



弹性聚合物光纤的制备及其在传感中的应用研究进展

杨佳蕾, 周文琪, 张泽祺, 杨兆伟, 余柔会, 潘绍武*, 侯恺*, 陈国印*, 朱美芳

东华大学材料科学与工程学院, 先进纤维材料全国重点实验室, 上海 201620

* 联系人, E-mail: pansw@dhu.edu.cn; houkai711@dhu.edu.cn; chengy@dhu.edu.cn

2025-05-20 收稿, 2025-07-21 修回, 2025-07-23 接受, 2025-07-24 网络版发表

上海市教育委员会晨光计划(24CGA36)资助

摘要 随着医疗光子技术的快速发展, 光纤器件在传感与诊疗中的应用需求迅速增长, 对材料的机械柔韧性、可拉伸性、生物相容性乃至可降解性提出了更高要求. 传统硅基或硬质聚合物光纤由于具有较高的力学模量和较差的柔韧性, 且与人体组织机械性能失配, 存在生物相容性不足及可能损伤脆弱组织的风险, 严重制约其在动态生理环境中的应用. 而弹性聚合物光纤凭借柔软的机械特性、优异的生物相容性、显著的可拉伸形变能力以及结构与功能多样性脱颖而出, 成为解决上述瓶颈的关键材料, 并广泛应用于组织工程、信号传输、生物传感等领域. 本文主要综述了弹性聚合物光纤材料的定义、分类、制备和应用, 探究并总结了当前该材料在传感领域的发展现状及存在的问题, 对于推动弹性聚合物光纤的进一步开发具有一定的指导意义.

关键词 弹性聚合物光纤, 制备技术, 响应原理, 传感应用

光纤是一类具有光导传输功能的纤维材料, 在通信、医疗等领域具有广阔的应用前景^[1~5]. 光纤材料主要包括硅光纤和聚合物光纤. 硅光纤是一类以二氧化硅为原料, 通过热拉伸技术制备得到的光纤材料, 在可见和近红外光谱范围内具有优异的透明性、较高的机械强度和化学惰性, 通常其光衰减小于2 dB/km^[6,7], 这些特性使得硅光纤成为长距离光通信和短距离数据互联的主要选择, 但是这种光纤质地较硬、较脆, 难以弯折^[8~10]. 而聚合物光纤主要是由透光性优异的聚合物制备得到, 可分为硬质聚合物光纤和弹性聚合物光纤. 硬质聚合物光纤性质与硅基光纤相接近, 主要是以刚性高分子聚合物如聚苯乙烯(polystyrene, PS)、聚甲基丙烯酸甲酯(poly(methyl methacrylate), PMMA)、聚碳酸酯(polycarbonate, PC)为原料制备得到的一类光纤材料. 由于材料可熔融或溶液加工的特性, 并且其熔点远低于硅基玻璃, 硬质聚合物光纤材料的制备相比于硅基玻璃光纤具有更简单、易操作的优势^[11,12]. 弹性

聚合物光纤是一类由柔性高分子材料构成的光纤, 如聚乙二醇二丙烯酸酯(poly(ethylene glycol) diacrylate, PEGDA)基水凝胶光纤^[13~15]、聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)光纤^[16~18]、聚乳酸(polylactic acid, PLA)光纤^[19~21]等, 这类光纤不仅具备优异光导特性, 还兼具高弹性和可拉伸性, 展现出良好的柔韧性和形变适应能力.

随着新兴医疗技术对光子器件的需求不断增加, 对植入式光纤材料也提出了更多要求, 如机械柔韧性、可拉伸性、生物相容性甚至生物可降解性. 然而, 传统光纤材料(硅光纤和硬质聚合物光纤)由于力学模量高、柔韧性差, 在拉伸、扭曲和弯曲等形变条件下易发生断裂或损伤, 限制了其在需承受形变的服役环境中的应用; 并且与人体组织机械性能严重失配, 不仅缺乏必要的生物相容性, 其刚性结构还可能对周围脆弱生物组织造成机械损伤^[22~24]. 相比之下, 弹性聚合物光纤具有良好的生物相容性、可拉伸性以及功能和结构的

引用格式: 杨佳蕾, 周文琪, 张泽祺, 等. 弹性聚合物光纤的制备及其在传感中的应用研究进展. 科学通报

Yang J, Zhou W, Zhang Z, et al. Research progress on the preparation of elastic polymer optical fibers and their applications in sensing (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: 10.1360/CSB-2025-0705

可设计性等特点,在生物医学领域展现出广阔的应用前景.这类材料既可用于开发柔性可穿戴医疗设备,进行体外无创监测与治疗,又可作为可植入式光纤器件,在体内进行精准的光学诊疗,极大地拓宽了光电子器件的功能和应用范围^[25,26].目前,用于制备弹性聚合物光纤的原料主要是采用具有高缠结或低交联度的柔性聚合物,例如丙烯酸胺类聚合物、聚氨酯等,并依据所需光纤材料的特性发展了包括模板法^[27~29]、热拉伸法^[30,31]、湿法纺丝^[32~34]、动态聚合纺丝^[35,36]、微流控纺丝^[37~39]等制备工艺.

本综述针对含水/无水弹性聚合物光纤体系,在其制备工艺、响应原理和传感应用等方面(图1)展开详细综述,通过分析其加工原理和性能探讨基于弹性聚合物光纤所开发的传感器的设计思路和适用范围,并对未来面临的挑战和前景进行讨论和展望.

1 弹性聚合物光纤概述

1.1 弹性聚合物光纤的分类

依据其组成中是否含有水分,弹性聚合物光纤可分为含水弹性聚合物光纤(即水凝胶光纤)和无水弹性聚合物光纤.这两类弹性聚合物因各自独特的性质,在不同应用领域中都表现出独特的优势.水凝胶光纤凭借其高含水量、类组织模量及优异的生物相容性,在长期植入应用(如深部组织下光遗传学刺激、光治疗与生物传感等)中具有独特优势,但其力学性能和稳定性仍是需要克服的主要挑战.相比之下,以PDMS为代表的无水弹性聚合物光纤则展现出优异的力学弹性、良好环境稳定性,使其成为可穿戴健康监测(如温度、应变传感)和体外柔性光电子器件的理想选择.表1系统对比了两类光纤的主要特性差异,含水与不含水弹性聚合物光纤在原料的选择、光学性能、力学性能及加工方法等方面有着显著的差异,下文将对其展开详细描述.

1.1.1 含水弹性聚合物光纤

近年来,水凝胶光纤作为一种新型弹性聚合物光纤材料逐渐受到关注,它不仅具备水凝胶材料的柔软、湿润、高湿度、刺激响应性等特性,还融合了纤维材料的高长径比、各向异性和柔性等优势,相较于传统光纤材料展现出更具优异的生物相容性,因此在组织工程、柔性电子器件、生物传感等领域具有广阔的应用前景^[48].

通常而言,用于制备水凝胶材料的原料均可用于水凝胶纤维的构建.例如,Applegate等人^[49]报道了一种阶跃型折射率的丝素蛋白/水凝胶光纤,由丝素蛋白芯层(折射率为1.54)和水凝胶皮层(折射率为1.34)组成.由于丝素蛋白和水凝胶之间存在足够大的折射率差异,使得光在界面形成全反射,从而形成有效的光导效应.这种光纤具有良好的柔韧性、生物相容性和低光损耗(2.0 dB/cm),可用于生物体深层组织下成像和治疗的应用.然而,常见的水凝胶材料因聚合物网络不均匀且缺乏有效的能量耗散机制,导致其脆性较大、易碎,在高应力或高应变情况下难以维持结构稳定性^[50].为提升水凝胶光纤的力学性能,Guo等人^[41]设计了一种可拉伸至700%的应变传感水凝胶光纤,其网络结构主要由离子交联的海藻酸钙网络和共价交联的聚丙烯酰胺网络互穿而成,展现出良好的拉伸能力和高断裂能($\sim 9000 \text{ J/m}^2$).其中共价交联的长链聚合物使水凝胶具有很高的可拉伸性,而可重构的离子交联聚合物通过在变形下耗散机械能来增强水凝胶的韧性.此外,该团队还利用光纤独特的物理和光学特性,开发了一种新颖的应变传感应用,展示了其在穿戴传感器和植入式治疗设备领域的潜在价值.

鉴于水凝胶光纤独特的生物相容性,其特别适用于生物组织下的光学信号传感.例如,Chen等人^[35]制备了一种基于海藻酸钠皮层及凝胶单体(PEGDA和丙烯酸胺)芯层的水凝胶光纤,可用于光遗传学刺激.实验结果表明,该光纤在生物体内具有良好的生物相容性、光导性以及机械性能,能够在深入组织时避免造成严重或不可逆的损伤.组织切片分析显示,与传统光纤相比,该材料引发的炎症反应更低.此外,该团队还验证了该水凝胶光纤在深层组织光医学中的应用潜力,如深入组织的光热癌症治疗以及脑接口通信中的光遗传学刺激,显著拓展了水凝胶光纤的应用范围.

1.1.2 无水弹性聚合物光纤

光纤的机械性能是衡量其是否适用于生物医学领域的重要指标之一.尽管含水弹性聚合物光纤具有与软组织相似的机械性能,但其适用的工作环境通常为溶胀状态,当长时间失水时其力学性能和光学性能均会劣化,致使光纤变硬、变脆并最终失效.为拓宽弹性聚合物光纤在非潮湿环境中的应用,研究人员已探索多种无水弹性聚合物作为光纤原料^[8].

PDMS是一类典型的无水弹性聚合物,广泛应用于制备柔性光纤^[51].作为一种有机硅弹性体,PDMS具有

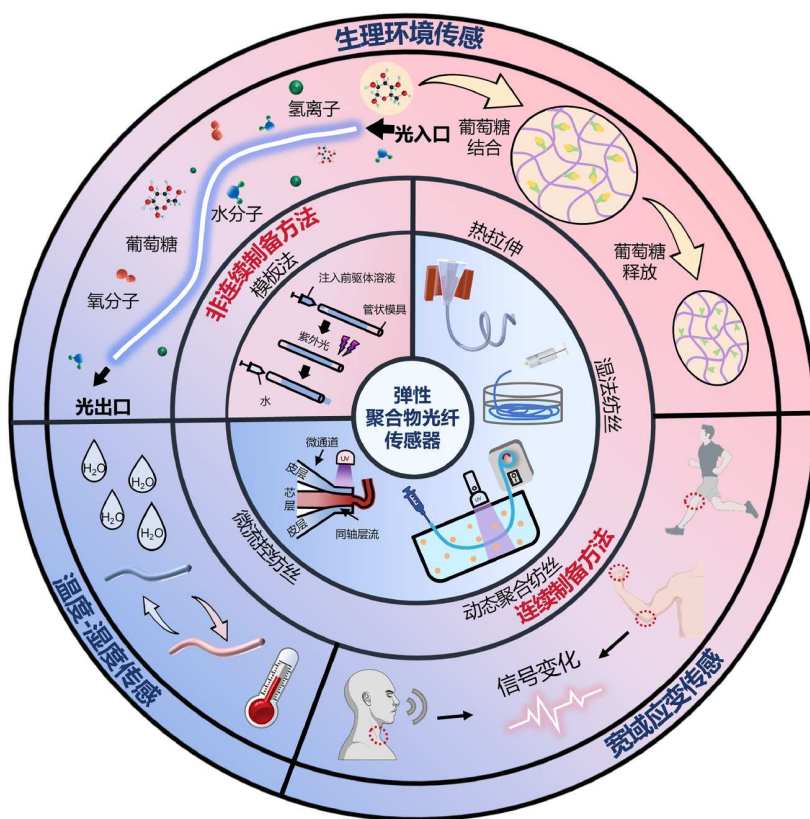


图 1 (网络版彩色)弹性聚合物光纤概述

Figure 1 (Color online) Overview of elastic polymer optical fibers

表 1 含水弹性聚合物光纤和无水弹性聚合物光纤特性对比

Table 1 Comparison of the properties of aqueous and anhydrous elastic polymer fibers

类别	代表材料	折射率	光衰减(dB/cm)	杨氏模量	加工方法	生物相容性	应用领域	文献
含水	PEGDA	1.35~1.5	0.17~0.45	0.08~2.58 MPa	模板法、动态聚合纺丝、微流控纺丝	极佳	生理环境监测、光遗传学、可穿戴传感	[35,40,41]
	丝素蛋白	1.53	0.28~2	5~80 kPa	湿法纺丝	极佳	体内传感、光医学	[33,42]
	纤维素	1.47~1.51	0.56~0.82	1.4~23.9 GPa	湿法纺丝、微流控纺丝	优良	生物医学、组织工程	[43,44]
无水	PDMS	1.41~1.47	0.3~0.5	0.57~3.7 MPa	模板法	良好	可穿戴传感	[16,45]
	PLA	1.46~1.48	1.5	3.5 GPa	模板法	良好	短期植入探针、微创诊断	[46]
	聚氨酯	1.46	2	0.3 MPa	模板法	良好	可穿戴传感	[47]

高透明度、化学惰性、优异的柔韧性以及简单的制备工艺, 在光学器件领域极具吸引力^[22,52]. Guo等人^[16]报道了一种柔性、可拉伸且生物相容的光学温度传感器. 该传感器通过将温度敏感的上转换纳米颗粒(upconverting nanoparticles, UCNPs)掺入PDMS光纤中制备而成, 并采用阶跃型折射率的皮芯结构设计, 实现高效的

光传导. 该传感器在25~70℃范围内表现出良好的线性响应和快速反应能力, 在高达80%的应变下仍保持结构稳定性和功能完整性, 能够适应人体运动带来的形变, 适用于实时监测口腔、鼻腔呼吸及皮肤等部位的温度变化, 有望应用于可穿戴健康监测. 为进一步探索无水弹性聚合物光纤在温度传感领域的应用, Song等人^[45]

开发了一种柔性可穿戴光学温度传感器, 通过将锰离子(Mn^{2+})激活的双波长发光材料 $\text{Li}_2\text{ZnSiO}_4:\text{Mn}^{2+}$ 掺杂于PDMS光纤中制备而成. 该传感器在 $-20\sim 100^\circ\text{C}$ 范围内实现了高精度($\pm 0.2^\circ\text{C}$)和可重复的比率式温度检测, 在弯曲变形条件下仍能维持稳定的传感性能, 可用于实时监测呼吸气流温度变化, 并成功集成于口罩中实现健康监测功能, 为可穿戴设备的设计与材料选择提供了新的思路与策略.

1.2 弹性聚合物光纤的制备技术

弹性聚合物光纤的制备技术呈现显著的多元化特征, 其工艺路线的选择需依据原料的化学特性、机械性能及目标应用场景进行适配和优化. 目前, 弹性聚合物光纤的制备技术主要包括模板法、热拉伸法、湿法纺丝、动态聚合纺丝、微流控纺丝等. 并且, 根据其制备的连续性, 上述方法可分为非连续制备方法和连续制备方法, 其中前者通常适用于具有复杂结构的光纤成型, 而连续制备方法则更有利于纤维产品的规模化生产.

1.2.1 非连续制备方法

非连续制备方法作为光纤制备技术中的一种基础工艺, 为构筑结构多样、功能复杂的光纤器件提供了可行技术路径. 其中, 模板法因其结构复现精度高、多材料兼容性强等优势, 在非连续制备体系中受到广泛关注. Zhao等人^[47]通过设计模具结构成功制备出可拉伸光导器件(图2(a)), 该器件在与多色LED集成并结合软体机器人技术后, 构建出具有主动感知功能的仿生假肢系统. 值得注意的是, 该技术的应用范畴已突破传统无水弹性聚合物体系, 近年来更拓展至水凝胶光纤领域.

由于水凝胶网络具有不可逆交联特性及预聚液低黏度特征, 其纤维化过程面临显著的技术挑战^[53]. 一方面, 三维交联网络结构限制了其熔融或溶液加工的可行性; 另一方面, 凝胶化前驱体缺乏实现连续牵伸所需的流变性能而无法维持前驱体溶液纺丝的连续性. 针对以上问题, Choi等人^[28]提出了一种模板限域光聚合策略(图2(b)), 采用硅胶管作为模板, 通过紫外光引发聚乙二醇(polyethylene glycol, PEG)原位固化形成纤维芯层, 并进一步通过海藻酸钠溶液浸渍与 Ca^{2+} 离子交联构筑皮芯结构, 成功实现了对水凝胶光纤直径的精确调控. 然而, 该方法仍受限于模板尺寸约束, 难以实现纤维长度与结构层次性的同步提升.

现有研究表明, 尽管非连续制备技术在材料适用性和结构多样性方面具有独特优势, 但在多尺度结构协同构筑和制备效率等方面仍存在明显局限. 这一技术瓶颈凸显了发展新型连续制备系统的迫切需求, 有望为柔性光电、生物医学传感等前沿应用提供革新性材料平台.

1.2.2 连续制备方法

非连续制备体系在时间效率和规模化生产能力方面存在明显局限, 因此, 开发高效、连续的弹性聚合物光纤制备技术已成为突破该领域产业化瓶颈的关键路径. 当前研究主要集中在热拉伸法、湿法纺丝、微流控纺丝和动态聚合纺丝等连续制备工艺.

热拉伸法因其良好的可扩展性而被广泛采用^[54,55]. 例如, Qu等人^[31]通过调控熔融拉伸参数, 成功制备出具有500%拉伸性能的热塑性弹性体(thermoplastic elastomer, TPE)光纤(图3(a)). 该团队对预制体结构进行了定制化设计, 首先利用三维成型技术制备具有目标功能结构的预制体, 随后在热拉伸塔内实施梯度温度调控, 当预制体达到黏弹态转变温度后进行定向拉伸, 从而实现对纤维截面形貌的精准控制. 尽管该方法具备可自定义设计纤维截面形状的优势, 但由于预制体预处理工序复杂、工艺窗口狭窄等问题, 目前尚未大规模应用于产业化生产.

湿法纺丝作为传统连续制备方法之一, 其核心机理是通过溶剂扩散诱导相分离, 并结合离子交联协同作用实现纤维成型^[56]. 该工艺流程主要包括: 将纺丝原液经挤出泵输送至喷丝孔, 挤出形成纺丝细流; 细流进入凝固浴后发生溶剂与溶质间的传质交换, 从而触发聚合物链段的重排与固化; 最终通过牵取向和后处理获得高取向度纤维. Qu等人^[58]基于上述原理开发了一种聚氨酯/碳纳米管复合凝胶纤维的连续制备工艺. 该研究采用去离子水作为凝固浴, 通过调控纺丝液浓度与牵伸速度比, 成功构建了具有电响应特性的光纤压力传感器. Zhang等人^[59]则进一步突破传统湿法纺丝的技术局限, 利用细菌纤维素水凝胶的自交联特性, 通过优化纺丝速度与原料配比, 实现了无需额外添加交联剂的纯天然水凝胶纤维的连续制备(图3(b)), 所制备的纤维展现出优异的力学性能.

微流控纺丝技术融合了微流控技术与湿法纺丝的优势, 为复杂结构光纤的精准构筑提供了新的技术路径. 该技术采用精密加工的微通道替代传统喷丝板, 通过调控层流界面实现复杂结构的微纤组装^[60~63]. 例

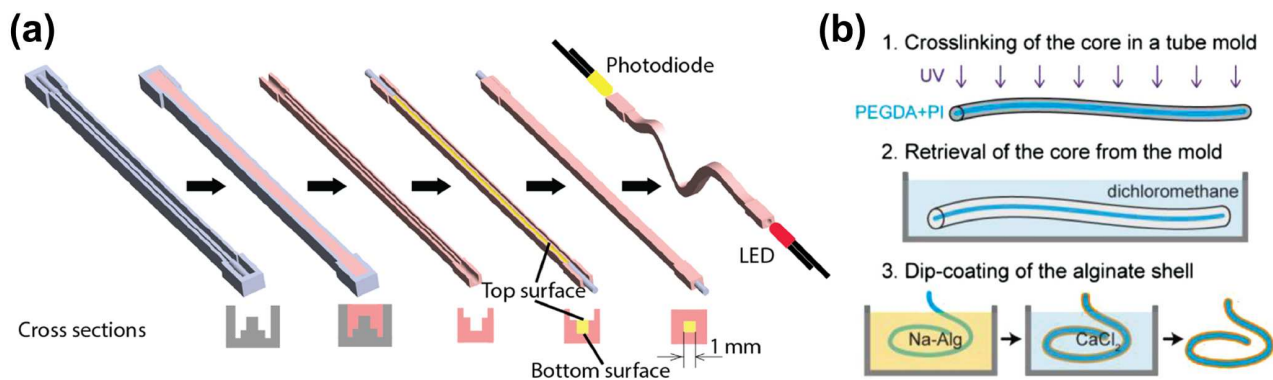


图2 (网络版彩色)非连续制备方法制备弹性聚合物光纤。(a) 模板法制备无水弹性聚合物光纤^[47]。(b) 模板法制备水凝胶光纤^[28]

Figure 2 (Color online) Discontinuous preparation methods for the preparation of elastic polymer fibers. (a) Molding method for preparation of waterless elastic polymer fibers^[47]. (b) Molding method for preparation of hydrogel fibers^[28]

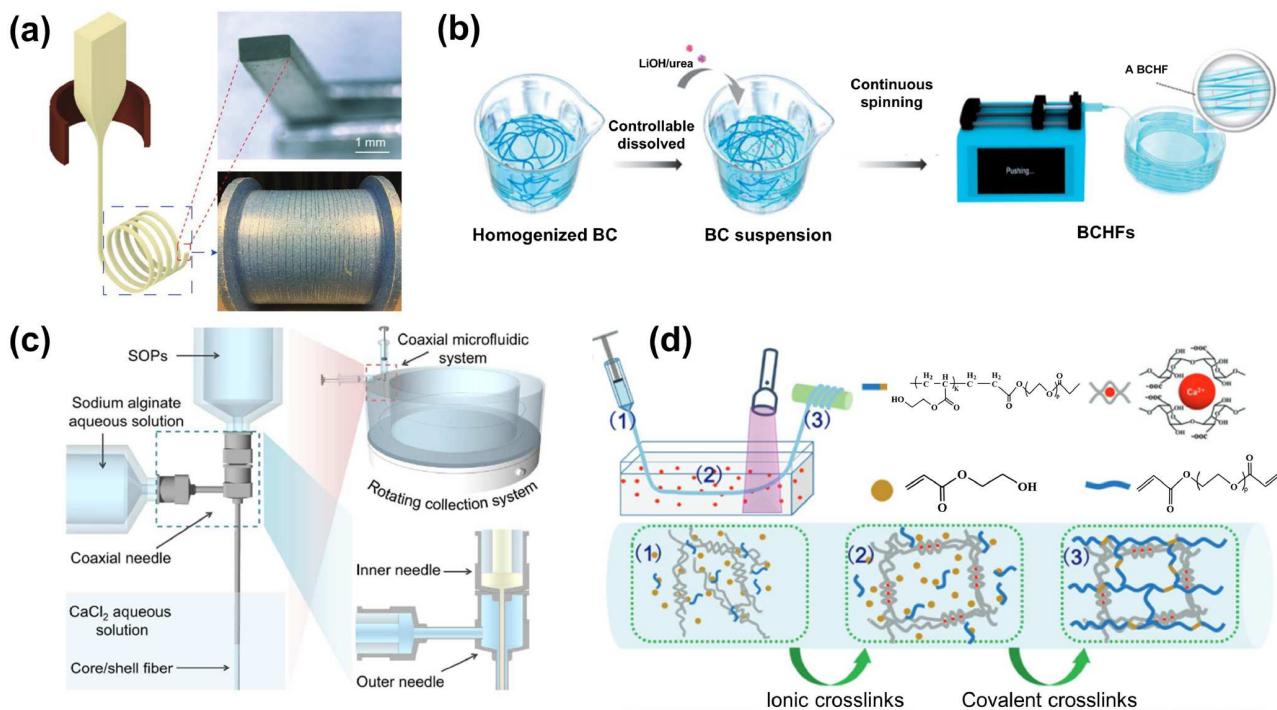


图3 (网络版彩色)弹性聚合物光纤的连续制备方法。(a) 热拉伸法^[31]。(b) 湿法纺丝技术^[59]。(c) 微流控纺丝技术^[64]。(d) 动态聚合纺丝技术^[66]

Figure 3 (Color online) Continuous preparation methods of elastic polymer fibers. (a) Thermal drawing^[31]. (b) Wet spinning technology^[59]. (c) Microfluidic spinning technology^[64]. (d) Dynamic polymerization spinning technology^[66]

如, Shi等人^[64]提出了一种水凝胶辅助微流体纺丝方法(hydrogel-assisted microfluidic wet spinning, HAMS),其双层同轴微通道结构(图3(c))可实现PDMS芯层与海藻酸钙皮层的同步成型,随后通过柠檬酸钠选择性溶解皮层,最终获得表面光滑的弹性聚合物纤维。在此基础上, Fitria等人^[65]利用新型多通道微流控器件,成功制备

出具有双芯结构的水凝胶光纤。该光纤能够同时传输不同波长的光信号,具备同时接收两种响应信号的能力;此外,双芯设计有助于减少光信号之间的相互干扰,提升成像精度,从而推动光导器件的进一步小型化。值得关注的是,该技术虽能实现纤维直径的调控及复杂结构构筑,但其工业化应用仍面临诸多挑战,包括

微通道加工精度要求高、多相流体稳定性难以维持等问题。未来的发展方向可聚焦于以下几个方面: 开发普适性的表面改性和多功能交联固化体系, 以稳定多相流界面并确保不同材料间的协同能力; 发展新型微加工技术以及先进的在线监测与反馈控制系统, 保障长时间、大规模生产过程中的工艺稳定性。该技术有望在柔性电子、智能织物和光电子器件等前沿领域实现革命性进展, 最终实现从精密结构制造到高性能功能系统集成的跨越。

针对含水弹性体光纤连续制备的特殊需求, 研究人员将光聚合动力学与湿法纺丝工艺相结合, 开发了动态聚合纺丝技术。该技术核心在于将紫外光固化装置集成于纺丝路径中, 实现凝胶前驱体的动态交联与纤维成型的同步进行^[11,67]。Song等人^[66]开发了一种动态双网络构筑工艺, 将PEGDA和海藻酸钠的混合溶液挤入 Ca^{2+} 凝固浴, 使离子交联与光引发的纤芯自由基聚合同时发生, 成功构建了海藻酸钙物理网络与PEGDA化学网络的协同结构(图3(d))。该凝胶化策略不仅解决了水凝胶前驱体黏度低导致纺丝过程不稳定的问题, 还为功能基团的定向修饰提供了可调控的反应平台。动态聚合纺丝技术通过紫外光固化与湿法纺丝的原位集成, 实现了含水弹性聚合物前驱体加工和双网络结构的同步构建。未来的发展应聚焦于材料与工艺的深度融合创新。一方面, 探索与更多功能性组分(如刺激响应聚合物、纳米材料、生物活性分子)的集成应用, 可在纤维材料内部或表面实现功能基团的选择性修饰, 从而推动智能纤维的开发。另一方面, 优化光聚合动力学与纺丝工艺参数的协同调控, 提升纤维结构均一性, 实现智能弹性聚合物光纤的高速连续化生产。这种纺丝技术在构建具有动态响应特性、良好生物相容或特定光电功能的弹性聚合物光纤方面独具优势, 有望用于下一代柔性生物电子接口或智能织物传感单元等集成化器件的连续制备。

1.3 弹性聚合物光纤传感器概述

光纤传感器的基本工作原理是: 光源发出的光束经光纤传输至敏感元件(调制器), 在调制器内待测物理量与光波相互作用, 导致光波的特征参数(波长、相位、强度、偏振态等)发生变化, 调制后的光信号继续通过光纤传输至解调系统, 最终经信号处理还原为被测参数^[68~70]。受到外界环境因素的影响时, 光波行为会发生相应改变。相较于传统基于电信号的传感器, 弹性聚

合物光纤传感器具备抗电磁干扰、耐腐蚀等优势, 同时还具备可微型化、灵敏度高和测量范围宽等综合性能特点^[71~73]。

目前, 光纤传感器的光信号调制机制主要包括强度调制型、波长调制型、相位调制型和偏振调制型四类。其中, 强度调制型光纤因其结构简单、成本低且易于实现, 在弹性聚合物光纤传感器中应用最广泛。因此, 以下将重点介绍强度调制型光纤传感机理^[74]。

强度调制型光纤传感的核心原理是通过检测光纤中传输光强的变化来感知外界物理量或化学量的变化。该调制方式直接利用光信号强度的增强或衰减作为传感信号, 具有结构简单、成本低廉和解调便捷等优势。微弯损耗和吸收增强是两种典型的强度调制机制。微弯损耗机制通过外力使光纤产生微小弯曲, 导致原本在芯层中有效传输的光无法沿原路径传播, 部分光线从光纤侧面泄漏, 这部分泄漏的光被称为辐射模。施加的压力越大, 光纤的弯曲程度越显著, 光泄漏量随之增加, 输出光强则相应减弱。由于弹性聚合物光纤具备高弹性和多模特性, 使其对此机制高度敏感, 适用于压力、位移或振动等物理量的快速检测^[75,76]。吸收增强机制则依赖于在光纤中引入功能性敏感材料(如染料或吸附层)。当温度、离子或特定气体等待测物作用于材料时, 其光吸收特性发生变化, 进而影响传输光强。该机制适用于化学浓度或环境参数(如pH、气体)的传感^[77]。

波长调制型光纤通常基于光纤光栅(如光纤布拉格光栅, fiber Bragg grating, FBG)或滤光结构, 通过光谱峰值波长的偏移来感知应变或温度变化。由于弹性聚合物的热膨胀系数比石英高约两个数量级, 其FBG结构的温度灵敏度可达石英FBG的10倍。由于其机械强度和长期稳定性较低, 因此目前波长调制型弹性聚合物光纤多被应用于短期生物医学监测或柔性设备集成等特殊场景^[70,74]。

相位调制型光纤通过测量待测物理量变化引起的光波相位变化, 并借助干涉测量技术将相位变化转化为光强变化, 从而实现对外界参数的检测。尽管该调制方法操作更简单, 但弹性聚合物本身因分子链取向不均匀而存在显著的固有双折射现象, 会导致较大的传输损耗; 同时, 在温度波动或应力作用下, 材料难以精确恢复至原始形状, 这种微小、持续且难以预测的形变使得干涉结构难以保持稳定, 因此目前实际应用较少^[78]。

偏振调制型光纤通过解析光偏振态变化来感知外界扰动. 当应力、磁场或电场作用于光纤时, 会诱发线性或圆双折射效应, 导致输出光的偏振角或椭圆度发生变化. 然而, 由于弹性聚合物本身具有双折射特性, 且其光学性能极易受到温湿度变化、弯曲应力等环境因素的影响, 导致信噪比显著下降. 这些因素共同制约了偏振调制型弹性聚合物光纤传感器在实际应用中的可行性与稳定性^[79,80].

2 体外物理环境传感应用

人体能够对体外物理环境的变化产生生理响应, 这种反应是其为适应外部环境变化而进行的自我调节过程. 为了深入理解刺激和响应间的关系, 发展能够实时捕捉并量化外界物理刺激与生理响应耦合关系的传感技术尤为迫切. 在此背景下, 弹性聚合物光纤传感器因其独特的柔韧性、宽域应变感知能力及抗电磁干扰特性, 成为构建体外物理环境监测系统的理想技术方案之一. 目前, 光纤传感系统在该领域主要被应用于力

学刺激、温度变化和水体检测.

2.1 受力环境传感

可穿戴传感器作为健康监测领域的革命性突破, 具备无创、持续的生物信号采集能力, 该技术平台不仅帮助人们建立更健康的生活方式, 还为代谢综合征等慢性疾病的早期预警提供数据支持^[81~83]. 可穿戴弹性聚合物光纤健康监测系统的工作原理是基于对可变形光纤传输的光强度变化的实时监测^[17]. 值得注意的是, 在大幅变形、高速冲击等复杂应用场景中, 光纤的机械特性和动力学响应行为共同决定了传感器的时空分辨率, 这对光纤器件的设计与优化提出了更高的要求.

为满足人体运动检测中对稳定应变传感的需求, Harnett等人^[84]开发了基于聚氨酯芯层和硅胶皮层的可拉伸力敏光纤(图4(a)), 该光纤具有低噪声和低滞后特性, 适用于高精度应变传感. 通过纺织集成技术, 该光纤实现了对肌肉形变的分布式监测, 可用于识别肌

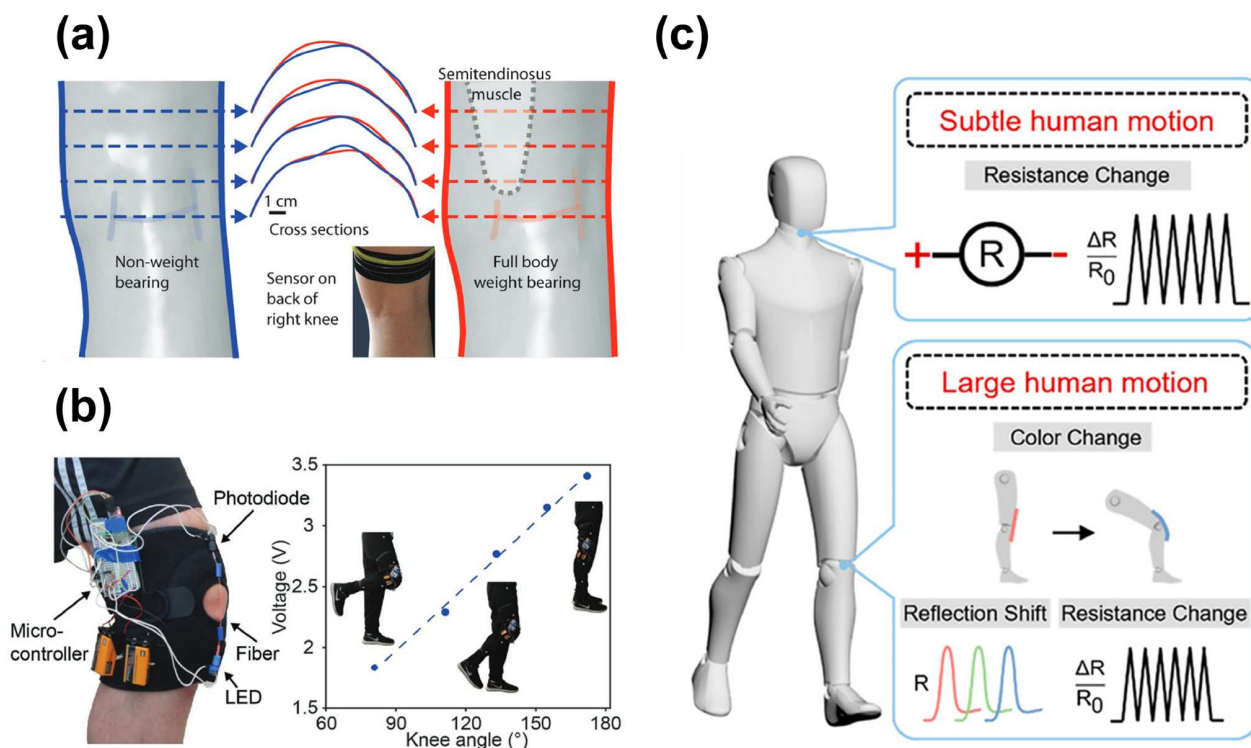


图4 (网络版彩色)弹性聚合物光纤传感器在运动检测的应用. (a) 可拉伸力敏光纤^[84]. (b) 与可承受极端形变的弹性聚合物光纤集成的功能性织物^[17]. (c) 可用于同时监测细微和大型人体运动的双模光纤应变传感器^[86]

Figure 4 (Color online) Elastomer polymer optical fiber sensors for motion detection. (a) Stretchable force-sensitive fibers^[84]. (b) Functional fabrics integrated with elastic polymer optical fibers that can withstand extreme deformation^[17]. (c) Dual-mode fiber optic strain sensors that can be used to simultaneously monitor both subtle and large human movements^[86]

肉形状变化并追踪人体负重运动状态。为进一步突破传统柔性电子器件在可穿戴传感应用中面临的关键挑战,即维持共形接触与保障信号稳定性间的矛盾,Leber等人^[17]设计了一种具有高度拉伸性的阶跃折射率皮芯光纤(断裂伸长率545%)。该设计充分利用弹性聚合物优异的形变耐受能力与光传输稳定性,成功构建了具备优异贴合性与长期稳定性的智能运动织物系统(图4(b))。

为满足对人体在运动或生理活动中进行更全面监测的需求,新一代可穿戴光纤传感器需具备同时感知微小形变和承受大幅变形的能力。因此,其设计必须兼顾微应变灵敏度(<1%)与大应变容限(>50%)这两项要求^[85]。Zhao等人^[86]提出了一种双模光纤应变传感器(图4(c)),通过将机械变色光子晶体与高灵敏度电子应变传感器相结合,实现了对人体力学行为的宽范围监测。该传感器由机械变色光子晶体和橡胶弹性体组成,能够同时监测人体微小生理形变(例如呼吸和吞咽)以及较大的关节运动(例如手指屈伸和肘部弯曲),具备0~80%的宽域应变响应能力。对于大范围的人体运动,该传感器通过明显的颜色变化与显著的电阻信号变化进行识别;而对于细微生理活动,则依赖于高灵敏度的电信号输出进行精确监测。这种双模传感机制不仅将力学行为转化为直观的视觉反馈,还为可穿戴智能织物系统的开发提供了新的技术路径。

此外,在功能材料创新方面,Huang等人^[87]提出了一种基于石墨掺杂的低成本PDMS柔性光纤传感器。相比于纯PDMS光纤,掺杂石墨后的光纤因石墨颗粒在基体中均匀分布,对光具有吸收和散射作用,导致光传播损耗增加,从而提高了光纤应变传感器的灵敏度。该传感器通过检测光纤在透射光下随形变变化的光衰减,实现对人体运动行为的实时监测,包括关节弯曲、肌肉收缩与舒张等。该团队首次提出将柔性光纤传感器嵌入智能鞋中的构想,并成功验证了其在辅助医疗与康复诊断领域的应用潜力。

2.2 温度环境传感

在可穿戴健康监测领域,体温是反映机体代谢状态的核心生理参数之一,其精准测量对于临床诊断具有重要意义。然而,在实际应用过程中,传统柔性温度传感器不可避免地受到佩戴过程中机械形变引起的测量误差影响,进而引发应变与温度间的信号交叉干扰问题^[88]。为应对这一关键技术挑战,研究人员将光纤技

术引入穿戴式体温传感系统。Guo等人^[18]报道了一种具备抗应变干扰能力的光学温度传感器(图5(a)),该传感器通过将温度敏感的纳米颗粒掺入柔性PDMS光纤基体中制备而成,同时还结合比例荧光检测策略实现自校准功能。即使在大应变拉伸(>80%)条件下,该传感器仍能保持良好的线性度和灵敏度(检测限为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$)。

导电聚合物复合体系的界面优化也可用于提升温度传感性能。Li等人^[88]采用原位聚合方法制备了PEDOT-TPU复合纤维,并通过分子尺度调控PEDOT导电网络的聚合状态,进一步提高了可穿戴光纤体温传感器的灵敏度(检测限为 $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$)。并且,该器件通过将纤维以S形结构缝入普通纺织品中(图5(b)),使传感器几乎不受张力影响,从而实现在日常活动中的稳定皮肤温度测量。这种性能优化策略标志着可穿戴光纤传感技术从单一环境适应性设计向多参数协同优化的关键转变。在实际应用层面,这类温度敏感纤维为未来可穿戴电子纺织品的发展及实时皮肤温度监测提供了切实可行的技术支撑。

2.3 水体中的分子监测

维护水质安全是保持生态平衡和保障人类健康的关键环节。在工业废水排放和农业污染问题日益加剧的背景下,水体中金属离子(如汞、铅、镉等)和染料分子(如亚甲基蓝、罗丹明B等)超标问题日趋严重,直接威胁饮用水安全,并加重了公共卫生负担^[89-91]。这些污染物可通过食物链富集,即使在低浓度长期暴露下,也可能引发慢性中毒,对人体神经系统和肾脏造成不可逆的损伤^[92]。因此,开发能够高效检测并准确定量金属离子和染料分子的先进技术,在环境监测、细胞内传感乃至医疗诊断等多个领域均具有重要意义^[93]。基于弹性聚合物光纤构建的传感器为实现对上述污染物的实时、快速、低成本检测提供了可行方案。该类传感器不仅具备良好的柔性和化学稳定性,还克服了传统检测方法依赖昂贵设备、操作复杂及难以实现原位监测等局限性。

基于量子点(quantum dot, QD)的荧光探针因其高量子产率和优异的光稳定性,已成为金属阳离子光学传感领域研究最广泛的纳米材料之一^[94-98]。Guo等人^[99]将QD掺杂于水凝胶薄膜中,制备了一种涂覆有薄层传感膜的锥形水凝胶光纤结构。该光纤结构的锥形设计有助于增强光提取效率,从而实现对传感膜的有效激发。同时,传感膜上掺杂的两种QD可协同作用,实

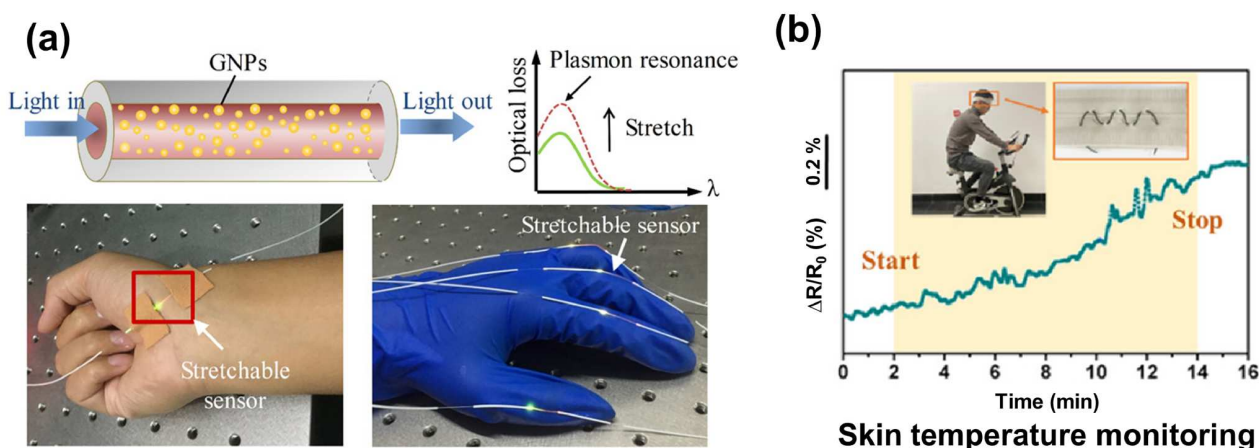


图5 (网络版彩色)弹性聚合物光纤传感器在温度传感中的应用。(a) 掺杂GNP颗粒的柔性PDMS光学温度传感器^[18]。(b) 测试人员佩戴带有传感器的头带和传感器在骑行时的响应曲线^[88]

Figure 5 (Color online) Elastomer polymer optical fiber sensors for temperature sensing. (a) Flexible PDMS optical temperature sensor doped with GNP particles^[18]. (b) The tester wore a headband with a sensor, and the response curve of the sensor while riding^[88]

现对铅离子的高度选择性检测和自校准功能,适用于水样及生物组织等多种复杂环境(图6(a)~(c)).

然而,将传感材料嵌入固体基体中可能会限制其与目标分子的充分接触,进而降低检测灵敏度。此外,由于检测完成后敏感物质与靶标形成的复合物难以洗脱,导致传感器几乎无法重复使用。为解决上述问题,Liu等人^[100]设计了一种液芯水凝胶光纤荧光探针。该探针通过结构设计,构建了由液芯、高折射率水凝胶芯层及低折射率水凝胶皮层组成的复合结构,实现了激发光在芯层中的高效传输,显著提升了荧光信号的采集效率。并且,敏感材料被密封于液芯内部,待测小分子可通过皮层渗透进入液芯并与敏感材料充分作用,从而有效提升检测灵敏度(图6(d)~(f))。同时,该探针还可通过更换液芯中的传感溶液实现多次重复利用。这一创新结构为光纤荧光探针的设计与应用提供了具有应用前景的新型解决方案。

此外,实现对工业废水中染料浓度的高灵敏度、快速且准确的检测,在水质监控与环境保护中具有重要意义,特别是在低浓度污染中,这种高灵敏度传感器更具实用意义^[101]。对此,Foguel等人^[102]开发了一种基于聚合物涂层的光纤传感器,用于定量测定工业废水中的碱性红9(BR9)染料。该传感器通过将聚合物固定于光纤表面作为选择性荧光探针,利用光强度在BR9分子与聚合物结合后发生的变化来定量检测染料含量,成功实现了对目标染料分子的低检测限响应($3 \mu\text{mol/L}$)。

综上所述,弹性聚合物光纤传感器有助于实现水体污染事件的早期预警,防止有毒物质通过食物链富集,从而降低癌症、神经系统损伤等重大公共卫生风险,为可持续水资源管理和智慧环保提供了一种高效可靠的技术支撑方案。

3 体内生理环境传感应用

当个体生理条件发生变化时,其体内生物化学组分的活性成分及含量也会随之改变,这些变化能够有效反映个体的健康状态。然而,由于个体体内存在的多种异质性成分,可能会干扰传感器的准确测量,研究人员因此开发了高度特异性的传感器用于监测个体体液环境变化^[103]。目前,在原位分析物检测领域,植入式光纤传感器已被广泛应用。柔性光子器件因其灵活、响应速度快、测量精度高和体积小等优势,成为理想的体内传感平台。研究表明,具备良好生物相容性的光敏元件在植入人体后不会引发细胞毒性或免疫排斥反应,从而实现长期稳定运行^[104~106];并且基于生物可降解材料制作的光子器件可在完成任务后在体内自行降解,无需二次手术取出,显著降低了患者的医疗风险与负担^[107]。

血糖作为可以代谢性疾病的重要生物标志物之一,其连续监测对糖尿病的精准确管理和预防有关键意义^[108~110]。Yetisen等人^[40]报道了一种基于苯硼酸功能化的葡萄糖敏感水凝胶光纤(图7(a)),利用葡萄糖敏感的整合剂苯硼酸来实现对葡萄糖浓度的选择性与连续

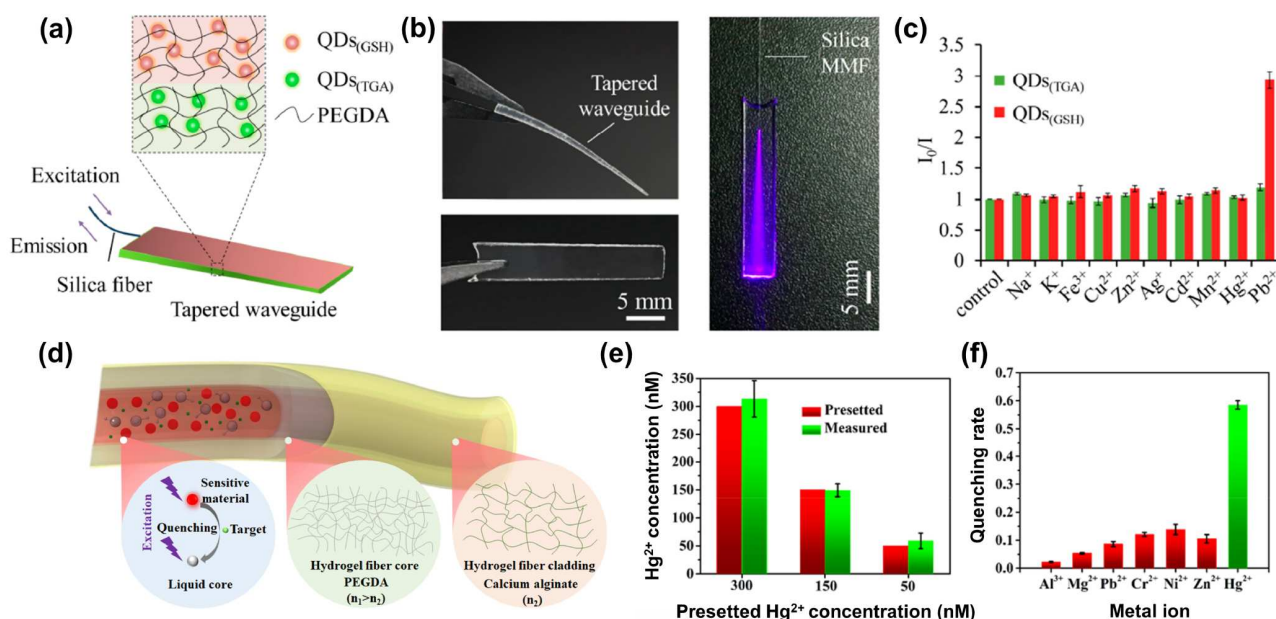


图6 (网络版彩色)弹性聚合物光纤传感器在金属离子检测方面的应用。(a,b) 涂有薄传感膜的锥形水凝胶波导示意图和实物图^[99]。(c) 锥形水凝胶波导对不同金属离子的荧光猝灭^[99]。(d) 液芯水凝胶光纤荧光探针示意图^[100]。(e) 液芯水凝胶光纤对Hg²⁺的浓度测定^[100]。nM=nmol/L。(f) 液芯水凝胶光纤对不同金属离子的荧光猝灭效果^[100]

Figure 6 (Color online) Elastomer polymer optical fiber sensors for metal ion detection. (a,b) Schematic and physical diagram of a conical hydrogel waveguide coated with a thin sensing film^[99]. (c) Fluorescence quenching of different metal ions by conical hydrogel waveguides^[99]. (d) A liquid core hydrogel fiber fluorescent probe^[100]. (e) Determination of Hg²⁺ concentration by liquid core hydrogel fiber^[100]. nM=nmol/L. (f) Fluorescence quenching of different metal ions by liquid core hydrogel fibers^[100]

性监测。葡萄糖分子通过水凝胶的孔隙扩散并与固定在其中的苯硼酸官能团发生特异性结合时，会引起水凝胶体积膨胀，导致透射光强发生变化，实现对葡萄糖的实时、定量检测。在此基础上，研究者进一步探索了通过结构设计提升信号调制能力的方法。Elsherif等人^[111]在光聚合过程中将葡萄糖响应性水凝胶以化学方式连接至二氧化硅多模光纤末端，并在其表面构建了不对称微透镜阵列。当葡萄糖与固定在水凝胶基质中的硼酸基团发生络合反应时，水凝胶产生体积变化，导致微透镜阵列曲率发生改变，从而显著增强光学响应信号。该功能化水凝胶光纤探针展现出高灵敏度(2.6 $\mu\text{W mmol}^{-1} \text{L}^{-1}$)、快速响应速度以及在生理葡萄糖范围内的优异选择性。此外，为克服直接检测过程中可能存在的干扰因素，Guo等人^[112]设计了一种掺杂金纳米颗粒(gold nanoparticles, GNPs)的水凝胶光纤葡萄糖传感器，该传感器利用GNPs的强局域表面等离子体共振(localized surface plasmon resonance, LSPR)效应，有效抑制了与LSPR无关的背景损耗，显著提升了光学葡萄糖传感器的灵敏度和稳定性。

除葡萄糖以外，pH、血氧饱和度等生理指标也能

够及时反映出人体的健康状况^[114-116]。Zhao等人^[117]首次报道了一种基于高灵敏度水凝胶光纤的比率式pH荧光传感器，将两种不同功能的荧光材料分别作为pH响应探针和内部参比信号源，集成于水凝胶光纤芯层中，构建出比率型传感结构，从而有效消除外部环境干扰。该研究成果表明基于水凝胶光纤的传感器在实时且高灵敏的体液pH监测方面具有巨大潜力。Li等人^[113]进一步开发了一种具备双功能检测能力的荧光水凝胶光纤传感器(图7(b))，该传感器通过纤维节段功能化策略，引入荧光素衍生物和量子点/3-(丙烯酸胺基)-苯硼酸(3-(acrylamide)-phenylboronic acid, 3-APBA)复合体系，分别用于pH和葡萄糖浓度检测。其中，葡萄糖识别剂苯硼酸在掺杂量子点后与水凝胶芯层中的丙烯酸胺交联，量子点作为信号转换器，可将水凝胶的溶胀行为转化为荧光信号的强度变化，从而实现了对葡萄糖浓度的定量分析；同时，该光纤还具备pH自校准功能，有助于进一步提升双功能检测中葡萄糖浓度检测的准确性。

在血氧饱和度监测方面，Choi等人^[28]通过在小鼠体内植入水凝胶光纤，成功实现了对活体动物血氧饱

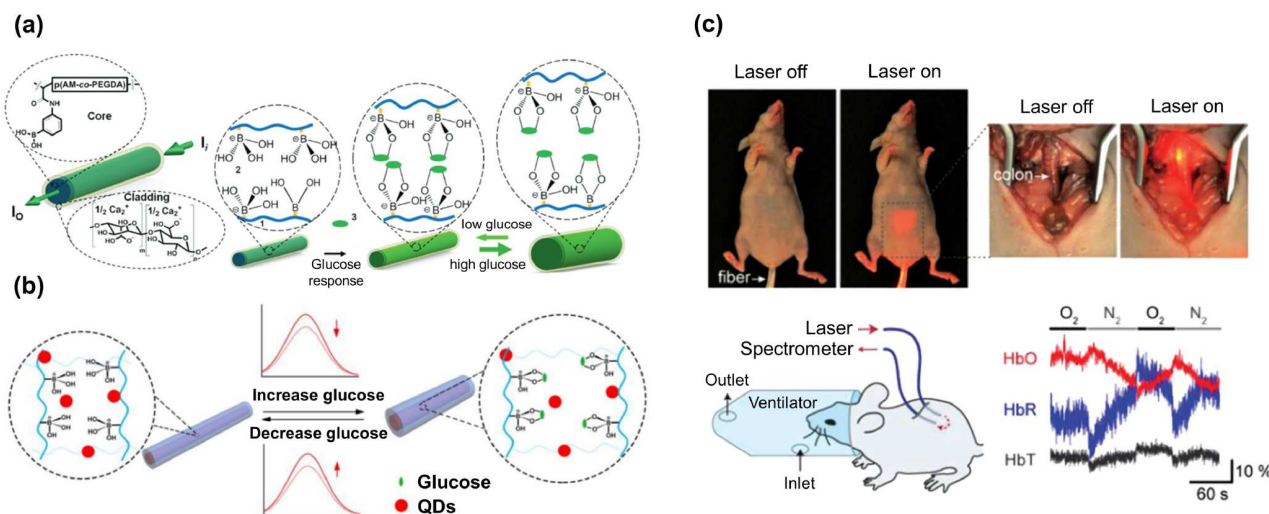


图7 (网络版彩色)弹性聚合物光纤传感器在体内生理环境传感的应用。(a)可连续监测血糖的水凝胶光纤^[40]。(b)用于监测葡萄糖和pH的双功能荧光水凝胶光纤原理示意图^[113]。(c)可用于实时监测血氧的水凝胶光纤^[28]

Figure 7 (Color online) Elastomer polymer optical fiber sensors for physiological environment sensing *in vivo*. (a) Hydrogel optical fiber for continuous monitoring of blood glucose^[40]. (b) The principle of dual-functional fluorescent hydrogel fiber for monitoring glucose and pH^[113]. (c) Hydrogel fibers used to monitor blood oxygen in real time^[28]

和度的实时监测。该项工作基于血红蛋白的光谱吸收特性,利用一根水凝胶光纤将特定波长的光导入体内,再利用另一根光纤采集散射光信号,结合朗伯-比尔(Beer-Lambert)定律计算光强的变化得出氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的相对浓度变化(图7(c))。此外,Partridge等人^[118]还制备了一种涂覆血红蛋白的长周期光栅光纤传感器。该传感器以血红蛋白作为传感元件,用于监测细胞中血红蛋白对氧气的摄取过程,并根据折射率变化实现对血氧的动态监测。上述两项研究充分展示了光纤技术在血氧检测传感中的创新潜力与应用价值。

4 总结与展望

总的来说,随着光学技术的快速发展,弹性聚合物光纤因其独特的机械柔韧性、可拉伸性、生物相容性,在生物传感、组织工程及环境监测等前沿领域展现出广阔的应用前景。本文从弹性聚合物光纤的分类、制备工艺、传感原理、应用场景角度,对其研究现状进行了全面总结。然而,为了推动该弹性聚合物光纤走向更广泛的实际应用,还需克服几个关键问题。

第一,材料工艺协同性不足。现有连续化制备技术难以兼顾弹性聚合物材料特性需求与高效、稳定、可控的大规模生产要求。因此,亟需设计具有低黏度、快速可控固化/交联能力的弹性聚合物材料,并优化纺丝过程中拉伸比与固化速率的匹配关系,实现材料特性与制造工艺的深度匹配。

第二,器件集成复杂度较高。弹性聚合物光纤与其他电子器件存在界面不匹配、环境动态变化下光/电耦合信号不稳定,以及器件微型化集成难等问题。未来在光纤器件的集成过程中可以引入3D打印技术,实现复杂封装结构一体化制造。

第三,未来的研究应更加注重长期生物相容性与降解可控性的验证。通过开展加速老化实验并建立降解行为的预测模型,有助于缩短评价周期。此外,还可引入对外部刺激(如特异性酶、pH、氧化还原反应等)具有响应性的智能降解材料,验证弹性聚合物光纤的降解可控性。

综上所述,解决以上问题有助于推动弹性聚合物光纤从基础研究向产业化转化,促进柔性光纤器件在传感领域中的实际应用,使其未来发展方向更加广阔。

参考文献

- 1 Zhao L, Tan Y L, Li H, et al. Wearable fiber-optic sensors: recent advances and future opportunities (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*,

- 2023, 53: 114204 [赵磊, 谭颖玲, 李航, 等. 可穿戴光纤传感技术: 研究进展及未来机遇. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 114204]
- 2 Zhang S, Li T, Lu G W, et al. Ultra-flexible perceptual photonic-skin by using optical fiber as artificial mechanoreceptor. *Microsyst Technol*, 2019, 25: 4341–4347
- 3 Liu Z, Zhang Z, Tam H Y, et al. Multifunctional smart optical fibers: materials, fabrication, and sensing applications. *Photonics*, 2019, 6: 48
- 4 Jiang N, Ahmed R, Rifat A A, et al. Functionalized flexible soft polymer optical fibers for laser photomedicine. *Adv Opt Mater*, 2018, 6: 1701118
- 5 Yun S H, Kwok S J J. Light in diagnosis, therapy and surgery. *Nat Biomed Eng*, 2017, 1: 0008
- 6 Mao Q G. Analysis of porous silicon fiber data transmission technology in optoelectronic communication systems (in Chinese). *Electron Technol*, 2024, 53: 436–437 [毛庆国. 光电通信系统中的多孔硅光纤数据传输技术分析. 电子技术, 2024, 53: 436–437]
- 7 Kude V P, Khairnar R S. Fabrication of silicon based glass fibres for optical communication. *Bull Mater Sci*, 2004, 27: 73–77
- 8 Shabahang S, Kim S, Yun S. Light-guiding biomaterials for biomedical applications. *Adv Funct Mater*, 2018, 28: 1706635
- 9 Wang S S, Hu T T. Design and application of flexible sensor with simultaneous recognition of stretch and pressure (in Chinese). *Instrum Tech Sens*, 2021, 11: 1–6, 15 [王莎莎, 胡特特. 可同时识别拉伸与压力的柔性传感器设计与应用. 仪表技术与传感器, 2021, 11: 1–6, 15]
- 10 Zhao Y. Study on polymer optical waveguide and arrayed waveguide grating (in Chinese). Doctor Dissertation. Jilin: Jilin University, 2004 [赵禹. 聚合物光波导和阵列波导光栅的基础研究. 博士学位论文. 吉林: 吉林大学, 2004]
- 11 Chen G Y. Integrated dynamic wet spinning of hydrogel optical fibers for application in photomedicine (in Chinese). Doctor Dissertation. Shanghai: Donghua University, 2023 [陈国印. “湿法-动态聚合”联用纺丝构筑水凝胶光纤及其光医学应用研究. 博士学位论文. 上海: 东华大学, 2023]
- 12 Belkheir M, Alami M, Mokaddem A, et al. An investigation on the effect of humidity on the mechanical properties of composite materials based on polymethyl methacrylate polymer optical fibers (POFs). *Fibers Polym*, 2022, 23: 2897–2906
- 13 Chen G, Xu S, Zhang Z, et al. Modulus self-adaptive hydrogel optical fiber for long-term modulation of neural activity. *Chin Chem Lett*, 2025, 36: 110440
- 14 Chen G, Xu S, Zhou Q, et al. Temperature-gated light-guiding hydrogel fiber for thermoregulation during optogenetic neuromodulation. *Adv Fiber Mater*, 2023, 5: 968–978
- 15 Shabahang S, Clouser F, Shabahang F, et al. Single-mode, 700%-stretchable, elastic optical fibers made of thermoplastic elastomers. *Adv Opt Mater*, 2021, 9: 2100270
- 16 Guo J, Zhou B, Yang C, et al. Stretchable and temperature-sensitive polymer optical fibers for wearable health monitoring. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1902898
- 17 Leber A, Cholst B, Sandt J, et al. Stretchable thermoplastic elastomer optical fibers for sensing of extreme deformations. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1802629
- 18 Guo J, Zhou B, Zong R, et al. Stretchable and highly sensitive optical strain sensors for human-activity monitoring and healthcare. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11: 33589–33598
- 19 Feng J, Jiang Q, Rogin P, et al. Printed soft optical waveguides of PLA copolymers for guiding light into tissue. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12: 20287–20294
- 20 Hossain K M Z, Parsons A J, Rudd C D, et al. Mechanical, crystallisation and moisture absorption properties of melt drawn polylactic acid fibres. *Eur Polym J*, 2014, 53: 270–281
- 21 Lu Y, Hintzen K, Kurkina T, et al. A competitive high-throughput screening platform for designing polylactic acid-specific binding peptides. *Adv Sci*, 2023, 10: 2303195
- 22 Shan D, Gerhard E, Zhang C, et al. Polymeric biomaterials for biophotonic applications. *Bioact Mater*, 2018, 3: 434–445
- 23 Zhao R, Ni C, Wang Y P. Development and industrial application of functional fibers (in Chinese). *Hi-Tech Fiber Appl*, 2024, 49: 17–33 [赵润, 倪辰, 王玉萍. 功能性纤维发展及产业化应用. 高科技纤维与应用, 2024, 49: 17–33]
- 24 Wang Y, Zhou Y, Qi L, et al. Soft optical fibers for biomedical and wearable technologies: current trends and future prospects. *Adv Funct Mater*, 2025, 25: 2507712
- 25 Guo J J, Guo J Y, Tuo J L, et al. Flexible organic polymer photonic devices for biomedical application (in Chinese). *Laser Optoelectron Prog*, 2023, 60: 33–51 [郭晶晶, 郭校言, 脱佳霖, 等. 柔性有机聚合物光子器件及其生物医学应用. 激光与光电子学进展, 2023, 60: 33–51]
- 26 Zhuo X, Han Y, Bian Y, et al. A promising optical bio-interface: graded-index hydrogel fiber. *Adv Opt Mater*, 2024, 12: 2301613
- 27 Wang D, Sheng B, Peng L, et al. Flexible and optical fiber sensors composited by graphene and PDMS for motion detection. *Polymers*, 2019, 11: 1433
- 28 Choi M, Humar M, Kim S, et al. Step-index optical fiber made of biocompatible hydrogels. *Adv Mater*, 2015, 27: 4081–4086
- 29 Zheng B, Yang J, Qi F, et al. Fabrication of Yb-doped silica micro-structured optical fibers from UV-curable nano-composites and their application in temperature sensing. *J Non-Crystalline Solids*, 2021, 573: 121129
- 30 Qi M, Liu Y, Wang Z, et al. Self-healable multifunctional fibers via thermal drawing. *Adv Sci*, 2024, 11: 2400785

- 31 Qu Y, Nguyen-Dang T, Page A G, et al. Superelastic multimaterial electronic and photonic fibers and devices via thermal drawing. *Adv Mater*, 2018, 30: 1707251
- 32 Sadeque M S B, Chowdhury H K, Rafique M, et al. Hydrogel-integrated optical fiber sensors and their applications: a comprehensive review. *J Mater Chem C*, 2023, 11: 9383–9424
- 33 Zhang Y, Lu H, Zhang M, et al. *In situ* mineralizing spinning of strong and tough silk fibers for optical waveguides. *ACS Nano*, 2023, 17: 5905–5912
- 34 Daghigh Shirazi H, Håkansson K M O, Abitbol T, et al. A facile spinning approach towards the continuous production of aligned nanocellulose films. *Colloids Surfs A-Physicochem Eng Aspects*, 2024, 701: 134673
- 35 Chen G, Wang G, Tan X, et al. Integrated dynamic wet spinning of core-sheath hydrogel fibers for optical-to-brain/tissue communications. *Nat Sci Rev*, 2021, 8: nwaa209
- 36 Chen G, Hou K, Yu N, et al. Temperature-adaptive hydrogel optical waveguide with soft tissue-affinity for thermal regulated interventional photomedicine. *Nat Commun*, 2022, 13: 7789
- 37 Chen T, Qiao X, Wei P, et al. Tough gel-fibers as strain sensors based on strain–optics conversion induced by anisotropic structural evolution. *Chem Mater*, 2020, 32: 9675–9687
- 38 Jun Y, Kang E, Chae S, et al. Microfluidic spinning of micro- and nano-scale fibers for tissue engineering. *Lab Chip*, 2014, 14: 2145–2160
- 39 Lu J L, Liu S Y, Zou L, et al. Graphene oxide-polydopamine loaded uniform fibrous membranes via robust multi-channel microfluidic-electrospinning method. *Separation Purification Tech*, 2025, 357: 130014
- 40 Yetisen A K, Jiang N, Fallahi A, et al. Glucose-sensitive hydrogel optical fibers functionalized with phenylboronic acid. *Adv Mater*, 2017, 29: 1606380
- 41 Guo J, Liu X, Jiang N, et al. Highly stretchable, strain sensing hydrogel optical fibers. *Adv Mater*, 2016, 28: 10244–10249
- 42 Kujala S, Mannila A, Karvonen L, et al. Natural silk as a photonics component: a study on its light guiding and nonlinear optical properties. *Sci Rep*, 2016, 6: 22358
- 43 Reimer M, Van Opendenbosch D, Zollfrank C. Fabrication of cellulose-based biopolymer optical fibers and their theoretical attenuation limit. *Biomacromolecules*, 2021, 22: 3297–3312
- 44 Kafy A, Kim H C, Zhai L, et al. Cellulose long fibers fabricated from cellulose nanofibers and its strong and tough characteristics. *Sci Rep*, 2017, 7: 17683
- 45 Song E, Chen M, Chen Z, et al. Mn^{2+} -activated dual-wavelength emitting materials toward wearable optical fibre temperature sensor. *Nat Commun*, 2022, 13: 2166
- 46 Kim M, An J, Kim K S, et al. Optical lens-microneedle array for percutaneous light delivery. *Biomed Opt Express*, 2016, 7: 4220–4227
- 47 Zhao H, O'Brien K, Li S, et al. Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides. *Sci Robot*, 2016, 1: eaai7529
- 48 Yew P Y M, Chee P L, Lin Q, et al. Hydrogel for light delivery in biomedical applications. *Bioactive Mater*, 2024, 37: 407–423
- 49 Applegate M B, Perotto G, Kaplan D L, et al. Biocompatible silk step-index optical waveguides. *Biomed Opt Express*, 2015, 6: 4221–4227
- 50 Sun J Y, Zhao X, Illeperuma W R K, et al. Highly stretchable and tough hydrogels. *Nature*, 2012, 489: 133–136
- 51 Tian G H, Zhou H W. Recent advances in the research on conductive elastomer composites and their flexible mechanosensors (in Chinese). *J Xi'an Technol Univ*, 2023, 43: 221–239 [田光颢, 周宏伟. 导电弹性体复合材料及其柔性力学传感器研究进展. 西北工业大学学报, 2023, 43: 221–239]
- 52 Cai D K, Neyer A, Kuckuk R, et al. Optical absorption in transparent PDMS materials applied for multimode waveguides fabrication. *Opt Mater*, 2008, 30: 1157–1161
- 53 Wei P L, Chen T, Chen G Y, et al. Research progress on organic/inorganic hybrid hydrogel fibers (in Chinese). *Chin Bas Sci*, 2019, 21: 11–16 [危培玲, 陈涛, 陈国印, 等. 有机-无机杂化水凝胶纤维研究进展. 中国基础科学, 2019, 21: 11–16]
- 54 Cao S G, Xue P. Progress in preparation technology of *in-situ* fiber composite (in Chinese). *Plastics*, 2022, 51: 131–135 [曹尚刚, 薛平. 原位成纤复合材料制备技术进展. 塑料, 2022, 51: 131–135]
- 55 Jin Z Y, Geng H Y, Liu R K, et al. Design and application of thermally drawn multimaterial electronic fiber devices for smart sensing (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 2644–2659 [金政扬, 耿皓宇, 刘荣坤, 等. 面向智能传感的多材料电子纤维器件的设计与应用. 科学通报, 2025, 70: 2644–2659]
- 56 Chen J, Ge H Y, Liu H S, et al. The phase separation mechanism during coagulation process in PAN wet-spinning (in Chinese). *J Funct Mater*, 2009, 40: 523–526 [陈娟, 葛曷一, 柳华实, 等. PAN湿法纺丝凝固过程中相分离机理初探. 功能材料, 2009, 40: 523–526]
- 57 Zaman S, Tao X, Cochrane C, et al. Smart E-textile systems: a review for healthcare applications. *Electronics*, 2022, 11: 99
- 58 Qu X, Li J, Han Z, et al. Highly sensitive fiber pressure sensors over a wide pressure range enabled by resistive-capacitive hybrid response. *ACS Nano*, 2023, 17: 14904–14915

- 59 Zhang M, Chen S, Sheng N, et al. Spinning continuous high-strength bacterial cellulose hydrogel fibers for multifunctional bioelectronic interfaces. *J Mater Chem A*, 2021, 9: 12574–12583
- 60 Qi K, Dai Y L, Ou K K, et al. Flexible textile structure force sensor (in Chinese). *Prog Chem*, 2024, 36: 1269–1282 [齐琨, 代云玲, 欧康康, 等. 柔性纺织结构力敏传感器. *化学进展*, 2024, 36: 1269–1282]
- 61 Zhou Z, Chen S, Han Z, et al. Continuous preparation of the record strength and toughness hydrogel fibers with a homogeneous crosslinked network by microcrystalline dispersed growth. *Adv Funct Mater*, 2025, 35: 2415354
- 62 Xu S L. Preparation and application of functional hydrogel materials based on microfluidic technology (in Chinese). Master Thesis. Jinan: Shandong University, 2023 [许树磊. 基于微流控技术的功能水凝胶材料的制备和应用研究. 硕士学位论文. 济南: 山东大学, 2023]
- 63 Guo J H, Wang Y, Xu D Y, et al. Conductive microfibers from microfluidics for flexible electronics (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 1653–1665 [郭佳慧, 汪雨, 许冬雨, 等. 导电微纤维的微流控制备及其在柔性电子领域的应用. *科学通报*, 2023, 68: 1653–1665]
- 64 Wang W, Avaro J, Hammer T, et al. Hydrogel-assisted microfluidic wet spinning of poly(lactic acid) fibers from a green and pro-crystallization spinning dope. *Chem Eng J*, 2024, 481: 148417
- 65 Fitria G, Kwon M, Lee H, et al. Microfluidic fabrication of highly efficient hydrogel optical fibers for *in vivo* fiber-optic applications. *Adv Opt Mater*, 2023, 11: 2300453
- 66 Song J, Chen S, Sun L, et al. Mechanically and electronically robust transparent organohydrogel fibers. *Adv Mater*, 2020, 32: 1906994
- 67 Wei P, Hou K, Chen T, et al. Reactive spinning to achieve nanocomposite gel fibers: from monomer to fiber dynamically with enhanced anisotropy. *Mater Horiz*, 2020, 7: 811–819
- 68 Zhang X, Wang C, Zheng T, et al. Wearable optical fiber sensors in medical monitoring applications: a review. *Sensors*, 2023, 23: 6671
- 69 Shi Y, Li X, Wang P, et al. A review: salinity and temperature measurement based on optical fiber sensors. *Sens Actuat A-Phys*, 2024, 380: 116040
- 70 Sun J Y. Research on fiber optical acoustic sensor for snoring detection (in Chinese). Master Thesis. Dalian: Dalian University of Technology, 2022 [孙嘉懿. 用于鼾声检测的光纤声波传感器研究. 硕士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2022]
- 71 Shen T Z C. Research on PDMS-based optical fiber strain sensor (in Chinese). Master Thesis. Hangzhou: China Jiliang University, 2024 [申屠卓成. 基于PDMS的光纤应变传感器研究. 硕士学位论文. 杭州: 中国计量大学, 2024]
- 72 Tan Y F. Research on flexible optical fiber sensing structure (in Chinese). Master Thesis. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2021 [谭永峰. 光纤柔性传感结构研究. 硕士学位论文. 青岛: 山东科技大学, 2021]
- 73 Wu C, Liu X, Ying Y. Soft and stretchable optical waveguide: light delivery and manipulation at complex biointerfaces creating unique windows for on-body sensing. *ACS Sens*, 2021, 6: 1446–1460
- 74 Feng S, Chu F H. Research progress on application of hydrogel fiber in sensing (in Chinese). *J Shanghai Univ Electr Power*, 2021, 37: 257–262 [冯十, 初凤红. 水凝胶在光纤传感应用方面的研究进展. *上海电力大学学报*, 2021, 37: 257–262]
- 75 Yang H Y, Lv H B, Xu T. Summary on the reflective intensity-modulated fiber optic sensor (in Chinese). *Chin J Sens Actuat*, 2001, (4): 349–355 [杨华勇, 吕海宝, 徐涛. 反射式强度型光纤传感器的研究. *传感技术学报*, 2001, (4): 349–355]
- 76 Cheng B, Chen J X, Cao L Y, et al. Flexible electronic skin for tactile sensing (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 2978–2999 [程斌, 陈家祥, 曹凌云, 等. 柔性触觉传感电子皮肤研究进展. *科学通报*, 2024, 69: 2978–2999]
- 77 Zhang S S. Preparation and performance study of sensitive film in the optical fiber iron ion sensor (in Chinese). Master Thesis. Qingdao: Ocean University of China, 2014 [张珊珊. 光纤表面铁离子敏感膜的制备及其性能研究. 硕士学位论文. 青岛: 中国海洋大学, 2014]
- 78 Wang K, Wu S, He S N, et al. Analysis of demodulation capability in phase carrier systems for interferometric fiber optic sensors (in Chinese). *Technol Innov Appl*, 2015, (17): 15–16 [王凯, 武帅, 贺胜男, 等. 干涉型光纤传感器相位载波系统解调能力分析. *科技创新与应用*, 2015, (17): 15–16]
- 79 Du Z J, Wang H L. Study on the polarization modulated fiber optic current sensor (in Chinese). *J Shandong Univ Technol (Nat Sci Ed)*, 2016, 30: 46–49 [杜召杰, 王辉林. 偏振调制型光纤智能电流传感器的研究. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 30: 46–49]
- 80 Li Z N, Shen L, Zhou X D. Modulated polarization insensitive interferometric fiber-optic sensor (in Chinese). *J Zhejiang Univ*, 2002, (1): 59–62 [李志能, 沈梁, 周效东. 偏振态调制干涉型光纤传感器. *浙江大学学报(工学版)*, 2001, (1): 59–62]
- 81 Swan M. Emerging Patient-driven health care models: an examination of health social networks, consumer personalized medicine and quantified self-tracking. *Int J Environ Res Public Health*, 2009, 6: 492–525
- 82 Yetisen A K, Martinez-Hurtado J L, Ünal B, et al. Wearables in medicine. *Adv Mater*, 2018, 30: 1706910
- 83 Shi Q, Dong B, He T, et al. Progress in wearable electronics/photronics—Moving toward the era of artificial intelligence and internet of things. *InfoMat*, 2020, 2: 1131–1162
- 84 Harnett C K, Zhao H, Shepherd R F. Stretchable optical fibers: threads for strain-sensitive textiles. *Adv Mater Technologies*, 2017, 2: 1700087
- 85 Zhao J Z, Chen X, Dong K. Mechano-electric conversion fiber and self-powered wearable textile devices (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 2763–2779 [赵继忠, 陈枭, 董凯. 机电转化纤维及自供能可穿戴纺织器件. *科学通报*, 2025, 70: 2763–2779]

- 86 Zhao R, He Y, He Y, et al. Dual-mode fiber strain sensor based on mechanochromic photonic crystal and transparent conductive elastomer for human motion detection. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15: 16063–16071
- 87 Huang X, Yin Z, Li M. A novel stretchable and flexible sensor using graphite-added optical waveguide for human motion detection. *IEEE Sens J*, 2022, 22: 14929–14936
- 88 Li F, Xue H, Lin X, et al. Wearable temperature sensor with high resolution for skin temperature monitoring. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14: 43844–43852
- 89 Li C L. Analysis of influencing factors and optimization strategies for environmental monitoring quality in water pollution (in Chinese). *Clean World*, 2025, 41: 148–150 [李传林. 水污染环境监测质量的影响因素和优化措施分析. *清洗世界*, 2025, 41: 148–150]
- 90 Liao X L, Lai W C, Ma S H, et al. MC Simulation of detection conditions for EDXRF analysis of Cd element in wastewater solution (in Chinese). *Spectrosc Spectral Anal*. 2025, 45: 403–409 [廖先莉, 赖万昌, 马书豪, 等. EDXRF分析废水溶液中Cd元素的检测条件的MC模拟. *光谱学与光谱分析*, 2025, 45: 403–409]
- 91 Liu T. Challenges and strategies in agricultural irrigation water resource management (in Chinese). *Agric Ind*, 2025, 1: 137–139 [刘涛. 农田灌溉水资源管理的挑战与对策. *农业产业化*, 2025, 1: 137–139]
- 92 Tchounwou P B, Yedjou C G, Patlolla A K, et al. Heavy metal toxicity and the environment. In: Luch A, ed. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology: Volume 3: Environmental Toxicology*. Basel: Springer, 2012. 133–164
- 93 Yetisen A K, Montelongo Y, Qasim M M, et al. Photonic nanosensor for colorimetric detection of metal ions. *Anal Chem*, 2015, 87: 5101–5108
- 94 Zhu H, Zhang W, Zhang K, et al. Dual-emission of a fluorescent graphene oxide–quantum dot nanohybrid for sensitive and selective visual sensor applications based on ratiometric fluorescence. *Nanotechnology*, 2012, 23: 315502
- 95 Rana S, Kherb J. Validation of specific cation partitioning to molecular surfaces using fluorescent carbon quantum dots. *J Mol Liquids*, 2020, 309: 113086
- 96 Tian M, Yang L, Wang D, et al. Preparation of sulphuric acid-mediated N,S-codoped red emissive carbon dots: applications in food dyes detection, solid-state luminescence and cell imaging. *Spectrochim Acta Part A-Mol Biomol Spectr*, 2022, 281: 121581
- 97 Hu Y, Gao Z. Sensitive detection of Sudan dyes using tire-derived carbon dots as a fluorescent sensor. *Spectrochim Acta Part A-Mol Biomol Spectr*, 2020, 239: 118514
- 98 Zhou M, Guo J, Yang C. Ratiometric fluorescence sensor for Fe³⁺ ions detection based on quantum dot-doped hydrogel optical fiber. *Sens Actuat B-Chem*, 2018, 264: 52–58
- 99 Guo J, Huang H, Zhou M, et al. Quantum dots-doped tapered hydrogel waveguide for ratiometric sensing of metal ions. *Anal Chem*, 2018, 90: 12292–12298
- 100 Liu T, Ding H, Huang J, et al. Liquid-core hydrogel optical fiber fluorescence probes. *ACS Sens*, 2022, 7: 3298–3307
- 101 Hao Y H. Study on functional microfiber sensing technology for detecting dyes and mercury ions (in Chinese). Master Thesis. Taiyuan: Shanxi University, 2023 [郝耀辉. 用于检测染料和汞离子的功能化微纳光纤传感技术的研究. 硕士学位论文. 太原: 山西大学, 2023]
- 102 Foguel M V, Ton X A, Zanon M V B, et al. A molecularly imprinted polymer-based evanescent wave fiber optic sensor for the detection of basic red 9 dye. *Sens Actuat B-Chem*, 2015, 218: 222–228
- 103 Fan S B, Liao W Y, Wu Y T, et al. Application status and development trend of fiber-based flexible sensors (in Chinese). *J Nantong Univ (Nat Sci Ed)*, 2024, 23: 46–57 [范松柏, 廖文怡, 吴玉婷, 等. 纤维基柔性传感器的应用现状及发展趋势. *南通大学学报(自然科学版)*, 2024, 23: 46–57]
- 104 Humar M, Kwok S J J, Choi M, et al. Toward biomaterial-based implantable photonic devices. *Nanophotonics*, 2017, 6: 414–434
- 105 Huang S, Villafranca S U, Mehta I, et al. A nanoscale inorganic coating strategy for stabilizing hydrogel neural probes *in vivo*. *J Mater Chem B*, 2023, 11: 7629–7640
- 106 Zhuo X, Shen H, Bian Y, et al. Projection-suspended stereolithography 3D printing for low-loss optical hydrogel fiber fabrication. *APL Photonics*, 2021, 6: 121302
- 107 Fujiwara E, Cabral T D, Sato M, et al. Agarose-based structured optical fibre. *Sci Rep*, 2020, 10: 7035
- 108 Ma Y Q, Xi G X. Application status of continuous glucose monitoring (in Chinese). *Med Recapit*, 2021, 27: 1791–1795 [马羽琦, 郝光霞. 持续葡萄糖监测的应用现状. *医学综述*, 2021, 27: 1791–1795]
- 109 Ahmed I, El Turk S, Al Ghaferi A, et al. Nanocomposite hydrogel-based optical fiber probe for continuous glucose sensing. *Small Sci*, 2024, 4: 2300189
- 110 Li G, Wen D. Sensing nanomaterials of wearable glucose sensors. *Chin Chem Lett*, 2021, 32: 221–228
- 111 Elsherif M, Hassan M U, Yetisen A K, et al. Hydrogel optical fibers for continuous glucose monitoring. *Biosens Bioelectron*, 2019, 137: 25–32
- 112 Guo J, Zhou B, Du Z, et al. Soft and plasmonic hydrogel optical probe for glucose monitoring. *Nanophotonics*, 2021, 10: 3549–3558
- 113 Li Y, Luo S, Gui Y, et al. Difunctional hydrogel optical fiber fluorescence sensor for continuous and simultaneous monitoring of glucose and pH. *Biosensors*, 2023, 13: 287
- 114 Zhao Y, Lei M, Liu S X, et al. Smart hydrogel-based optical fiber SPR sensor for pH measurements. *Sens Actuat B-Chem*, 2018, 261: 226–232

- 115 Lei Y, Gong Z, Li Y, et al. Highly sensitive physiological sensor based on tapered fiber-optic interferometer for sweat pH detection. [IEEE Sens J](#), 2023, 23: 11627–11634
- 116 Fu W B, Liang Y Z, Zhong X X, et al. Optical fiber photoacoustic blood oxygen saturation measurement and functional imaging (in Chinese). [Acta Opt Sin](#), 2022, 42: 2017001–2017010 [付武兵, 梁贻智, 仲晓轩, 等. 光纤光声血氧饱和度测量与功能成像. 光学学报, 2022, 42: 2017001–2017010]
- 117 Zhao L, Li G, Gan J, et al. Hydrogel optical fiber based ratiometric fluorescence sensor for highly sensitive pH detection. [J Lightwave Technol](#), 2021, 39: 6653–6659
- 118 Partridge M, James S W, Tatam R P. Dissolved oxygen sensing using an optical fiber long period grating coated with hemoglobin. [J Lightwave Technol](#), 2016, 34: 4506–4510

Summary for “弹性聚合物光纤的制备及其在传感中的应用研究进展”

Research progress on the preparation of elastic polymer optical fibers and their applications in sensing

Jialei Yang, Wenqi Zhou, Zeqi Zhang, Zhaowei Yang, Rouhui Yu, Shaowu Pan^{*}, Kai Hou^{*}, Guoyin Chen^{*} & Meifang Zhu

State Key Laboratory of Advanced Fiber Materials, College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China

^{*} Corresponding authors, E-mail: pansw@dhu.edu.cn; hokai711@dhu.edu.cn; chengy@dhu.edu.cn

The rapid advancement of medical photonics has significantly increased the demand for fiber-optic devices across sensing, diagnostic, and therapeutic applications. This growing demand imposes increasingly stringent requirements on the constituent materials, necessitating exceptional mechanical flexibility, stretchability, biocompatibility, and, in many cases, biodegradability. Traditional silica-based or rigid polymer optical fibers, characterized by their high elastic modulus and inherent inflexibility, face substantial limitations in dynamic biological environments. Their mechanical properties are fundamentally mismatched with those of soft human tissues. This mismatch not only compromises biocompatibility but also poses a real risk of damaging surrounding delicate tissues during implantation or physiological movement, restricting their potential for long-term or minimally invasive monitoring and therapeutic intervention.

Elastic polymer optical fibers (EPOFs) have emerged as a promising solution to these critical challenges. Their exceptionally low Young's modulus closely resembles that of biological tissues, significantly reducing the risk of mechanical irritation or damage. Moreover, EPOFs demonstrate excellent biocompatibility, minimizing adverse immune responses and enabling stable, long-term tissue integration. Most notably, they exhibit remarkable stretchability, allowing them to endure significant deformations—such as bending, twisting, and elongation—that occur in living, moving organisms without compromising optical performance. This mechanical adaptability enables them to conform to complex tissue geometries and accommodate physiological movements. In addition to their mechanical and biocompatible advantages, EPOFs provide considerable versatility through structural and functional tunability. Their composition, geometry, and dopants can be precisely engineered to tailor optical properties (e.g., light guiding, scattering, luminescence), sensitivity to specific stimuli (e.g., strain, pressure, biochemical analytes), and even therapeutic functions (e.g., light delivery for photodynamic therapy, optogenetics, or localized heating).

Leveraging these distinctive features, EPOFs have rapidly evolved from novel materials into key enablers of cutting-edge biomedical technologies. They are increasingly utilized in diverse applications such as minimally invasive signal transmission pathways for deep-tissue light delivery or sensing, and highly sensitive *in vivo* biosensors capable of continuously monitoring physiological parameters (e.g., pressure, strain, pH, specific biomarkers) or drug release kinetics. Their flexibility and biocompatibility make them particularly well-suited for interfacing with dynamic organs such as the heart, muscles, and brain.

This article presents a comprehensive review of the emerging field of elastic polymer optical fiber materials. It begins by defining their core characteristics and differentiating them from conventional optical fibers. The review systematically classifies EPOFs based on their constituent polymers (e.g., silicones, hydrogels), fabrication methodologies, structural designs, and functional mechanisms. The central focus of the discussion lies in the expanding range of applications for EPOFs, particularly their transformative role in biomedical sensing, including various sensing principles (intensity-based, interferometric, spectroscopic, luminescent) and target analytes. While highlighting the significant progress and distinct advantages offered by EPOFs, the review evaluates current challenges impeding their widespread clinical adoption. Finally, the review synthesizes the current state of research and outlines potential future directions. By consolidating this knowledge, it aims to serve as a valuable reference and provide strategic insights to accelerate the development, optimization, and practical implementation of elastic polymer optical fibers in next-generation sensing technologies.

elastic polymer optical fiber, preparation technology, response principle, sensing application

doi: [10.1360/CSB-2025-0705](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0705)