纶复合纤维,外层芳纶壳保证 502.9 MPa 的高强度和耐腐蚀性,内层MXene组分则维持高导电性($\sim 3 \times 10^5 \text{ S cm}^{-1}$)以及优越的电磁屏蔽性能(83.4 dB),有望在极端环境侦察机的抗反射外壳中得到应用(图3(a))^[35]。

2.1.2 熔融纺丝

熔融纺丝是以聚合物熔体为原料的纺丝过程。熔体中应变诱导结晶,从而形成层状或伸长链晶体,聚合物链沿流动方向取向,而不是静态条件下结晶聚合物常见的球晶微观结构^[36]。该制备方法纺丝速度快、工艺简单、可规模化,被应用于智能纤维的制备领域。Yukse^[37]采用熔融纺丝制备了碳纳米纤维填充PVDF复合纤维。该复合纤维通过后续的编织、机织可得到具备高电磁屏蔽功能的导电纺织品。随着碳纤维负载量和织物层数的增加,其电磁屏蔽功能呈现提高的趋势,预计在军事、航天航空领域具有使用价值。针对当前常规工艺难以制备高强度连续碳纤维增强塑料(continuous carbon fiber reinforced plastic, C-CFRP)的难题,Dong课题组^[38]提出通过熔融挤出法制备具有复杂形状的C-CFRP。通过使用聚乳酸、聚碳酸等不同基质材料制备的短纤维碳增强复合材料,可实现最大 188.65 MPa 的拉伸强度以及 29.12 GPa 的弹性模量。他们开发了工艺模型,以为航空航天飞行器部件的制备提供可靠参考(图3(b))。

2.1.3 静电纺丝

静电纺丝是一种通过对聚合物流体在静电场作用下进行拉伸,使聚合物纤维的直径达到微纳米尺度的

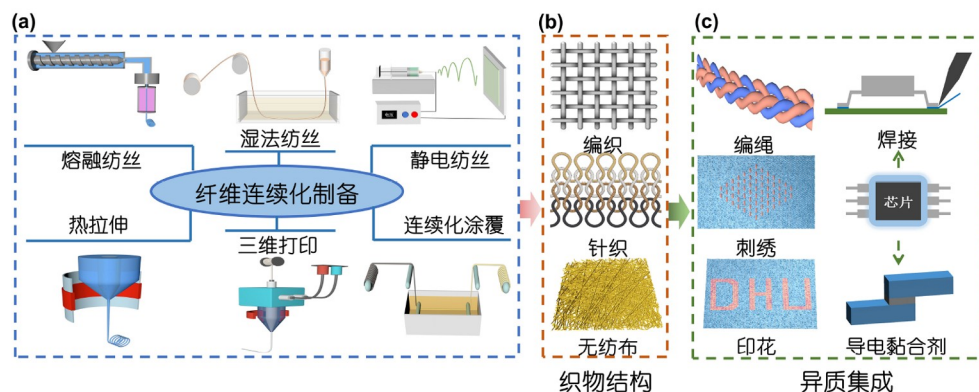


图2 (网络版彩色)智能织物电子器件的常用制备方法。(a) 纤维与纱线;(b) 织物;(c) 异质集成

Figure 2 (Color online) Manufacture methods for smart textiles. (a) Fiber and yarn; (b) fabrics; (c) heterogeneous integration

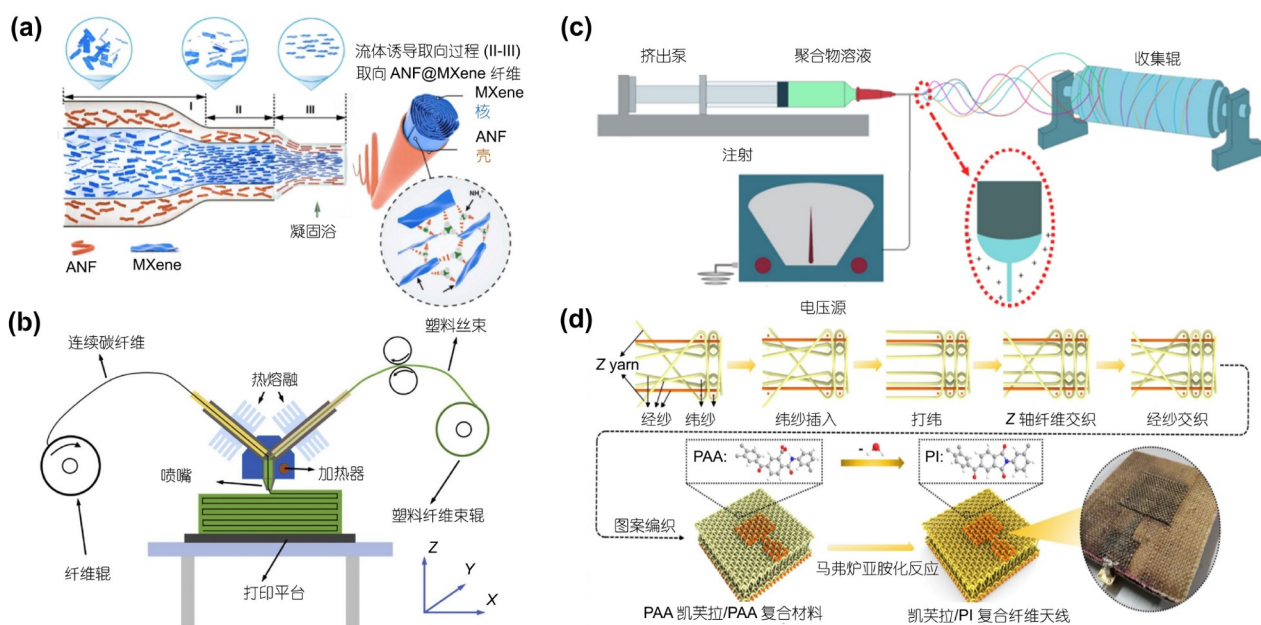


图3 (网络版彩色)各类连续化智能纤维的制备技术。(a) 湿法纺丝^[35];(b) 熔融纺丝^[38];(c) 静电纺丝^[43];(d) 高维编织^[44]

Figure 3 (Color online) Continuous manufacture methods for smart textiles. (a) Wet spinning^[35]; (b) melt spinning^[38]; (c) electro-spinning^[43]; (d) high dimensional weaving^[44]

方法。该制备方法可快速、连续、大量地制备高孔隙率、大比表面积的聚合物纳米纤维^[39]。近20年来,静电纺丝已被广泛用于制备聚合物、陶瓷、碳、复合材料以及分层结构纤维,直径通常从数十纳米到几微米不等。当前,成规模的静电纺丝产业已经出现并投入至聚酰亚胺(polyimide, PI)纤维垫的生产中,用于制备超滤膜材料、防水材料以及电池隔膜等^[40]。由于能够在纺丝过程中原位实现一维纤维向织物的组装,这种技术被认为能够实现应用于飞行器的功能织物的简便制备,如在高温环境下使用的柔性压电/热释电传感器^[41],以

及有望用于宇航服抵抗低温的微纳米纤维气凝胶层等^[42]。Agarwal团队^[43]通过静电纺丝制备了一种碳化钨(HfC)涂层碳纳米纤维,用于高于1850℃极端环境下的航天器组件热保护系统。其中碳纤维通过增韧和桥接作用在极端环境下维持HfC基体的稳定性,并实现相对于单组分碳纤维20倍的热导率提升以及时导出组件热量(图3(c))。

2.2 二维/三维结构纤维织物

二维/三维结构纤维织物主要由一维纤维经过编

织、针织、非织造等方式制备得到。编织是通过交织两组纱线(经纱和纬纱)得到二维/三维结构纤维,得到的织物尺寸稳定性好,可交织、刺绣、承载电话活性材料等,可用于制备大面积功能性织物;针织为织物通过纱线之间的互锁环形成,得到的织物拉伸变形性能较好,可制成具有指定空间结构的二维多轴向编织物和三维多层织物;非织造为织物通过机械、热黏或化学等方法加固而成,得到的织物具多孔性、三维网络结构等。这类织物可通过对间隔层的功能化以实现兼具轻质、强机械减震以及功能性的纺织品电子器件。Xu团队^[44]通过基于芳纶/铜包覆PI的三维编织技术提出了一种应用于航空飞行器的三维微带天线装置。该设备表现出 0.34 g cm^{-3} 的低体积密度和3.8 MPa的抗压强度,并且在2.4 GHz处具备 $< -20 \text{ dB}$ 的 S_{11} 值,具备稳定的电磁性能(增益 $> 5 \text{ dB}$)(图3(d))。

3 智能纤维织物在航空航天中的应用

3.1 结构健康监测

航空航天结构件在长期使用或极端环境使用过程中,会因各种自然或人为因素而不可避免地发生损伤。结构损伤通常指结构局部或整体在材料和几何性能上发生变化,如结构的连接条件、刚度、强度等在使用过程中发生突变,影响结构体系整体的使用性能。其包含突发性损伤和累积性损伤。突发性损伤指外界飓风、雷雨等自然灾害或人为伤害导致的变化;累积性损伤则指结构在长期使用过程中,由于物理老化、疲劳锈蚀等因素产生的损伤。两种损伤均会影响结构的使用与安全。因此,对重要结构件的失效和老化进行定期评估,掌握结构的工作状态,对保证结构安全使用至关重要^[45]。

结构健康监测通过对结构的力学性能进行无损监测,实时监测结构的失效或老化,对结构损伤位置和损伤程度进行诊断,从而对其可靠性、耐久性和承载能力进行智能评估,在结构使用异常时及时发出预警信号,为结构的养护和维修提供指导。利用智能纤维可以有效地将用于组成结构的复合材料与结构健康监测组件融为一体以降低整体的重量。不同于仅能在几个特征位点处进行监测的手持式仪器,智能纤维可同时作为增强组分和功能组分实现对结构件损伤的大范围连续化监测,进而将传统的状态监测技术转变为具有自感知功能的智能系统,为结构的健康监测提供更为及

时完整的信息,进而提高系统的稳定性与安全性。

在结构健康监测中,常用的4种材料包括自感应碳纤维增强复合材料、浸渍压阻基体、整合导电材料(丝或纱线)、表面集成压阻薄膜^[46]。4种传感材料对比见表1,其中自感应碳纤维增强复合材料和浸渍压阻基体方法受限于自身固有性质,分别仅能监测纤维或者基体单一失效方式;表面集成压阻薄膜仅提供实时应变信息,无法判断损伤类型、损伤拓展趋势等。相较而言,整合导电材料(丝或纱线)更具优势,在制备过程中被整合进材料内部,不仅灵敏度可调,也可以同时感应多种失效模式,且形成的织物结构在载荷作用下其接触电阻会发生变化,进而可反映监测表面的大应变场,实现对大应变场的稠密高精度监测。Luo等人^[47]将碳纳米管(carbon nano-tube, CNT)喷涂的纤维(carbon nano-tube fiber, CNTF)、还原氧化石墨烯涂覆的纤维(reduced graphene oxide fiber, rGOF)和碳纤维(carbon fiber, CF)分别编入平纹玻璃纤维布中,实现了不同种的结构健康实时监测体系(图4(a))。之后,为了进一步缩减直径以获得低体积占用的纤维材料,Luo课题组^[48]采用垂直定向激光扫描方法,利用 $16.5 \mu\text{m}$ 的PI纤维制成一维石墨烯纤维,并结合玻璃纤维增强复合材料(glass fiber reinforced plastics, GFRP)实现对固化过程、结构变形、裂纹形成的监测,纤维应变范围内具有灵敏的灵敏度系数(图4(b))。Sodano等人^[49]在芳纶纤维织物的表面采用激光诱导法以增强芳纶纤维与树脂基体之间的结合,并引入电学性能,实现结构健康实时监测。将一维纤维集成至二维织物中可实现对不同功能的整合,并且可通过织物的编织结构实现简易的电路线路排列,以获得高效率的空间利用。基于此,Karim等人^[50]将二硫化钼(MoS_2)和石墨烯沉积至玻璃纤维织物表面,组成三明治结构以实现压力应变的灵敏感应(图4(c))。这种结构可被进一步用于飞行器夹层中对上下层压力进行持续监测,进而得到可靠的健康度数据。针对非自供电的结构检测部件缺乏在极端环境如切断电源情况下的可靠数据监测能力,Li团队^[51]将压电纳米发电机结构集成到传统复合材料中,以开发具有损伤自诊断功能的压电复合材料。当压电复合材料在弯曲载荷下发生形变时,可获得一系列精确的电压反馈(图4(d)),且该压电织物能够准确识别距离中心点一定距离内的冲击载荷随距离远近的电压值,是飞行器结构健康监测的潜在方案。

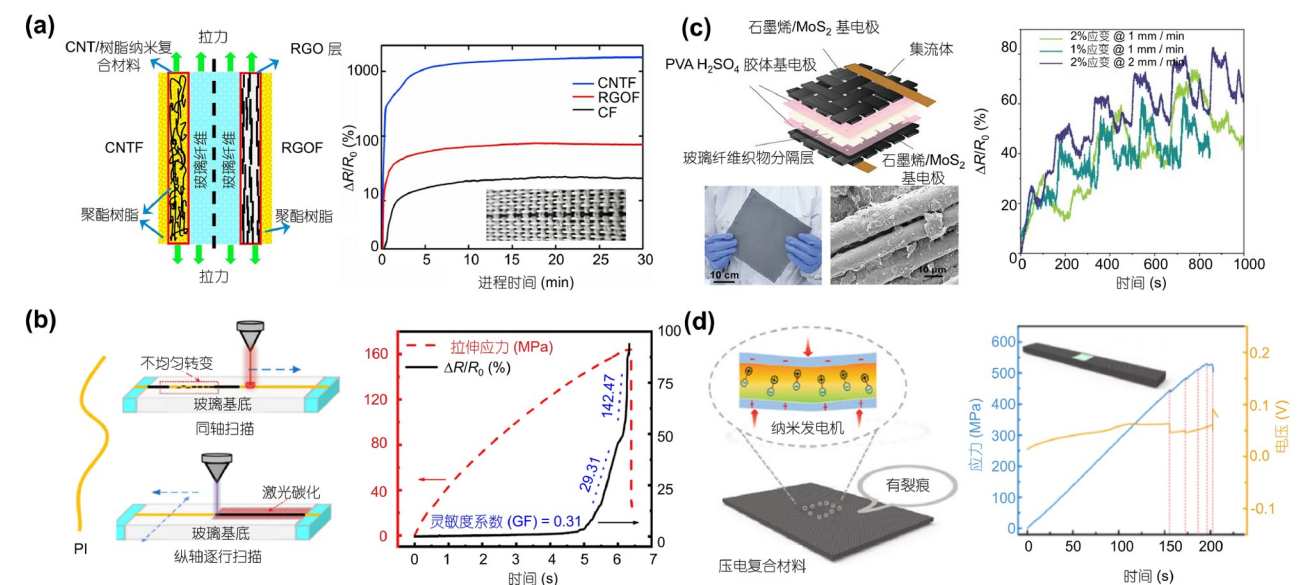


图 4 (网络版彩色)结构健康监测用智能纤维与织物. (a) 基于CNTF、rGOF以及CF包层系统的结构检测纤维^[47]; (b) 基于激光烧蚀PI纤维制备灵敏应变传感器^[48]; (c) 通过二维材料石墨烯和MoS₂制备的多层织物用于夹层应变识别^[50]; (d) 自供电电压电织物, 用于灵敏的压力-电信号传感器^[51]

Figure 4 (Color online) Smart fibers and fabrics used in structural health monitoring. (a) Structural health monitoring fibers based on CNT, rGO, and CF coating structures^[47]; (b) sensitive strain sensor based on laser modulating PI fiber^[48]; (c) multilayer fabrics prepared by two-dimensional materials graphene and MoS₂ for sandwich strain recognition^[50]; (d) self-powered piezoelectric fabrics for sensitive pressure-electric signal sensors^[51]

表 1 4种常用的结构健康监测材料对比^[46]

Table 1 Comparison of four common structure health monitoring materials^[46]

传感材料	灵敏度	感应能力	不足
自感应碳纤维增强复合材料	不可调	纤维失效	无法识别基体失效
具有压阻性能的基体	范围内可调	基体失效	无法识别纤维失效
表面压阻薄膜	可调	感应力变	无法对应多种失效模式
导电丝/纱线	可调	纤维/基体失效	-

3.2 能量回收

在航空航天过程中, 通过将飞行器温度变化以及太阳能等能量转换为电能, 进而为其他部件供电以减少所需携带的蓄电池重量, 被认为是一个有前景的研究方向. 通常, 能源管理器件可在能量转换储能以及自供电传感领域表现出应用潜力. 基于纤维的增强复合材料制备手段保证纤维与基体之间紧密结合, 进而允许隐藏式的能源器件的制造和使用, 这对于需要高空间利用效率和合适重量的航空航天设备而言极为重要. 实际上, 基于纤维的能量转换或存储器件已经引起了人们的关注. 过去20年内, 基于纤维的染料敏化太阳能电池、钙钛矿太阳能电池、聚合物太阳能电池以及超级电容器等能源设备已经得到了迅速的发展^[52], 而基

于摩擦电、压电和热电等的自供电器件也随之被广泛研究. 然而, 航空航天领域要求材料或器件在极端温度、射线等环境下具有耐受性, 这导致现有的多数商品化纤维态能源管理或自供电器件难以在该领域中得到应用. 因此, 研发能够在飞行器中使用的稳定纤维复合能量转换器件, 进而在提高空间利用效率和减轻质量的前提下实现能量调控是当前研究的一个重点.

碳材料具备高电导和热导性能, 并可与多种基体材料复合以形成高机械性能的航空航天复合材料. 当前, 已有部分研究开始探索其在构建应用于飞行器的超高温太阳能能量转换设备方面的可行性. Sciti课题组^[53]开发了一种碳纤维增强硼化铝复合材料用于太阳能吸收材料, 在密度低于3.5 g cm⁻³的前提下实现了在

2100°C下具有稳定的运行效率,并表现出高于0.5的太阳能吸收率和低于0.5的热发射率(图5(a)).基于这种结构-能量复合材料的系统配置,Kucernak等人^[54]提出了一种结构动力复合材料,以实现在飞行器中的快速高密度能量释放,如在紧急情况下为飞行器逃生门提供所需电力,通过在多孔结构横梁中配置基于碳纤维织物和气凝胶的超级电容器,将离子电解质注入整个层压结构中进而实现结构功能一体化放能器件(图5(b)).Wardle等人^[55]提出了一种新的“结构储能器”,用于航空航天级超级电容器提供可靠的分离器解决方案,由电绝缘对齐的氧化铝纳米管组成.除了允许电荷转移外,它还实现了结构或机械鲁棒的功能,保证了<100 μm的短离子扩散距离和18 mS cm⁻¹的离子电导率(图5(c)).面向当前轻质高强的实际需求,Han团队^[56]通过利用受折纸启发的自折叠过程建立了基于CNT薄膜的蜂窝结构,以在复合材料中实现高功率输出的热电发电设备,能够在17°C的低温差中获取21 mV的输出电压以及812 nW的输出功率,并足以驱动对弯曲载荷测量的结构健康监测器件(图5(d)),以期在未来的低空飞行器中得到使用.摩擦纳米发电机(triboelectric nanogenerator, TENG)因结构简单、易于制造且具有高输出

电压,在能量转换和自供电设备中具有良好的使用前景,当前,一些研究聚焦探索高性能材料以满足航空航天中对耐久性、能量密度以及极端环境耐受性的要求^[57].蔚山国立科学技术研究所Park团队^[58]针对机械性能、发电量以及耐用性,通过锌-铜纳米材料改性的编织碳纤维制备了多功能TENG,与后端超级电容器结合制备能量转化-存储一体化器件,实现了8.9 W m⁻²的功率并可为电容器提供1.93 Wh kg⁻¹的能量密度和39.23 W kg⁻¹的功率密度.该设备表现出453.97 MPa的机械强度和35.29 GPa的模量,并具备59.31 J的耐冲击性,可为航空航天设备的微型电子设备提供高稳定的能量来源,有望在降低传统电池组重量和体积方面实现技术进步.

3.3 振动与噪音控制

航空航天结构振动一直以来是个至关重要的问题,微小振动都有导致结构失能的风险.例如,常用来定位和稳定飞机的主轴结构,会受到外部激励发生振动,从而影响飞机定位与稳定.传感和致动材料是结构振动控制系统的核心.传统的压电陶瓷材料,如最为常用的压电陶瓷,硬而脆,难以应用于曲面.利用压电陶瓷制

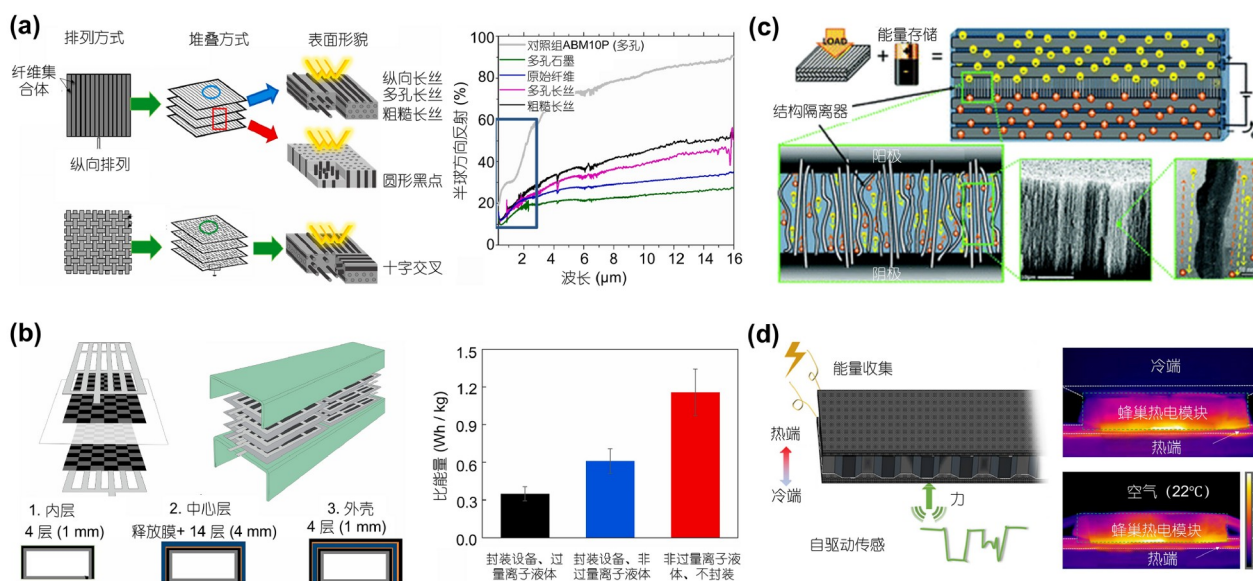


图5 (网络版彩色)能量回收用智能纤维。(a)碳纤维增强硼化锆(ZrB_2)复合材料用于太阳能吸收材料^[53]; (b)在多孔结构横梁中配置基于碳纤维织物和气凝胶的超级电容器^[54]; (c)由电绝缘对齐的氧化铝纳米管组成的超级电容器分离器^[55]; (d)基于折纸启发的自折叠过程建立的CNT薄膜蜂窝结构,用于热电发电^[56]

Figure 5 (Color online) Smart fibers for energy recovery. (a) Carbon fiber reinforced zirconium boride (ZrB_2) composites for solar energy absorbing materials^[53]; (b) supercapacitors based on carbon fiber fabrics and aerogels configured in porous structural beams^[54]; (c) supercapacitor separator consisting of electrically insulating aligned alumina nanotubes^[55]; (d) CNT thin film honeycomb structures built based on the origami-inspired self-folding process for thermoelectric power generation^[56]

备的压电功能器件难以与基体集成,对结构性能存在较大影响,且在大载荷下易失效。

无线压电纤维材料可以解决传统振动控制系统难以架设的问题,实现有效的振动抑制,保障飞行器的安全。美国麻省理工学院在主动压电纤维复合材料(active fiber composites, AFC)的开发中取得了进展^[59],将横截面为圆形的PZT纤维横向阵列排布于环氧聚合物中,并采用双交叉电极设计,进而实现平行纤维极化方向的电场,使AFC具有极高的 d_{33} 值,使封装压电陶瓷应变翻倍,应变能密度提高3倍左右。针对AFC器件需要高驱动电压、高成本的问题,美国国家航空航天局兰利研究中心^[60]研发了压电纤维复合材料(macro fiber composite, MFC),该材料具有轻质、小体积、高柔性和强压电性能等优点,是代替传统压电材料的有力选择,在结构健康监测和振动控制方面广泛应用。该研究中心从传统PZT薄膜晶体中切割出压电纤维,并将其阵列排布在环氧树脂中从而制备成MFC。此后,研究者基于MFC开发了主动振动抑制器件^[61,62],如Luo等人^[63]设计了太阳能电池帆板主动抑振系统,验证了MFC作为致动器和传感器的可行性(图6(a)),基于MFC的逆压电效应,加载电压使其产生驱动力,从而抑制帆板的振动。近年来,为了进一步提高主动控制的灵活性,Qi课

题组^[64]设计了一种可编程的MFC装置以实现振动和声辐射的多频段衰减(图6(b))。

噪音控制与振动控制相类似,主要分为主动式以及被动式控制。当前,基于高声学阻抗的纤维或泡沫材料制造的声反射或吸收器被认为是被动声学抑制的主流。然而,这些材料通常在低频区域具有不佳的性能,并且通常要求厚度为15~100 mm时才具备可观的噪声抑制功能。主动控制则基于压电材料对外界噪声发射失相声波,进而破坏性地干扰大频段内的声音(图6(c))^[65]。当前,主动控制旨在耳膜附近创建一个体积小、低噪声区域,在更大体积和面积中实现噪声抑制的方法主要依靠被动式控制。因此,为了获得应用于航空航天工程所需的大面积、低厚度以及高噪声衰减的纺织品材料,在同一器件中整合被动与主动式降噪被认为是一种有前景的方式。Fink课题组^[65]开发出一种基于主动/被动式噪声抑制压电纺织品,能够实现对噪声反相抑制的同时极大地减小织物本身的声学振动,进而隔绝外界噪声的透过。结果显示,0.13 mm厚的织物能够实现65 dB的噪声衰减,并且能够实现织物表面的声学振动降低95%左右,进而使其传输的声音衰减75%(图6(d))。该研究有望与先进的主动控制算法结合,进而实现对更为复杂的声音信号进行抑制。

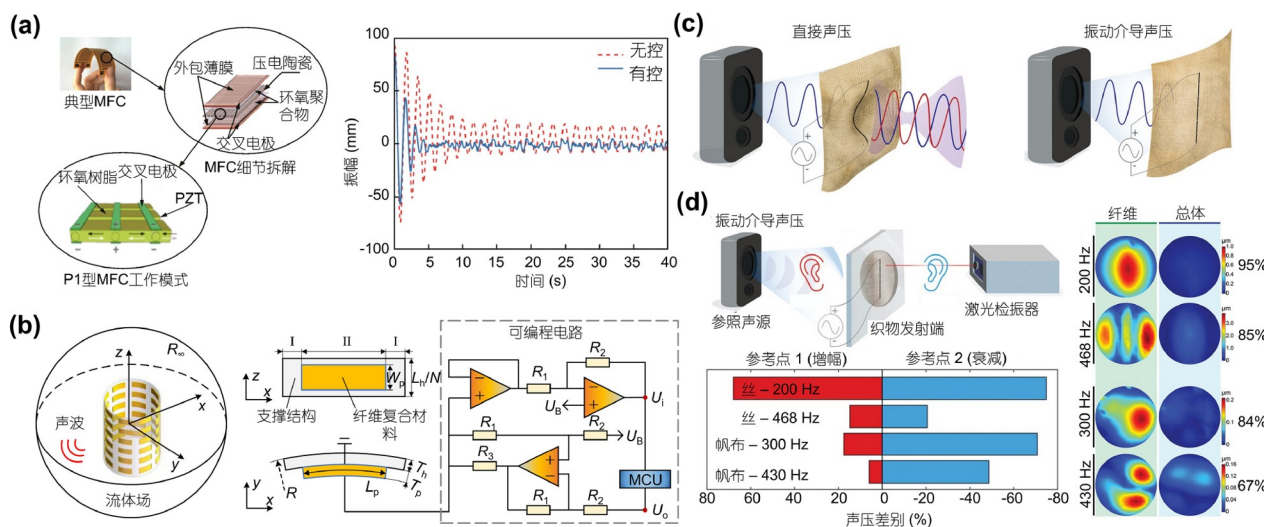


图6 (网络版彩色)基于纤维系统的振动和噪声抑制系统构建。(a)通过MFC构建的振动抑制系统可实现主动控制下的有效振动抑制^[63];(b)基于算法系统的MFC系统,通过可编程的控制手段实现对振动和噪声的多重抑制^[64];(c)基于纤维的主动和被动降噪^[65];(d)基于纤维和织物系统的降噪器件可实现95%的振动滤除以及65 dB的噪音控制^[65]

Figure 6 (Color online) The vibration and noise suppression system based on fibers. (a) Effective vibration suppression under active control can be achieved via the construction of MFC based vibration control systems^[63]; (b) MFC system based on algorithms is able to achieve multi-suppression of vibration and noise^[64]; (c) active noise control and passive noise control based on fibers^[65]; (d) noise reduction devices based on fiber and fabric systems achieve 95% vibration filtering and 65 dB noise control^[65]

4 总结与展望

智能纤维具有传感、通讯、信号处理等功能,并能对外部刺激做出响应,可集成进传统高性能纤维织物中,受到了航空航天领域的广泛关注.通过其实时监测和主动控制,大大增强了飞行器的安全性和可靠性.本文总结了智能纤维的种类与主要制备方法,分析了不同类型智能纤维的材料特性和功能机制,并综述了智能纤维与织物在航空航天领域的最新研究进展,包括其在结构健康监测、能量回收、振动和噪声控制等方面的应用.在结构健康监测方面,将智能纤维直接集成进复合材料如飞机蒙皮中,摆脱了传统结构监测中大量传感器和占用体积大的困扰,且可识别多种失效方式,实现了实时监测应力、应变和温度等参数,并进行数据采集,可及时发现潜在损伤,减少维护成本.在能量回收方面,基于纤维增强复合材料的吸热、热电功能,嵌入机翼、机身等位置,将飞行过程中的温度变化以及太阳能等能量有效地转换为电能,可为应急设备进行充电.在振动和噪音控制方面,目前多基于压电纤维的逆压电效应,设计智能材料,将主动和被动控制相结合,实现抑制效果,从而提升飞行的稳定性和舒适性.

未来在航空航天领域,智能纤维将朝着高集成化和智能化的方向发展,具体涉及以下几方面.(1)材料方面:新型智能纤维材料的开发,如引入功能化涂层,提升纤维材料的功能集成度,开发自修复纤维材料,提升智能纤维电子器件的使用寿命;(2)加工工艺方面:制造工艺有待优化,降低成本,提升制备效率,如开发适用于宏量制备的纤维材料与织物质件,提升智能织物的一致性和使用质量;(3)可靠性方面:智能纤维在实际应用中的可靠性和耐久性有待提升,尤其是在低温、大量辐照等极端环境下,任何微小的损伤在航空航天领域都会带来严重的后果,因此需要开展大量的实验测试,验证智能纤维在极端环境下运行的性能稳定性;(4)功能集成轻量化方面:多功能集成的智能纤维是未来的发展方向,如开发一种自驱动的能实时监测结构健康状态、环境温湿度且能抑制结构振动的智能织物,可极大地减少机载电子设备重量,实现轻量化.

因此,智能纤维与织物通过在新材料开发、制造工艺改进、可靠性提升和多功能集成等方面不断地研究和创新,可实现其在航空航天领域更广泛和深入的应用,从而为航空航天器性能提升和安全保障提供强有力的支持.

参考文献

- 1 Dang T, Zhao M. The application of smart fibers and smart textiles. *J Phys-Conf Ser*, 2021, 1790: 012084
- 2 Scheffler S, Poulin P. Piezoelectric fibers: Processing and challenges. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14: 16961–16982
- 3 Dong K, Peng X, Wang Z L. Fiber/fabric-based piezoelectric and triboelectric nanogenerators for flexible/stretchable and wearable electronics and artificial intelligence. *Adv Mater*, 2020, 32: 1902549
- 4 Zhong W, Jiang H, Jia K, et al. Breathable and large curved area perceptible flexible piezoresistive sensors fabricated with conductive nanofiber assemblies. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12: 37764–37773
- 5 Zhou Y, Zhao L, Tao W, et al. All-nanofiber network structure for ultrasensitive piezoresistive pressure sensors. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14: 19949–19957
- 6 Hu B, Wang H, Wang X, et al. Development, performance research and shape memory multifunctional exploration of epoxy/PEG shape memory nanofibers. *Eur Polym J*, 2024, 202: 112602
- 7 Zhang Q, Rudolph T, Benitez A J, et al. Temperature-controlled reversible pore size change of electrospun fibrous shape-memory polymer actuator based meshes. *Smart Mater Struct*, 2019, 28: 055037
- 8 Schoolaert E, Hoogenboom R, De Clerck K. Colorimetric nanofibers as optical sensors. *Adv Funct Mater*, 2017, 27: 1702646
- 9 Li P, Wang Y, He X, et al. Wearable and interactive multicolored photochromic fiber display. *Light Sci Appl*, 2024, 13: 48
- 10 Hu J, Chen J, Liu P, et al. Near-field electrospinning-enabled direct-write P(VDF-TrFE) nano/micro-fiber-based piezoelectric film for a high-performance airflow sensor. *Sens Actuat A-Phys*, 2022, 336: 113399
- 11 Irfan M S, Ali M A, Khan T, et al. Monitoring the thermomechanical response of aerospace composites under dynamic loading via embedded rGO coated fabric sensors. *Sens Actuat A-Phys*, 2023, 361: 114595
- 12 Kwon H, Jang M S, Yun J M, et al. Design and verification of simultaneously self-sensing and microwave-absorbing composite structures based on embedded SiC fiber network. *Composite Struct*, 2021, 261: 113286
- 13 Ozair H, Khurram A A, Baluch A U H, et al. Shape memory hybrid composites for aerospace applications. *Mater Sci Forum*, 2022, 1068: 93–100

- 14 Costanza G, Tata M E. Shape memory alloys for aerospace, recent developments, and new applications: A short review. *Materials*, 2020, 13: 1856
- 15 Zhou Y, Ren L, Zang J, et al. The shape memory properties and actuation performances of 4D printing poly (ether-ether-ketone). *Polymers*, 2022, 14: 3800
- 16 Li Y, Zhang F, Liu Y, et al. A tailorable series of elastomeric-to-rigid, selfhealable, shape memory bismaleimide. *Small*, 2024, 20: 2307244
- 17 Deng Y, Zhang F, Liu Y, et al. Design and synthesis of shape memory phenol-formaldehyde with good irradiation resistance, thermal, and mechanical properties. *ACS Appl Polym Mater*, 2022, 4: 5789–5799
- 18 Roach D J, Sun X, Peng X, et al. 4D printed multifunctional composites with cooling-rate mediated tunable shape morphing. *Adv Funct Mater*, 2022, 32: 2203236
- 19 Wang Y, Zheng Y, Sheng L, et al. Ultra-tough and highly ordered macroscopic fiber assembly from 2D functional metal oxide nanosheet liquid crystals and strong ionic interlayer bridging. *Nanoscale*, 2020, 12: 1374–1383
- 20 Xia Y, Mu T, Liu Y, et al. Harnessing the power of carbon fiber reinforced liquid crystal elastomer composites for high-performance aerospace materials: A comprehensive investigation on reversible transformation and shape memory deformation. *Compos Part A-Appl Sci Manufacturing*, 2024, 177: 107943
- 21 Wang Z, Chen Z, Ma L, et al. Optical microfiber intelligent sensor: Wearable cardiorespiratory and behavior monitoring with a flexible wave-shaped polymer optical microfiber. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2024, 16: 8333–8345
- 22 Amanzadeh M, Aminossadati S M, Kizil M S, et al. Recent developments in fibre optic shape sensing. *Measurement*, 2018, 128: 119–137
- 23 Bu Y, Wu Y, Lei Z, et al. Local chemical fluctuation mediated ductility in body-centered-cubic high-entropy alloys. *Mater Today*, 2021, 46: 28–34
- 24 Liu C, Chu Y, Fu X, et al. A fiber cantilever beam vibration sensor with air cavity based on intensity modulation. *Optical Fiber Tech*, 2021, 67: 102732
- 25 Khadak A, Subeshan B, Asmatulu R. Studies on de-icing and anti-icing of carbon fiber-reinforced composites for aircraft surfaces using commercial multifunctional permanent superhydrophobic coatings. *J Mater Sci*, 2021, 56: 3078–3094
- 26 Guo H, Liu M, Xie C, et al. A sunlight-responsive and robust anti-icing/deicing coating based on the amphiphilic materials. *Chem Eng J*, 2020, 402: 126161
- 27 Cheng Y, Ma B, Hu P, et al. Flexible and transformable ceramic aerogels via a fire-reborn strategy for thermal superinsulation in extreme conditions. *Adv Funct Mater*, 2023, 33: 2309148
- 28 Zhang W, Li J, Chen M, et al. Mass production of polymer-derived ceramic nanofibers through solution blow spinning: Implications for flexible thermal insulation and protection. *ACS Appl Nano Mater*, 2023, 6: 21048–21057
- 29 Xie Y, Wang L, Peng Y, et al. High temperature and high strength $Y_2Zr_2O_7$ flexible fibrous membrane for efficient heat insulation and acoustic absorption. *Chem Eng J*, 2021, 416: 128994
- 30 Huang S, Guo C F, Zhang X, et al. Buckled tin oxide nanobelt webs as highly stretchable and transparent photosensors. *Small*, 2015, 11: 5712–5718
- 31 Fu M, Zhang J, Jin Y, et al. A highly sensitive, reliable, and high-temperature-resistant flexible pressure sensor based on ceramic nanofibers. *Adv Sci*, 2020, 7: 2000258
- 32 Sun C, Luo J, Yan S, et al. Thermally responsive fibers for versatile thermoactivated protective fabrics. *Adv Funct Mater*, 2023, 33: 2211035
- 33 Wang W J, Cao L B, Guo R H. Development status and application of conductive fibers (in Chinese). *J Text Sci Eng*, 2024, 41: 101–110 [王维杰, 曹良波, 郭荣辉. 导电纤维的发展现状及应用. *纺织科学与工程学报*, 2024, 41: 101–110]
- 34 Younes B. Smart E-textiles: A review of their aspects and applications. *J Ind Text*, 2023, 53: 15280837231215493
- 35 Liu L X, Chen W, Zhang H B, et al. Super-tough and environmentally stable aramid. Nanofiber@MXene coaxial fibers with outstanding electromagnetic interference shielding efficiency. *Nano-Micro Lett*, 2022, 14: 111
- 36 Lund A, van der Velden N M, Persson N K, et al. Electrically conducting fibres for e-textiles: An open playground for conjugated polymers and carbon nanomaterials. *Mater Sci Eng-R-Rep*, 2018, 126: 1–29
- 37 Yuksek M. Electromagnetic wave shielding and mechanical properties of vapor-grown carbon nanofiber/polyvinylidene fluoride composite fibers. *J Eng Fibers Fabr*, 2020, 15: 155892502098595
- 38 Wang F, Zhang Z, Ning F, et al. A mechanistic model for tensile property of continuous carbon fiber reinforced plastic composites built by fused filament fabrication. *Addit Manuf*, 2020, 32: 101102
- 39 Liu L, Xu W, Ding Y, et al. A review of smart electrospun fibers toward textiles. *Compos Commun*, 2020, 22: 100506
- 40 Ding Y, Hou H, Zhao Y, et al. Electrospun polyimide nanofibers and their applications. *Prog Polym Sci*, 2016, 61: 67–103
- 41 Teng X, Wang Z, Wu Y, et al. Enhanced alkaline hydrogen evolution reaction of MoO_3/Ni_3S_2 nanorod arrays by interface engineering. *Nano Energy*, 2024, 122: 109299
- 42 Wang S, Zhao X, Yang Z, et al. Direct assembly of aerogel micro-nanofiber/mxene sponges with dual-network structures for all-day personal heating. *Adv Funct Mater*, 2024, 34: 2316657

- 43 Nisar A, Lou L, Boesl B, et al. Enhanced flexibility and thermal conductivity of HfC decorated carbon nanofiber mats. [Carbon](#), 2023, 205: 573–582
- 44 Zhang K, Zheng L, Aouraghe M A, et al. Ultra-light-weight kevlar/polyimide 3D woven spacer multifunctional composites for high-gain microstrip antenna. [Adv Compos Hybrid Mater](#), 2022, 5: 872–883
- 45 Wang Y, Hu S, Xiong T, et al. Recent progress in aircraft smart skin for structural health monitoring. [Struct Health Monitoring](#), 2022, 21: 2453–2480
- 46 Ince J C, Peerzada M, Mathews L D, et al. Overview of emerging hybrid and composite materials for space applications. [Adv Compos Hybrid Mater](#), 2023, 6: 130
- 47 Wang G, Wang Y, Zhang P, et al. Structure dependent properties of carbon nanomaterials enabled fiber sensors for *in situ* monitoring of composites. [Composite Struct](#), 2018, 195: 36–44
- 48 He M, Wang Y, Wang S, et al. Laser-induced graphene enabled 1D fiber electronics. [Carbon](#), 2020, 168: 308–318
- 49 Nasser J, Groo L A, Zhang L, et al. Laser induced graphene fibers for multifunctional aramid fiber reinforced composite. [Carbon](#), 2020, 158: 146–156
- 50 Dulal M, Islam M R, Maiti S, et al. Smart and multifunctional fiber-reinforced composites of 2D heterostructure-based textiles. [Adv Funct Mater](#), 2023, 33: 2305901
- 51 Zhao B, Cheng Z, Zhu Y, et al. Self-diagnosis of structural damage in self-powered piezoelectric composites. [Compos Sci Tech](#), 2024, 252: 110619
- 52 Ma W, Zhang Y, Pan S, et al. Smart fibers for energy conversion and storage. [Chem Soc Rev](#), 2021, 50: 7009–7061
- 53 Zoli L, Failla S, Sani E, et al. Novel ceramic fibre—Zirconium diboride composites for solar receivers in concentrating solar power systems. [Compos Part B-Eng](#), 2022, 242: 110081
- 54 Nguyen S, Anthony D B, Katafiasz T, et al. Manufacture and characterisation of a structural supercapacitor demonstrator. [Compos Sci Tech](#), 2024, 245: 110339
- 55 Acuan L H, Zhou Y, Kalfon-Cohen E, et al. Multifunctional nanocomposite structural separators for energy storage. [Nanoscale](#), 2019, 11: 21964–21973
- 56 Wan K, Kernin A, Ventura L, et al. Toward self-powered sensing and thermal energy harvesting in high-performance composites via self-folded carbon nanotube honeycomb structures. [ACS Appl Mater Interfaces](#), 2023, 15: 44212–44223
- 57 Qi Y, Liu G, Bu T, et al. Ferromagnetic-based charge-accumulation triboelectric nanogenerator with ultrahigh surface charge density. [Small](#), 2022, 18: 2201754
- 58 Deka B K, Hazarika A, Kwak M J, et al. Triboelectric nanogenerator-integrated structural supercapacitor with *in situ* MXene-dispersed N-doped Zn–Cu selenide nanostructured woven carbon fiber for energy harvesting and storage. [Energy Storage Mater](#), 2021, 43: 402–410
- 59 Bent A A, Pizzochero A E. Recent advances in active fiber composites for structural control. [Smart Struct Mater](#), 2000, 3991: 244–254
- 60 Wilkie W, Bryant R, High J, et al. Low-cost piezocomposite actuator for structural control applications, [Smart Struct Mater](#), 2000, 3991: 323–334
- 61 Williams D, Haddad Khodaparast H, Jiffri S, et al. Active vibration control using piezoelectric actuators employing practical components. [J Vib Control](#), 2019, 25: 2784–2798
- 62 Vishal P, Kaliperumal D, Padhi R. Active vibration suppression of nonlinear cantilever beam using shape memory alloy actuators. [IFAC-PapersOnLine](#), 2018, 51: 130–135
- 63 Luo H. Active vibration suppression of solar array based on MFC. [MET](#), 2020, 9: 647–655
- 64 Dai S, Zheng Y, Mao J, et al. Vibro-acoustic control of a programmable meta-shell with digital piezoelectric shunting. [Int J Mech Sci](#), 2023, 255: 108475
- 65 Yang G H, Lin J, Cheung H, et al. Single layer silk and cotton woven fabrics for acoustic emission and active sound suppression. [Adv Mater](#), 2024, 36: 2313328

Summary for “航空航天用智能纤维与制品”

Smart fibers and products for aerospace applications

Yuwen Zhu, Haoyu Wang, Hengda Sun, Gang Wang^{*} & Meifang Zhu

State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China

^{*} Corresponding author, E-mail: gwf8707@dhu.edu.cn

Smart fibers have functions such as sensing, communication, signal processing, etc., and can respond to external stimuli. When integrated into traditional high-performance fiber fabrics, they attract widespread attention in the aerospace field. Through real-time monitoring and active control, they greatly enhance the safety and reliability of aircraft. This review mainly introduces four main smart fibers according to their sensing mechanisms: Piezoelectric fibers, piezoresistive fibers, shape memory fibers, optical fiber materials. Then manufacturing methods of these smart fibers and products are summarized from 1D fiber to 2D and 3D textile structures. We review the latest research progress of smart fibers and fabrics in the aerospace field, including their applications in structural health monitoring, energy harvesting, vibration and noise control, etc. In terms of structural health monitoring, smart fibers are directly integrated into composite materials, such as those used for aircraft skins, eliminating the problem of multiple sensors and large volume occupation in traditional structural health monitoring. They can identify multiple failure modes, achieve real-time monitoring of many parameters such as stress, strain, and temperature simultaneously, and collect data to timely warn of potential damage, which is able to reduce maintenance costs. For energy harvesting, fiber materials with piezoelectric, thermoelectric, and triboelectric effects can be embedded in locations such as wings and fuselages, effectively converting vibration and thermal energy generated during flight into electrical energy to provide power for sensors and other on-board electronics, reducing the vehicle's dependence on large-mass energy storage devices and thus improving flexibility. Moreover, these fibrous materials can usually be used in conjunction with flexible and lightweight energy storage devices to maximize energy savings and efficiency. In terms of vibration and noise control, currently, smart materials based on the inverse piezoelectric effect of piezoelectric fibers are designed to combine active and passive control to suppress the unwanted vibration of structures, thereby enhancing the stability and comfort.

This review also points out that smart fibers in the aerospace field will develop towards high integration and intelligence, involving: (1) Development of new smart fiber materials, such as the introduction of functionalized coatings to enhance the functional integration of fiber materials, and the development of self-repairing fiber materials to refine the service life of smart fiber electronic devices. (2) Optimization of the manufacturing processes to achieve mass production of fiber materials in a simple and efficient way. (3) Improvement of the reliability and durability of smart fibers in practical applications. Structural modification and other methods should be taken to ensure reliable performance of the fiber material in use. (4) Development of multi-functional integrated smart fibers. Through continuous research and innovation, smart fibers and textiles can achieve more extensive and in-depth applications in the aerospace field, thereby providing strong support for improving the performance and safety of aerospace vehicles.

smart fiber, aerospace, structural health monitoring, energy harvest, vibration control

doi: [10.1360/TB-2024-0584](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0584)