



纤维电池: 现状、机遇与挑战

齐乐, 张莹莹*

清华大学化学系, 有机光电子与分子工程教育部重点实验室, 北京 100084

* 联系人, E-mail: yingyingzhang@tsinghua.edu.cn

2024-05-12 收稿, 2024-06-14 修回, 2024-06-19 接受, 2024-06-20 网络版发表

国家自然科学基金(52125201)和北京市科学技术委员会、中关村科技园区管理委员会(Z221100002722015)资助

摘要 可穿戴电子器件的快速发展使得对柔性供能器件的需求日益增长. 纤维形态有望赋予电池卓越的柔韧性、小体积和高延展性, 因此纤维电池被视为下一代可穿戴电子器件的理想能量来源之一. 然而, 纤维的高长径比特性对纤维电池的电化学性能和力学稳定性提出了严峻挑战. 以往的研究侧重于纤维电池的制备与设计, 未从纤维结构本身特性出发进行分析. 本文旨在填补这一空白, 从纤维的本征特性出发, 分析纤维结构为电池带来的机遇与挑战, 由此阐述纤维电池的优缺点及其独特价值, 为设计下一代纤维电池提供思路. 本文首先回顾纤维电池的发展历程, 介绍其基本构造, 阐述其在可穿戴和植入式电子器件中的重要地位; 随后, 探讨纤维形态如何影响纤维电池的电化学性能, 分析可能存在的性能瓶颈和优化策略; 接着, 在力学性能方面, 阐述纤维电池复杂的应用场景对其静态柔性和动态稳定性的要求以及面临的挑战; 最后, 分析和讨论纤维电池在应用场景中的独特优势, 并展望未来研究方向和发展趋势.

关键词 可穿戴电子器件, 智能纤维, 柔性电池, 纤维电池

柔性可穿戴电子器件因其在个性医疗、健康监测、人机交互等领域表现出的巨大应用潜力而迅猛发展^[1-6]. 能源供给作为其核心组成, 对于柔性电子器件的功能实现至关重要^[7-9]. 在众多能源获取方式中, 相较于摩擦发电、压力发电等自供能模式, 柔性可穿戴电池凭借其高能量密度和稳定的能量输出成为主要的供能方式^[10,11]. 由于可穿戴电池与人体接触密切, 其柔性和安全性尤为重要^[12]. 纤维具备良好的柔韧性、透气性和可延展性, 满足可穿戴电池的发展需求. 此外, 纤维形态赋予可穿戴电池更广泛的应用空间, 包括创新的织物形态和微型化植入等^[1,13-17]. 因此, 纤维电池被认为是下一代柔性电池的理想形式之一.

纤维电池因其体积小、延展性好、柔性等优点, 在可穿戴能源器件、植入式能源器件等方面有广泛应用前景^[10,18]. 然而, 由于纤维具有较大长径比的特点,

其制备与性能表现面临诸多挑战, 尤其在动态弯曲的应用场景下, 纤维电池的稳定性面临更大挑战^[19]. 尽管已有研究对纤维电池的种类^[20-22]、制备工艺^[23,24]、设计策略^[25,26]以及应用场景^[25,27]进行了概述, 但深入剖析纤维结构对电池性能影响的研究相对匮乏. 本文旨在从纤维的本征特性出发, 深入探讨纤维结构与形态对纤维电池性能的影响以及其所带来的机遇与挑战. 首先, 回顾纤维电池的发展历程, 介绍其基本结构, 阐述其在可穿戴能源器件和植入式能源器件中的应用价值. 之后, 分析纤维形态对电池电化学性能的影响, 包括纤维弯曲界面对电场分布的影响、纤维电极制备问题以及凝胶电解质的局限性, 阐述其可能的性能提升空间和面临的挑战. 接着, 在静态力学性能和动态力学稳定性方面, 说明纤维电池在服役条件下面临的要求和挑战. 最后, 分析讨论纤维电池在特定场景中的优势, 包

引用格式: 齐乐, 张莹莹. 纤维电池: 现状、机遇与挑战. 科学通报, 2025, 70: 2673-2683

Qi L, Zhang Y. Progress, challenges and opportunities for fibrous batteries (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 2673-2683, doi: [10.1360/TB-2024-0511](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0511)

括可穿戴织物体系和植入医疗设备中的潜在应用,并展望其未来研究方向和发展趋势。

1 纤维电池的发展历程与基本结构

纤维电池经历了从单一类型、低柔性到多样化、高柔性的发展历程(图1(a)). 2012年,基于弹簧金属电极的纤维锂离子电池被首次报道,尽管该电池呈现纤维形态,但并不具备柔性^[28]. 随后,用柔性碳纳米管纤维取代硬质金属纤维制备的具备柔性的纤维状锂离子电池被报道,显示了柔性碳基电极在柔性纤维电池中的重要意义,为后续纤维电池的发展奠定了基础^[29]. 此后,纤维电池的种类不断丰富,从最初的单一锂离子电池发展至包括锌空气电池^[30]、锂硫电池^[31]、锂空气电池^[32]、铝空气电池^[33]、水基钠离子电池^[34]、镍铁电池^[35]、锌银电池^[36]、镍镉电池^[37]、锌离子电池^[38]、钾-二氧化碳电池^[39]、镁空气电池^[40]、可逆钙空气电池^[41]等多种类型。

特别值得注意的是纤维金属空气电池和纤维水基锌离子电池的发展. 金属空气电池具有超高能量密度和绿色无害的优势,适用于可穿戴应用场景,因此柔性纤维空气电池受到广泛关注,目前已成功开发出纤维

锌空气电池^[42]、纤维镁空气电池^[40]和纤维钙空气电池^[41],为柔性电子器件提供了可持续的绿色能源解决方案. 此外,水基锌离子电池的优势在于无需使用有机电解液,从而避免可能的有机电解液泄漏或燃烧带来的安全隐患,这对于可穿戴器件的安全性至关重要. 近年来,柔性纤维水基锌离子电池在凝胶电解质^[43~45]、柔性可拉伸电极基底^[19,46]等关键技术方面快速发展,电池力学性能、能量密度均有很大提升. 纤维电池作为绿色、可持续、安全的下一代柔性供能体系,在可穿戴电子器件方面有着很大潜力与广泛应用价值。

在电池的基本构成上,无论是传统的平面电池还是纤维电池,其核心组成部分均包括正极、负极和电解质. 然而,纤维电池的结构与平面电池的三明治结构有显著区别,其灵活性和适应性为电池设计提供了新的可能性. 纤维电池的结构多样性主要体现在三种电极排列方式:平行、缠绕和同轴结构(图1(b)~(d))^[27]. 平行结构电池的构建相对简单,仅需将两个电极以特定间距排列,并填充凝胶电解质. 这种结构易于加工制造^[47],但其缺点在于,当电池受到外力而发生形变时,电极间的相对位置可能会发生变化,引发短路问题^[48,49]. 相比之下,缠绕结构电池通过使用转子将一个

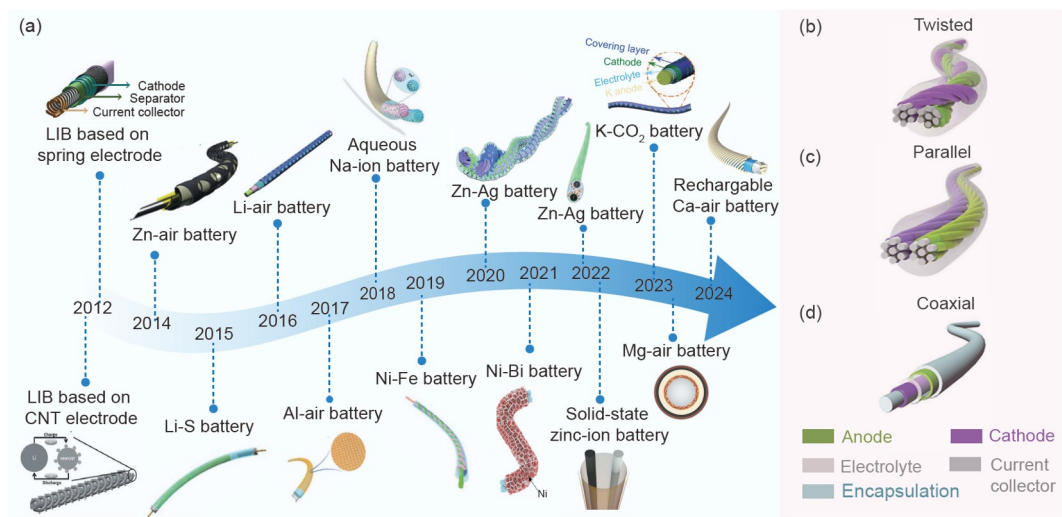


图1 (网络版彩色)纤维电池的发展历程与基本结构. (a) 纤维电池的发展历程. 基于弹簧金属电极的锂离子电池^[28]; 基于碳纳米管电极的锂离子电池^[29]; 锌空气电池^[30]; 锂硫电池^[31]; 锂空气电池^[32]; 铝空气电池^[33]; 水基钠离子电池^[34]; 镍铁电池^[35]; 锌银电池^[36]; 镍镉电池^[37]; 锌离子电池^[38]; 钾-二氧化碳电池^[39]; 镁空气电池^[40]; 可逆钙空气电池^[41]. (b) 纤维电池的缠绕结构^[27]. (c) 纤维电池的平行结构^[27]. (d) 纤维电池的同轴结构^[27].

Figure 1 (Color online) Development timeline and structures of fiber batteries. (a) Development timeline of fiber batteries. Lithium-ion battery based on spring electrodes^[28]; lithium-ion battery based on carbon nanotube electrodes^[29]; zinc-air battery^[30]; lithium-sulfur battery^[31]; lithium-air battery^[32]; aluminum-air battery^[33]; aqueous sodium-ion battery^[34]; nickel-iron battery^[35]; zinc-silver battery^[36]; nickel-cadmium battery^[37]; zinc-ion battery^[38]; potassium-CO₂ battery^[39]; magnesium-air battery^[40]; rechargeable calcium-air battery^[41]. (b) Twisted structure of fiber batteries^[27]. (c) Parallel structure of fiber batteries^[27]. (d) Coaxial structure of fiber batteries^[27].

电极均匀地缠绕在另一个电极上,这种设计在应对外力形变时表现出较好的稳定性^[50]。然而,由于电极间的紧密缠绕,这种结构在承受压力或扭曲时可能会导致内部短路,影响电池性能。同轴结构电池则采用更为精细的顺序构建法,首先构建内层电极,接着添加凝胶电解质,最后覆盖上外层电极。这种结构的优势在于能够保证电极间的良好接触,从而提高电池的电化学反应效率^[51]。然而,同轴结构的制造过程相对复杂,需要精细的工艺控制以防止制备过程中的短路。

每种电池结构都有其独特优点和挑战,电池结构的选择取决于应用需求,如便携性、耐用性、能量密度和安全性等。平行结构因其简单性而适用于对轻便性有要求的应用,而缠绕和同轴结构则在一定程度上平衡了性能和稳定性。未来的研究需继续探索优化电池结构,以提升纤维电池的整体性能和适应性,使之在各种应用场景中发挥更大的作用。

2 纤维电池的电化学性能

电池的电化学性能是其核心性能指标,在很大程度上依赖于电子和离子的高效传输。离子在电极之间传输,电子则沿电极传输^[18]。在纤维电池中,电荷传输过程需格外关注。首先,纤维电池的高长径比特性导致轴向电子传输呈现出显著的非均匀性。由于电流在长度方向上的分布不均,电子在传输过程中可能会遇到阻力,从而影响电池的整体性能。其次,纤维电池的电极表面通常具有高曲率,这在离子传输过程中造成了额外的挑战。高曲率表面可能导致离子在扩散过程中遇到阻力,形成表面扩散瓶颈,从而降低电池的充放电效率。这种不均匀的离子传输是纤维电池固有的性能限制因素。在制备过程中,纤维电池的性能还会受到电极活性材料不均匀性和稳定性的影响。活性电极材料分布不均,可能会导致电子传输路径不连续,进一步阻碍电子传输,从而降低电池的电化学反应效率。此外,低离子电导率的凝胶电解质是另一个关键因素,它直接影响了电极间的离子传输速率。电解质的性能,如离子浓度、黏度和相态,都会对电池的充放电效率和循环稳定性产生显著影响。

电场是决定电池中离子传输的关键因素,它驱动离子在电极间的迁移。在传统的平面电池中,电场分布均匀,有利于离子高效传输(图2(a))^[52]。然而,纤维电池高度弯曲的表面导致了电场分布的非均匀性,这种不均匀性直接导致离子在电极间不一致的传输过程^[18],

进而影响电极的活性物质沉积,对电池的电化学性能产生负面影响(图2(b))。为缓解这一问题,一种策略是设计多孔电极结构。多孔电极能够提供一个更均匀的活性材料分布平台,使得离子在电场作用下更有效地迁移,从而减少电极间离子传输的不均匀性。这种设计有助于改善电场的分布,减少电极间的电势差,进而提高电池的整体效率^[53]。然而,目前对于纤维电极中电场分布的研究尚处于初级阶段,理论分析和实验设计之间存在一定的空白。深入理解电场在纤维电池中的具体作用机制,包括电场强度分布模式以及电极材料性质的相互作用,对于优化电极设计和电池性能至关重要。

纤维电池的电化学性能同样受制于制备过程中产生的缺陷。纤维电极的制备策略可分为两大类,即基于纤维基底和无纤维基底(图2(c))。基于纤维基底的电极尽管能利用导电纤维作为基底,但面临活性材料不均匀和易脱落的问题;相对地,无纤维基底的电极虽避免了这些问题,但常常伴随较差的力学性能和较低的导电性。基于纤维基底的制备方法利用现有的导电纤维作为基底,通过多种技术手段实现活性材料的负载^[23]。例如,蘸涂技术通过在导电纤维表面均匀涂覆活性物质形成电极^[54];化学气相沉积和水热沉积通过气相或液相反应在纤维表面沉积活性物质,形成更为密集的表面活性物质聚集的电极结构^[55~58];静电喷涂则将活性物质和高压气体混合,喷涂在导电纤维表面^[59]。然而,这些方法制备的纤维电极活性材料易脱落,导致电极表面不均匀,影响沿电极轴向的电子传输效率。无纤维基底的电极制备直接以活性材料和高分子骨架作为原料,通过打印^[60]、湿纺^[61]、熔融纺丝^[62]、静电纺丝^[63]等方式进行纤维成型。这些方法的优势在于可以实现活性材料的直接融合,但高分子骨架的使用可能限制了活性材料的充分反应,同时高分子的绝缘性也可能阻碍电子的有效传输。为了克服这些问题,一种策略是将液态金属引入高分子骨架中,通过混合比例的控制,既保持纤维的机械强度和拉伸性,又提供了导电通路,从而显著提升了纤维电极的电导性能^[19]。

纤维电池中电解质的设计至关重要,对电池的安全性和电化学性能具有重要影响。传统的平面电池通常使用液态电解质,然而,对于纤维电池,液态电解质的使用存在潜在风险,即电解质泄漏可能导致短路或火灾等安全隐患^[59,64,65]。因此,纤维电池普遍采用凝胶电解质,从而有效避免电解质的泄漏问题,确保纤维电

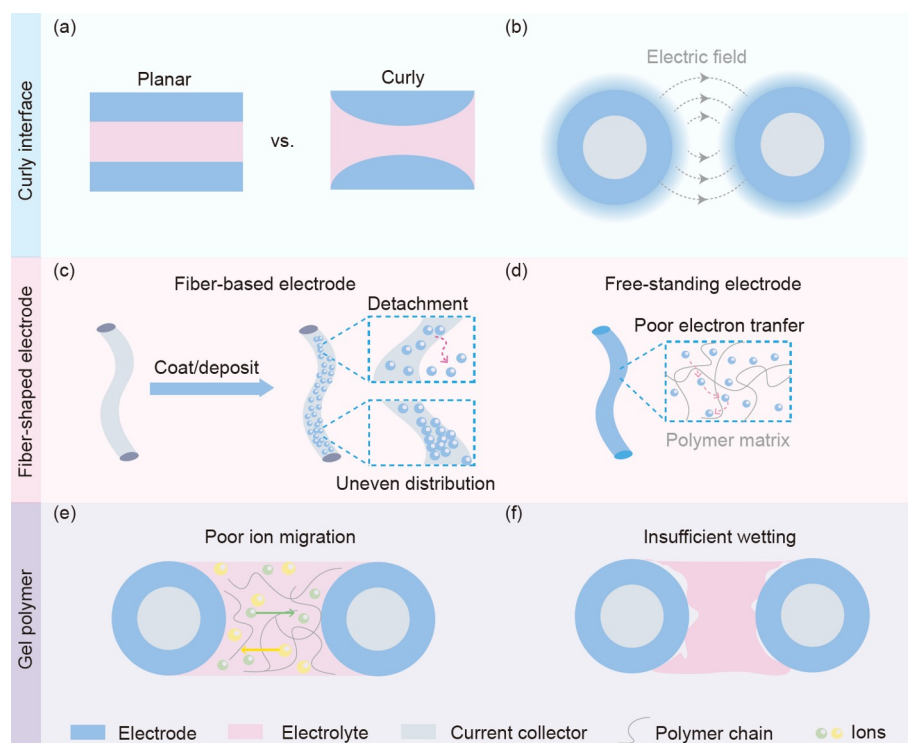


图 2 (网络版彩色)纤维电池中的电荷传输. (a) 平面电池(左)与纤维电池(右)的电极界面形态比较. (b) 纤维电池中的电场分布情况. (c) 基于导电纤维的纤维电极示意图. (d) 自支撑的纤维电极示意图. (e) 凝胶电解质中离子传输示意图. (f) 凝胶电解质与电极的界面润湿问题示意图

Figure 2 (Color online) Charge transport in fiber batteries. (a) The planar interphases and curly interphases in planar batteries (left) and fiber batteries (right), respectively. (b) Electric field distribution in fiber batteries. (c) Fiber-based fibrous electrodes. (d) Free-standing fibrous electrodes. (e) Ion transport in gel electrolytes. (f) Interfacial wetting between electrodes and gel electrolytes

池的安全性(图2(e)). 然而, 凝胶电解质的离子电导率相较于液态电解质较低, 离子电导率直接影响电池的充放电速率, 低离子电导率意味着在电极间传输离子时会遇到更大的阻力, 降低电池的效率^[66]. 此外, 凝胶电解质与纤维电极之间的力学不匹配也是一个不容忽视的因素. 由于纤维电极的高曲率和柔韧性, 其与凝胶电解质的接触界面可能会产生应力, 导致界面处的接触电阻增加. 这种界面电阻不仅影响电池的充放电效率, 还会给电池带来不稳定性^[54]. 此外, 由于凝胶电解质流动性较弱, 难以与电极界面浸润, 导致电极内部分离(图2(f)).

综上所述, 纤维电池的电化学性能受到其独特结构的显著影响, 包括高长径比和高曲率电极表面, 以及制备过程中电极材料和电解质的不均匀性和稳定性. 为了优化纤维电池的性能, 需要深入研究这些影响因素, 并寻求有效的解决方案, 如改进电极材料的制备工艺、优化电解质配方, 以及设计更有效的电极结构, 以实现电子和离子的高效传输, 从而提升电池的整体性能.

3 纤维电池的力学性能

纤维形态的电池可充分发挥纤维自身的可延展性和柔性, 因此具备较好的静态柔韧性. 然而, 静态柔韧性并不能完全满足纤维电池在动态环境中的应用需求. 在动态变形条件下, 如弯曲、拉伸等, 电池需要展现出更高的鲁棒性, 即在反复的机械应力作用下仍能保持稳定的性能.

为满足编织和植入需求, 纤维电池需具备静态力学柔性. 杨氏模量既反映纤维触感柔软度, 也直接影响其可编织性. 考虑到纤维电池在人体穿戴或植入的应用场景, 其柔韧性需与相应的组织模量匹配, 以避免在穿戴过程引发不适感, 或在植入过程中造成组织损伤^[67~69]. 例如, 可穿戴纤维锂离子电池的模量约为 80 MPa, 确保了电池在被编织成衣物时, 能够提供足够的柔韧性和舒适性, 避免在穿戴过程中造成不必要的压力或不适^[69,70]. 对于植入式电池, 其模量与人体组织模量接近, 以防止植入过程中对组织造成损伤

(图3(a))^[71]. 为实现这一目标, 在设计纤维电池时, 需对电池材料进行筛选, 并对生物组织的力学特性进行模拟, 通过优化材料配方、结构设计和加工工艺, 在保持电池高性能的同时, 具备适宜的柔韧性和生物相容性, 以满足在各种人体应用环境中的需求.

纤维电池的复杂应用场景要求其具备在大变形与重复变形下的鲁棒性. 纤维电池的动态稳定性决定了纤维电池的寿命和性能表现. 这些变形可分为弯曲变形和拉伸变形两大类.

在弯曲变形下, 纤维电池内部应力分布不均(图3(b)), 特别是在弯曲顶部^[72], 应力集中可能造成活性物质的破裂与脱落(图3(c)), 严重影响纤维电池的性能和寿命. 在电极制备过程中引入黏合剂, 通过优化其黏附性和弹性, 可有效分散和缓解应力集中, 从而提高纤维电池的抗弯曲能力^[73]. 此外, 面对微裂纹和破裂损伤, 理想的电池材料应具备一定的自修复机制, 能够在一定程度上修复这些损伤, 延长电池的使用寿命^[74,75]. 这需要深入研究材料的自愈合性能和电池内部的损伤机制, 以实现材料性能的动态优化. 另一方面, 纤维电池的多层结构在弯曲变形时也带来挑战. 各层之间的模量不

匹配可能导致弯曲过程中界面分离和错位(图3(d))^[54], 为此可设计双层流动结构电解质, 缓冲弯曲过程中的界面变形, 保证界面的良好接触, 从而增强电池的稳定性 and 耐久性^[54].

拉伸变形下, 纤维电极两端承受较大应力(图3(e)), 可能导致靠近两端处纤维的断裂(图3(f)). 此外, 由于纤维电池中电极、电解质等组成部分的弹性模量不同, 不同组成部分在拉伸过程中变形程度有所差异, 导致电池内部结构的分离与错位(图3(g))^[54]. 因此, 对纤维电池组成部分的力学性能进行精确匹配和优化, 是提高纤维电池拉伸稳定性的关键. 值得注意的是, 纤维电池的可拉伸性并非完全可逆, 即使在外力撤销后, 电池内部可能仍存在剩余应变, 使其无法恢复至初始状态. 在反复变形的使用环境中, 可能导致电池性能的逐渐退化^[72]. 目前关于纤维电池在反复变形条件下的容量保持研究尚处于初级阶段, 需要进一步深入研究和优化, 以提高其在实际应用中的稳定性.

总之, 纤维电池的力学性能要求其在静态和动态条件下都能展现出优异的性能. 这不仅需要根据具体应用场景对材料的静态柔韧性进行设计和筛选, 更需

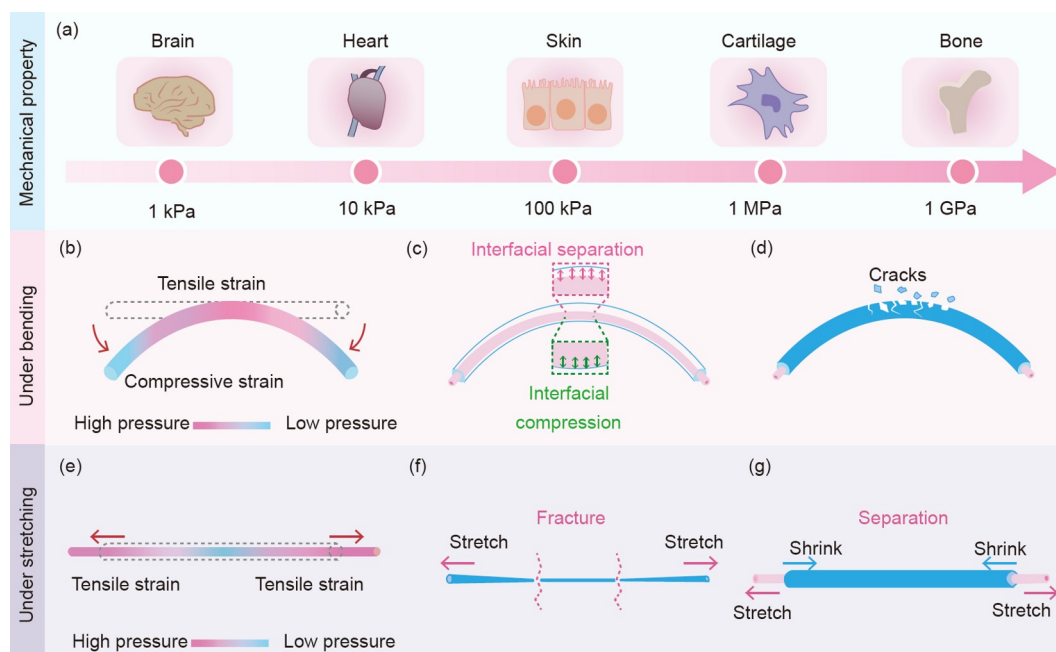


图3 (网络版彩色)纤维电池的力学性能要求. (a) 人体不同组织的模量范围. (b) 纤维电极在弯曲变形下的应力分布情况. (c) 弯曲变形造成的电极界面分离和压迫问题. (d) 弯曲变形造成的活性材料剥落问题. (e) 纤维电极在拉伸变形下的应力分布情况. (f) 拉伸变形造成的电极断裂问题. (g) 拉伸变形造成的分离问题

Figure 3 (Color online) Mechanical properties of fiber batteries. (a) Modulus of human tissues. (b) Strain distributions in fiber electrodes under bending. (c) Interfacial separation and compression in fiber batteries under bending conditions. (d) Active materials cracks under bending conditions. (e) Strain distributions under stretching. (f) Fiber electrode fracture under stretching. (g) Inner separation of fiber batteries under stretching

要关注其在动态变形条件下的鲁棒性,包括拉伸和弯曲变形下抗疲劳、抗蠕变、自修复的能力.通过深入研究和优化这些特性,有望开发出性能更优、寿命更长的纤维电池,以满足未来可穿戴设备和植入技术的多元化需求.

4 纤维电池的应用场景

纤维电池以其大长径比、高柔性、小体积等优势在可穿戴电子织物、植入式器件方面具有广泛应用前景.首先,纤维电池的高长径比使其可轻松进入狭小空间,为植入体内特定部位提供便利性.这种特性使得纤维电池能够融入人体内部环境,满足了医疗植入器件对于精确度和适应性的高要求^[40].此外,高长径比的纤维结构赋予了纤维电池独特的编织加工能力,使其在透气性方面远超传统膜器件.良好的透气性对于人体健康至关重要,尤其是在可穿戴电子设备中,能保证皮肤的正常呼吸,避免因供能设备影响用户的体验舒适度.其次,纤维电池的高柔性使得其模量具有广泛的可调控性,这使得电池能适应人体体表和体内组织的复杂力学环境,从而减少穿戴过程中的不适感和植入过程中对组织的潜在损伤风险.最后,纤维电池的小体积

使其具有卓越的能量密度,远超过常规的供能器件^[40].这意味着在有限的空间内,纤维电池能提供更为持久和丰富的能量,这对能源需求高、空间受限的应用场景,如可穿戴医疗设备、植入式电子设备等,具有显著的优势.纤维电池的独特特性使其在实际应用中展现出巨大的潜力,为实现更高效、更舒适的柔性电子器件提供了可能.

纤维电池具有可编织性,使其能够有机地融入织物中,提供高度灵活的能源供给.这种设计不仅能够作为可穿戴传感器、可穿戴柔性显示系统供能(图4(a))^[70],还能以新颖的形式作为应急能量来源,比如可为户外探险者提供临时电力保障的便携式帐篷^[47].

植入式纤维电池基于纤维电池体积小、大长径比、柔性好的优势,通过植入式、搭接式或注射式等形式持续供能或提供治疗.例如,植入式纤维状镁空气电池可提供远超其他植入电池的能量密度,为植入式传感器提供持续的能源支持,极大地提高体内传感器件的功能性和持久性(图4(b))^[40].纤维状锌空气电池可搭接在破损的神经纤维上,通过电刺激的方式促进破损神经纤维的再生和修复,为神经损伤的治疗提供了新的可能(图4(c))^[42].注射式纤维电池为微创植入式供

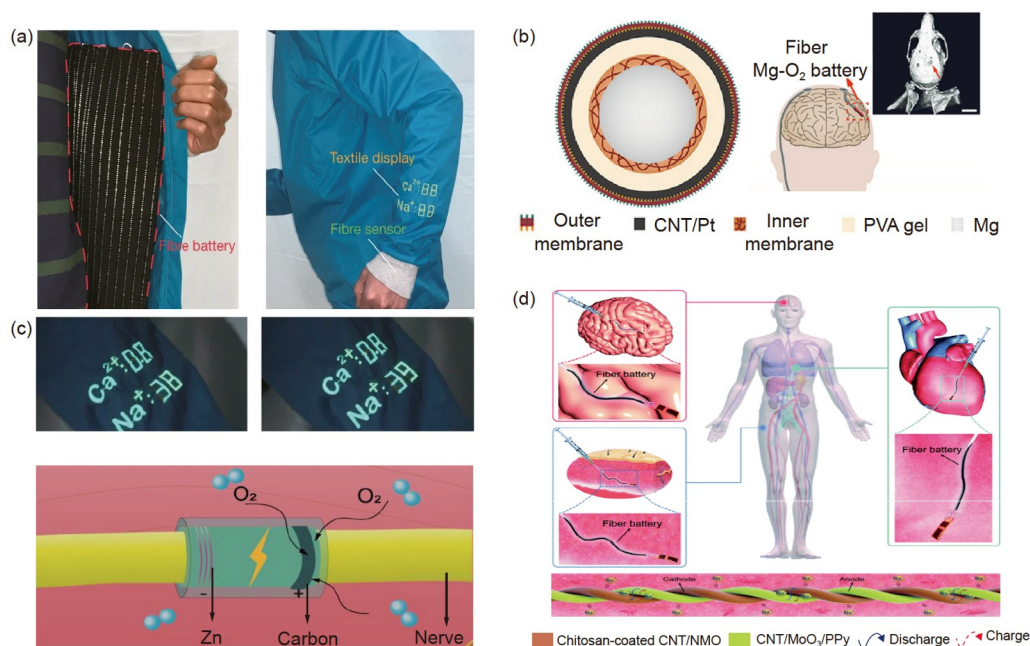


图 4 (网络版彩色)纤维电池的应用场景. (a) 可穿戴织物锂离子电池为可穿戴传感器、可穿戴柔性显示系统供能^[70]. (b) 植入式纤维镁空气电池为体内应变传感器供能^[40]. (c) 搭接式锌空气电池电刺激破损神经促进神经愈合^[42]. (d) 可微创植入的注射式纤维电池^[76]

Figure 4 (Color online) Applications of fiber batteries. (a) Textiles knitted by fiber batteries empowering wearable sensors and wearable display systems^[70]. (b) Implantable Mg-air battery empowering strain sensors *in-vivo*^[40]. (c) Fiber zinc-air battery facilitating nerve regeneration^[42]. (d) Injectable fiber batteries for minimally invasive implantation^[76]

能器件的发展开辟了新的路径,有效避免了有创植入手术可能带来的损伤,使得植入式设备的使用更加安全和便捷(图4(d))^[76]。植入式纤维电池需选取具备良好生物相容性的材料,通过体外细胞实验和体内植入实验评估其对生物体的影响。

综上所述,纤维电池凭借其独特的结构优势,如大长径比、高柔性以及小体积,不仅突破了传统的能源供给形式,而且在实际应用中展现出巨大的价值,特别是在可穿戴电子织物和植入式器件领域,可提升可穿戴器件的持久性、便利性和治疗方式的非侵入性,从而为未来智能生活和医疗健康领域带来了更多可能,成为未来能源供应的重要选择。

5 总结与展望

纤维形态赋予了纤维电池显著的优势,如高柔性、高能量密度和优良的延展性,使其在可穿戴电子织物和植入式医疗设备领域展现出广阔的应用前景。然而,纤维电池的高长径比导致其在电子和离子传输过程中表现出与平面电池截然不同的特性,这在一定程度上影响了电化学性能。这种由本征结构带来的显著局限是当前研究的一大挑战,需要通过深入的理论研究和创新的材料设计予以解决。纤维电池制备工艺的成熟性也对电池性能产生了一定的负面影响。为提升其性能,须优化制备工艺,包括材料的选择、加工方法和结构设计,以确保纤维电池在实际应用中的稳定性和效率。面对复杂的服役环境,纤维电池需具备静态柔韧性和动态鲁棒性,以承受大变形和重复变形的考验,从而提升电池使用寿命和用户体验。深入研究和理解纤维电池力学特性,对于提升纤维电池的耐用性和舒适性至关重要。

笔者认为,下一步针对纤维电池的研究重点包括以下几个方面:

首先,充分利用纤维电池的高长径比特性,设计适应性强的新型纤维电池。尽管高长径比的特性拓宽了纤维电池的应用范围,但其带来的电化学性能下降和力学稳定性问题尚未得到有效解决。潜在的解决策略

包括:(1)开发电池一体化成型技术。例如,Lu等人^[77]设计在电极表面原位成型的凝胶电解质,以解决电解质与电极的界面问题。一体化成型技术能促进纤维电池各组件的充分接触和紧密结合,有望提升纤维电池在变形等服役条件下的寿命和性能。(2)改进制造工艺。针对纤维电极负载活性材料困难的问题,需优化制造工艺,通过3D打印、微流控等高精度制造技术,精细化控制电极制备过程,确保电极材料的均匀分布和高填充率。(3)设计新型纤维电池结构。传统的纤维电池的同轴、缠绕和平行结构各有其局限性,可借鉴纺织工业的编织技术,设计新型纤维电池结构,以充分发挥其优势。未来的研究应寻求创新策略,将潜在劣势转化为优势,使高长径比成为提升电池性能和多功能性的重要驱动力,以推动下一代纤维电池的创新。

其次,理论计算和模拟在理解纤维电池机理方面具有关键作用。当前的纤维电池开发主要集中在对平面状电池的纤维化转换上,尚缺乏对纤维电池独特反应机理、电子传输和离子传输等深层次机理的深入认识和理解。因此,深入研究机理,并通过理论指导实践,将有助于设计出更高效纤维电池,从而提升其在实际应用中的性能。

最后,优化纤维电池的制备工艺,材料和结构是未来研究的另一重点,不仅可以改善电池的性能,包括能量密度、功率密度和循环稳定性等,而且有助于发展绿色、可持续的新型纤维电池。这需要材料科学、电化学、机械工程等领域的跨学科协作。

总而言之,纤维电池是一种具有变革性特征的新能源形式,其独特的形态特性为其开辟了崭新的应用空间,但同时也伴随着巨大挑战,例如当前存在电化学性能受限和力学稳定性不理想等问题。下一步研究的关键在于深入理解并有效利用其高柔性、高能量密度的优势,同时通过技术创新和策略优化,以弥补和克服纤维电池当前所面临的不足。相信在各领域研究者的共同努力下,纤维电池会以更灵活的形态和更理想的性能成为可穿戴和可植入电子器件可靠的能量来源。

参考文献

- Wang Y, Yokota T, Someya T. Electrospun nanofiber-based soft electronics. *NPG Asia Mater*, 2021, 13: 22
- Cho H, Lee I, Jang J, et al. Real-time finger motion recognition using skin-conformable electronics. *Nat Electron*, 2023, 6: 619–629
- Lu Y, Yang G, Wang S, et al. Stretchable graphene–hydrogel interfaces for wearable and implantable bioelectronics. *Nat Electron*, 2024, 7: 51–65
- Li G, Zhang M, Liu S, et al. Three-dimensional flexible electronics using solidified liquid metal with regulated plasticity. *Nat Electron*, 2023, 6:

154–163

- 5 Zhang B, Li J, Zhou J, et al. A three-dimensional liquid diode for soft, integrated permeable electronics. *Nature*, 2024, 628: 84–92
- 6 Hu H, Huang H, Li M, et al. A wearable cardiac ultrasound imager. *Nature*, 2023, 613: 667–675
- 7 Dagdeviren C, Yang B D, Su Y, et al. Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 1927–1932
- 8 Choi S, Lee H, Ghaffari R, et al. Recent advances in flexible and stretchable bio-electronic devices integrated with nanomaterials. *Adv Mater*, 2016, 28: 4203–4218
- 9 Wang C, Xia K, Wang H, et al. Advanced carbon for flexible and wearable electronics. *Adv Mater*, 2019, 31: 1801072
- 10 Sun H, Zhang Y, Zhang J, et al. Energy harvesting and storage in 1D devices. *Nat Rev Mater*, 2017, 2: 1–12
- 11 Liu R, Wang Z L, Fukuda K, et al. Flexible self-charging power sources. *Nat Rev Mater*, 2022, 7: 870–886
- 12 Wang X, Lu X, Liu B, et al. Flexible energy-storage devices: Design consideration and recent progress. *Adv Mater*, 2014, 26: 4763–4782
- 13 Dong K, Peng X, Cheng R, et al. Advances in high-performance autonomous energy and self-powered sensing textiles with novel 3D fabric structures. *Adv Mater*, 2022, 34: 2109355
- 14 Wang L, Fu X, He J, et al. Application challenges in fiber and textile electronics. *Adv Mater*, 2020, 32: 1901971
- 15 Zeng W, Shu L, Li Q, et al. Fiber-based wearable electronics: A review of materials, fabrication, devices, and applications. *Adv Mater*, 2014, 26: 5310–5336
- 16 Zhang X, Lin H, Shang H, et al. Recent advances in functional fiber electronics. *SusMat*, 2021, 1: 105–126
- 17 Xu X, Xie S, Zhang Y, et al. The rise of fiber electronics. *Angew Chem Int Ed*, 2019, 58: 13643–13653
- 18 Zeng K, Shi X, Tang C, et al. Design, fabrication and assembly considerations for electronic systems made of fibre devices. *Nat Rev Mater*, 2023, 8: 552–561
- 19 Pu J, Cao Q, Gao Y, et al. Liquid metal-based stable and stretchable Zn-ion battery for electronic textiles. *Adv Mater*, 2023, 36: 2305812
- 20 Lee S Y, Choi K H, Choi W S, et al. Progress in flexible energy storage and conversion systems, with a focus on cable-type lithium-ion batteries. *Energy Environ Sci*, 2013, 6: 2414–2423
- 21 Wang X, Jiang K, Shen G. Flexible fiber energy storage and integrated devices: Recent progress and perspectives. *Mater Today*, 2015, 18: 265–272
- 22 Ye L, Hong Y, Liao M, et al. Recent advances in flexible fiber-shaped metal-air batteries. *Energy Storage Mater*, 2020, 28: 364–374
- 23 Marriam I, Tebyetekerwa M, Xu Z, et al. Techniques enabling inorganic materials into wearable fiber/yarn and flexible lithium-ion batteries. *Energy Storage Mater*, 2021, 43: 62–84
- 24 Xia X, Yang J, Liu Y, et al. Material choice and structure design of flexible battery electrode. *Adv Sci*, 2023, 10: 2204875
- 25 Xu Q, Chen J, Loh J R, et al. Fiber-shaped batteries towards high performance and perspectives of corresponding integrated battery textiles. *Adv Energy Mater*, 2024, 14: 2302536
- 26 Gao Y, Xie C, Zheng Z. Textile composite electrodes for flexible batteries and supercapacitors: Opportunities and challenges. *Adv Energy Mater*, 2021, 11: 2002838
- 27 Mo F, Liang G, Huang Z, et al. An overview of fiber-shaped batteries with a focus on multifunctionality, scalability, and technical difficulties. *Adv Mater*, 2020, 32: 1902151
- 28 Kwon Y H, Woo S, Jung H, et al. Cable-type flexible lithium ion battery based on hollow multi-helix electrodes. *Adv Mater*, 2012, 24: 5192–5197
- 29 Ren J, Li L, Chen C, et al. Twisting carbon nanotube fibers for both wire-shaped micro-supercapacitor and micro-battery. *Adv Mater*, 2013, 25: 1155–1159
- 30 Park J, Park M, Nam G, et al. All-solid-state cable-type flexible zinc–air battery. *Adv Mater*, 2015, 27: 1396–1401
- 31 Fang X, Weng W, Ren J, et al. A cable-shaped lithium sulfur battery. *Adv Mater*, 2016, 28: 491–496
- 32 Zhang Y, Wang L, Guo Z, et al. High-performance lithium–air battery with a coaxial-fiber architecture. *Angew Chem Int Ed*, 2016, 55: 4487–4491
- 33 Xu Y, Zhao Y, Ren J, et al. An all-solid-state fiber-shaped aluminum–air battery with flexibility, stretchability, and high electrochemical performance. *Angew Chem Int Ed*, 2016, 55: 7979–7982
- 34 Guo Z, Zhao Y, Ding Y, et al. Multi-functional flexible aqueous sodium-ion batteries with high safety. *Chem*, 2017, 3: 348–362
- 35 Jin Z, Li P, Jin Y, et al. Superficial-defect engineered nickel/iron oxide nanocrystals enable high-efficient flexible fiber battery. *Energy Storage Mater*, 2018, 13: 160–167
- 36 Li C, Zhang Q, E S, et al. An ultra-high endurance and high-performance quasi-solid-state fiber-shaped Zn–Ag₂O battery to harvest wind energy. *J Mater Chem A*, 2019, 7: 2034–2040
- 37 Wang M, Xie S, Tang C, et al. Making fiber-shaped Ni//Bi battery simultaneously with high energy density, power density, and safety. *Adv Funct Mater*, 2020, 30: 1905971
- 38 Xiao X, Xiao X, Zhou Y, et al. An ultrathin rechargeable solid-state zinc ion fiber battery for electronic textiles. *Sci Adv*, 2021, 7: eabl3742
- 39 Li X, Qi G, Zhang J, et al. Artificial solid-electrolyte interphase and bamboo-like N-doped carbon nanotube enabled highly rechargeable K–CO₂

- batteries. *Adv Funct Mater*, 2022, 32: 2105029
- 40 He E, Ren J, Wang L, et al. A mitochondrion-inspired magnesium–oxygen biobattery with high energy density *in vivo*. *Adv Mater*, 2023, 35: 2304141
- 41 Ye L, Liao M, Zhang K, et al. A rechargeable calcium–oxygen battery that operates at room temperature. *Nature*, 2024, 626: 313–318
- 42 Li L, Li D, Wang Y, et al. Implantable zinc–oxygen battery for *in situ* electrical stimulation-promoted neural regeneration. *Adv Mater*, 2023, 35: 2302997
- 43 Feng D, Jiao Y, Wu P. Proton-reservoir hydrogel electrolyte for long-term cycling Zn/PANI batteries in wide temperature range. *Angew Chem Int Ed*, 2023, 62: e202215060
- 44 Zhang H, Gan X, Song Z, et al. Amphoteric cellulose-based double-network hydrogel electrolyte toward ultra-stable Zn anode. *Angew Chem*, 2023, 135: e202217833
- 45 Shi G, Peng X, Zeng J, et al. A liquid metal microdroplets initialized hemicellulose composite for 3D printing anode host in Zn-ion battery. *Adv Mater*, 2023, 35: 2300109
- 46 Lee S H, Hwang J, Song C, et al. Zinc-ion microbatteries with high operando dynamic stretchability designed to operate in extreme environments. *Adv Funct Mater*, 2023, 34: 2310571
- 47 Liao M, Wang C, Hong Y, et al. Industrial scale production of fibre batteries by a solution-extrusion method. *Nat Nanotechnol*, 2022, 17: 372–377
- 48 Song C, Li Y, Li H, et al. A novel flexible fiber-shaped dual-ion battery with high energy density based on omnidirectional porous Al wire anode. *Nano Energy*, 2019, 60: 285–293
- 49 Hoshida T, Zheng Y, Hou J, et al. Flexible lithium-ion fiber battery by the regular stacking of two-dimensional titanium oxide nanosheets hybridized with reduced graphene oxide. *Nano Lett*, 2017, 17: 3543–3549
- 50 Praveen S, Sim G S, Ho C W, et al. 3D-printed twisted yarn-type Li-ion battery towards smart fabrics. *Energy Storage Mater*, 2021, 41: 748–757
- 51 Pan Z, Zhong J, Zhang Q, et al. Ultrafast all-solid-state coaxial asymmetric fiber supercapacitors with a high volumetric energy density. *Adv Energy Mater*, 2018, 8: 1702946
- 52 Mackanic D G, Kao M, Bao Z. Enabling deformable and stretchable batteries. *Adv Energy Mater*, 2020, 10: 2001424
- 53 Wang H, Yi H, Zhu C, et al. Functionalized highly porous graphitic carbon fibers for high-rate supercapacitive electrodes. *Nano Energy*, 2015, 13: 658–669
- 54 Li C, Wang W, Luo J, et al. High-fluidity/high-strength dual-layer gel electrolytes enable ultra-flexible and dendrite-free fiber-shaped aqueous zinc metal battery. *Adv Mater*, 2024, 36: 2313772
- 55 Ni J, Yan H, Wang A, et al. MOCVD-derived highly transparent, conductive zinc- and tin-doped indium oxide thin films: Precursor synthesis, metastable phase film growth and characterization, and application as anodes in polymer light-emitting diodes. *J Am Chem Soc*, 2005, 127: 5613–5624
- 56 Zhou Y, Wang C, Lu W, et al. Recent advances in fiber-shaped supercapacitors and lithium-ion batteries. *Adv Mater*, 2020, 32: 1902779
- 57 Zhang H, Xiong T, Zhou T, et al. Advanced fiber-shaped aqueous Zn ion battery integrated with strain sensor. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14: 41045–41052
- 58 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. 科学通报, 2023, 68: 1653–1665]
- 59 Guo C, Zhou J, Chen Y, et al. Integrated micro space electrostatic field in aqueous Zn-ion battery: Scalable electrospray fabrication of porous crystalline anode coating. *Angew Chem Int Ed*, 2023, 135: e202300125
- 60 Wang Y, Chen C, Xie H, et al. 3D-printed all-fiber Li-ion battery toward wearable energy storage. *Adv Funct Mater*, 2017, 27: 1703140
- 61 Xia Z, Li S, Wu G, et al. Manipulating hierarchical orientation of wet-spun hybrid fibers via rheological engineering for Zn-ion fiber batteries. *Adv Mater*, 2022, 34: 2203905
- 62 Loke G, Yan W, Khudiyev T, et al. Recent progress and perspectives of thermally drawn multimaterial fiber electronics. *Adv Mater*, 2020, 32: 1904911
- 63 Lei Y, Wang Q, Peng S, et al. Electrospun inorganic nanofibers for oxygen electrocatalysis: Design, fabrication, and progress. *Adv Energy Mater*, 2020, 10: 1902115
- 64 Fan X, Wang H, Liu X, et al. Functionalized nanocomposite gel polymer electrolyte with strong alkaline-tolerance and high zinc anode stability for ultralong-life flexible zinc–air batteries. *Adv Mater*, 2023, 35: 2209290
- 65 Qin Y, Li H, Han C, et al. Chemical welding of the electrode–electrolyte interface by Zn-metal-initiated *in situ* gelation for ultralong-life Zn-ion batteries. *Adv Mater*, 2022, 34: 2207118
- 66 Yang J, Yu Z, Wu J, et al. Hetero-polyionic hydrogels enable dendrites-free aqueous Zn–I₂ batteries with fast kinetics. *Adv Mater*, 2023, 35: 2306531
- 67 Ye T, Wang J, Jiao Y, et al. A tissue-like soft all-hydrogel battery. *Adv Mater*, 2022, 34: 2105120

- 68 Kim J, Ghaffari R, Kim D H. The quest for miniaturized soft bioelectronic devices. [Nat Biomed Eng](#), 2017, 1: 0049
- 69 Park S I, Brenner D S, Shin G, et al. Soft, stretchable, fully implantable miniaturized optoelectronic systems for wireless optogenetics. [Nat Biotechnol](#), 2015, 33: 1280–1286
- 70 He J, Lu C, Jiang H, et al. Scalable production of high-performing woven lithium-ion fibre batteries. [Nature](#), 2021, 597: 57–63
- 71 Li Y, Li N, Liu W, et al. Achieving tissue-level softness on stretchable electronics through a generalizable soft interlayer design. [Nat Commun](#), 2023, 14: 4488
- 72 Li H, Tang Z, Liu Z, et al. Evaluating flexibility and wearability of flexible energy storage devices. [Joule](#), 2019, 3: 613–619
- 73 Wang Y, Zhu J, Chen A, et al. Spider silk-inspired binder design for flexible lithium-ion battery with high durability. [Adv Mater](#), 2023, 35: 2303165
- 74 Huang S, Wan F, Bi S, et al. A self-healing integrated all-in-one zinc-ion battery. [Angew Chem Int Ed](#), 2019, 58: 4313–4317
- 75 Narayan R, Laberty-Robert C, Pelta J, et al. Self-healing: An emerging technology for next-generation smart batteries. [Adv Energy Mater](#), 2022, 12: 2102652
- 76 Zhao Y, Mei T, Ye L, et al. Injectable fiber batteries for all-region power supply *in vivo*. [J Mater Chem A](#), 2021, 9: 1463–1470
- 77 Lu C, Jiang H, Cheng X, et al. High-performance fibre battery with polymer gel electrolyte. [Nature](#), 2024, 629: 86–91

Summary for “纤维电池: 现状、机遇与挑战”

Progress, challenges and opportunities for fibrous batteries

Le Qi & Yingying Zhang*

Key Laboratory of Organic Optoelectronics and Molecular Engineering of the Ministry of Education, Department of Chemistry, Tsinghua University, Beijing 100084, China

* Corresponding author, E-mail: yingyingzhang@tsinghua.edu.cn

With the rapid development of wearable electronics, the demand for flexible and portable energy sources is on the rise. Among the solutions emerging to meet these demands, fiber batteries stand out for their remarkable flexibility, extensibility, and compact dimensions. On one hand, the unique high aspect ratio of fiber batteries brings outstanding flexibility. On the other hand, it poses unavoidable challenges in terms of both electrochemical performance and mechanical properties. Despite progress in fabrication, design and novel components of fiber-shaped batteries, previous reviews have not focused on how fibrous structures impact battery performance. This review aims to clarify the relationship between the high-aspect-ratio fibrous structure and battery performance to pave the way for designing next-generation fiber batteries.

First, we look back on the historical development of fiber batteries and highlight their pivotal role in wearable and implantable electronic devices. The historical context highlights the evolution of fiber batteries from novel ideas to practical components in advanced flexible electronics. Subsequently, we discuss how the fiber structure influences electrochemical performances of fiber batteries. Key factors such as electrode reaction rates and charge transport efficiency are examined in details. The high aspect ratio of fiber electrodes causes uneven current distribution, leading to non-uniform electrochemical reactions along the fiber length. Additionally, the highly curved surface of fiber electrodes induces non-uniform electric field distribution among the electrodes, which adversely affects ion transport efficiency. These structural challenges highlight the need for innovative design strategies to optimize the electrochemical performance of fiber batteries.

Furthermore, we address the current limitations in fabrication techniques for fiber batteries. The challenges include the instability and non-uniformity in producing fiber electrodes from powdery materials, which often result in inconsistent electrochemical performance. Additionally, there is a critical issue with the insufficient ionic conductivity of gel electrolytes, which hampers optimal ion transport within the batteries. A thorough understanding of these fabrication issues is crucial for developing effective strategies aimed at enhancing the overall performance, stability, and reliability of fiber batteries, thereby advancing their practical applications in wearable and implantable electronics.

In terms of mechanical performance, this review examines the intrinsic flexibility of fiber batteries in various scenarios, including their integration into textiles and implantation *in vivo*. We discuss the dynamic robustness of these batteries under repeated deformation and the implications for battery durability. Enhancing the mechanical robustness of fiber batteries is essential for their practical application in flexible and wearable electronics, where they must withstand constant bending and stretching.

Last but not least, we focus on the unique advantages of fiber batteries for power supply in wearable electronics and implantable electronics. Their compact and flexible nature makes them particularly suited for these applications, providing a seamless integration with the form factors of edge-cutting electronic devices. Future research directions are outlined, focusing on innovative fiber design, a deeper theoretical understanding of the electrochemical and mechanical interactions within fiber batteries, and advanced fabrication techniques. These advancements will facilitate the broader adoption of fiber batteries in the future, driving innovation in the realm of flexible and wearable electronics.

wearable electronics, smart fibers, flexible batteries, fiber batteries

doi: [10.1360/TB-2024-0511](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0511)