

· 专论 ·

纤维储能电池的设计和应用*

江海波 廖萌 常非凡 张琨 姜怡 王兵杰** 彭慧胜

(聚合物分子工程国家重点实验室 复旦大学高分子科学系 先进材料实验室 上海 200438)

摘要 以纤维锂离子电池为代表的纤维储能电池凭借其独特的一维结构,在物联网、可穿戴技术等新兴领域发挥着重要作用.然而,这类纤维储能电池在面向实际应用的过程中存在高效制备和性能匹配等难题尚未解决,最终无法实现由科学理论向实际应用的过渡.本文结合本课题组近期工作,总结了柔性纤维储能电池方面的研究进展.结合纤维锂离子电池的电化学性能、力学性能以及使用耐受性,首先讨论并归纳了纤维锂离子电池的连续化制备方法;进一步,总结了基于连续化制备的纤维锂离子电池所构建的储能织物以及与可穿戴设备集成等方面的应用,重点聚焦于其在大数据云健康、未来通讯、生物医学等领域的应用场景;最后,总结了柔性纤维储能电池的发展现状并展望了该研究领域的未来发展方向.

关键词 纤维电池,连续化制备,储能织物,集成

可穿戴设备被认为是继计算机、移动终端、智能终端之后的又一次科技革命,有望显著推动微电子、物联网、大健康、人工智能等诸多领域的快速发展.可穿戴设备在医疗保健、通讯、运动监测等诸多领域发挥着重要的作用,给人们的日常生活带来了巨大的变化^[1-5].现有可穿戴设备的能源供给系统主要是商用锂离子电池,它们由刚性且紧密堆叠的多层电极构成,其电极材料在弯曲、拉伸和扭转等使用场景中易从集流体上剥离,造成电化学性能下降,进而导致严重的安全问题^[6-10].此外,其刚性的块体结构也同样制约了可穿戴设备的发展,因此迫切需要开发具有优异柔性的新型储能设备^[2,8,11-15].

在过去的几十年中,人们对传统锂离子电池的组件进行了部分替换并优化了制造工艺,获得了薄膜电池和微电池^[16-20].它们虽具备一定柔性,但仍存在集成度较低、较难与人体贴合、不耐复杂形变等问题^[21].与传统的三维或二维结构不同,以纤维锂离子电池为代表的纤维储能器件具有独特的一维结构,其直径通常介于几十到几

百微米之间,轻巧灵活可以适应弯曲、扭转和拉伸等各种形变^[5,8,22-25].更为重要的是,它有望通过低成本的纺织技术编织成柔性透气的储能织物,从而与人们的日常衣物进行简单、高效的集成^[26-28].

虽然纤维锂离子电池具有诸多优点,但是其面向实际应用存在高效制备和性能匹配等难题需要解决,前期人们对纤维锂离子电池的连续化制备^[29,30]和性能优化(能量密度^[29,31-37]、倍率性能^[32,38]和循环寿命^[30,39,40])进行了探究,但实现大规模应用仍具有一定挑战性.本文基于近年来科研工作者们在纤维储能器件方面的研究工作,针对实际应用需求,重点介绍了纤维锂离子电池在连续化制备以及性能优化方面的探索与应用,同时对纤维锂离子电池的未来发展方向进行了展望.

1 纤维储能电池的连续化制备

不同于层层堆叠形成的平面储能器件,纤维储能电池得益于其独特的柔性一维结构,在可穿

* 高分子优秀青年学者专辑; 2022-12-30 收稿, 2023-02-13 录用, 2023-03-16 网络出版; 国家自然科学基金(基金号 52222310)资助项目.

** 通讯联系人, E-mail: wangbingjie@fudan.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2022.22454

戴和可植入应用方面展现出一系列优势^[41]。一般来说,纤维储能电池的典型结构主要可分为3类:同轴、缠绕和平行结构(图1)^[41,42]。其中,同轴结构是纤维器件普遍采用的器件构型。同轴结构以一根纤维电极作为基底,在纤维表面依次涂覆有内层电极活性层、凝胶电解质层以及外层电极活性层,活性层和电解质层的单层厚度均为微米级,可通过连续挤出、浸涂和三维打印等方法构建^[43-46]。纤维电极和活性层的界面接触显著影响器件的电荷传输^[47],因此在同轴结构中各界面间的紧密接触对实现高性能纤维储能器件至关重要。但在实际制备过程中,在一根高曲率的纤维电极表面沉积厚度均匀的多层组分,并且在形变过程中保持多个界面之间的稳定性,对器件的制备工艺提出了极高的要求。缠绕结构纤维储能电池通常是在两根纤维电极上各自负载活性材料,并以特定的角度和螺距互相缠绕构建器件^[48]。与同轴结构相比,缠绕结构将外层电极转换为纤维

的形态,同时正负极活性材料分配到两根纤维电极上,有效降低了多层活性材料(活性层、电解质层)制备过程的工艺难度,并且可以通过机械装置进行连续规模化制备,是目前纤维电池广泛采用的一类器件结构^[8]。平行结构要求2个纤维电极按照平行排列的方式进行组装,不同于同轴结构和缠绕结构,平行结构储能器件为了简化制备工艺,往往采用不含隔膜的两电极进行组装,而两个平行的纤维电极很容易在液体电解质中相互接触发生短路。即使采用含有隔膜的两电极进行组装,也面临两电极之间的间距在液态电解液中不稳定的情况,进而影响整个纤维储能器件的性能稳定性,因此,平行结构储能器件往往使用半固态或固态电解质来解决上述问题^[49,50]。综上所述,与平行结构和同轴结构相比,缠绕结构具备制备简单和直径可调等特点,更具规模化生产潜力。

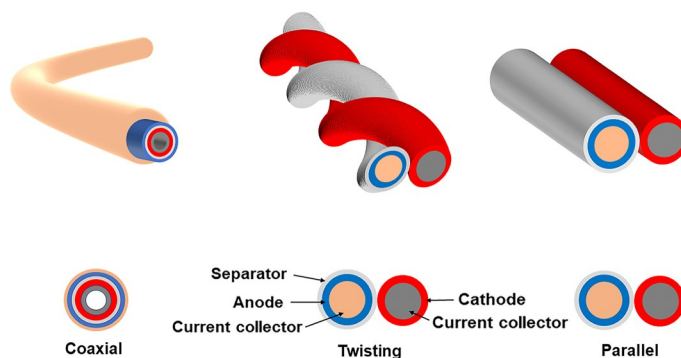


Fig. 1 Coaxial, twisting, and parallel configurations for fiber batteries.

1.1 纤维储能电池的电极制备

具有柔性、导电、高电化学活性的纤维电极是构建纤维储能器件的关键,纤维电极的合理选择有助于实现纤维储能电池的多功能和高性能^[41,42,51]。一方面,在高曲率纤维表面沉积连续、稳定的活性材料层具有挑战性,合理设计纤维电极的组成和微观结构尤为重要。另一方面,纤维电极需具备柔性、良好的机械强度和高导电性。目前,纤维电极的研究中常用的电极主要分为金属材料基电极、碳材料基电极和高分子材料基电极。

1.1.1 金属基纤维电极

金属纤维电极经具有较低的制造成本和广泛的材料选择性,是目前使用最为普遍的导电材

料^[52,53]。表1列出了常见金属材料的电导率、密度和杨氏模量。

Table 1 Properties of common metal materials.

Metal materials	Electric conductivity $\times 10^{-6}$ (S/m)	Density (g/cm ³)	Young's modulus (GPa)
Cu	58.8	8.9	110-128
Al	35.5	2.7	70
Stainless steel	10.4	7.8	211
Ti	2.4	4.5	116
Ni	14.4	8.9	200
Ag	63.0	10.5	83

金属纤维电极的高导电性有利于电荷传输以及降低器件内阻^[54,55]。不过,金属纤维电极密度较大且具有疲劳性,在光滑金属线的表面涂覆的

活性层载量受限,在连续弯折变形过程中容易发生碎裂导致活性材料脱落.因此,通过在金属纤维上加工形成多级微结构、涂覆与刻蚀等策略,可显著提高纤维电极比表面积和活性层载量^[56],进一步,研究者们通过优化活性材料、导电剂和黏接剂的配比,特别是导电剂和黏接剂的配比,一方面满足浆料在高曲率金属纤维表面的均匀涂覆和黏接性,另一方面也要满足活性物质中良好的导电通路,二者的平衡配合商业成熟的浸涂工艺,在具有一定粗糙度的铝丝和铜丝上成功规模化制备出金属材料基纤维电极,满足一定的电化学和力学等性能要求^[57].

1.1.2 碳基纤维电极

相比于金属材料基纤维,碳基纤维(如碳纳米管纤维、石墨烯纤维和碳纤维等)在纤维储能电池领域也具有较好的应用前景^[58].

碳纳米管纤维具有较高的比表面积,机械强度和柔韧性,可以耐受弯曲和拉伸,是一种较为理想的纤维电极材料.碳纳米管阵列纺丝法是指前驱体为在基底上排列的碳纳米管阵列,通过外力的牵引拉伸和碳纳米管之间的作用力制备碳纳米管纤维.这种取向结构可以有效地将单个碳纳米管的特性扩展到宏观纤维^[59].Li等对通过对溶剂的优化,所得碳纳米管阵列具有良好的力学性能,拉伸强度和弹性模量分别为2.38和110 GPa,电导率也高达 5×10^4 S/m^[60];在进一步分层和螺旋组装后,它具有接近软组织的弯曲刚度^[61,62],为需要一定柔性和强度的纤维电池甚至具有一定生物相容性的纤维储能电池的研究提供了可能性.此外,碳纳米管纤维的独特结构可以实现活性材料的高负载,有利于构建高容量纤维电池器件,在此基础上,研究者们开发了一种可控空心壁的新型碳纳米管,通过将碳纳米管芯与氮掺杂石墨烯壳之间形成的空心结构有效地用于锂的存储,既保留了其活性材料高负载性的优势,又进一步提升了其在高效储锂方面的性能,实现了具有优异电化学性能的纤维储能电池,可逆比容量达到635 mAh/g^[63].

石墨烯是一类具有 sp^2 杂化碳原子的单层二维材料,具有优异的力学、电学和热学性能^[64].将单个石墨烯片组装成纤维,有望将其优异性能从微观上扩展到宏观水平.石墨烯纤维的制备可以通过石墨烯液晶相的湿法纺丝、水热处理,以

及化学气相沉积等方法实现^[65-67].相较于碳纳米管纤维,石墨烯纤维更容易制备,成本更低,但其柔性、抗拉强度较差,典型的石墨烯纤维的抗拉强度为 $\sim(180 \pm 30)$ MPa,断裂伸长率为 $\sim(4 \pm 0.3)\%$ ^[68],无法直接应用于纤维储能电池领域.

碳纤维已实现了规模化生产,具有优异的力学和电学性能.其具有7 GPa的高抗拉强度、良好的抗蠕变性能、低密度($1.75 \sim 2.00$ g/cm³)和高模量(>900 GPa)^[69].然而相比于碳纳米管和石墨烯,以PAN基碳纤维为代表的主流碳纤维具有致密和紧凑的结构,有限的比表面积限制了其电化学性能^[70],和石墨烯纤维一样,无法单直接用于纤维储能电池领域,可考虑与其他材料协同形成复合材料,以提高其综合性能.

1.1.3 高分子基纤维电极

高分子纤维,如聚酰胺、聚氯乙烯和聚酯等,已广泛应用到生产和生活的方方面面.高分子纤维通常具有结构设计多样、化学稳定性好、低密度和高柔韧性的优点^[71].然而,高分子纤维导电性很低的特点使其难以用于构建电子器件,导电高分子如聚苯胺、聚吡咯和聚噻吩等在掺杂条件下具有良好的导电性^[72],但其加工性较差难以制成纤维.因此,与碳基材料和金属材料协同构建复合材料是提高高分子纤维导电性的有效策略^[73,74].例如,在棉布表面涂覆碳纳米管悬浮液,可以构建有效的电荷传输路径^[75].另外,在分子纤维挤出过程中引入银纳米粒子、碳纳米管,可以显著提高导电性和拉伸强度,同时高分子基体提供良好的拉伸性能,制备的复合纤维展现出优异的电学和力学性能(电导率为17640 S/cm,断裂伸长率为50%)^[76].

1.2 典型纤维锂离子电池的制备

锂离子电池凭借其优异的电化学性能,成为商业化最成功的储能电池之一,对其进行纤维化既可以满足用电器的性能需求,又可以满足可穿戴设备的使用场景要求,具有重要意义.

最初,研究者们将钴酸锂正极浆料通过蘸涂的方式负载到铝丝上得到铝/钴酸锂纤维正极,将镍锡合金通过电沉积负载在铜丝上作为负极纤维,然后将2根纤维电极缠绕到棒状基底上组装得到锂离子电池,该电池表现出1 mAh/cm的比容量和20.4 mWh/cm的能量密度^[31];随后,研究者们通过电沉积将二氧化锰负载到碳纳米管纤维

集流体上,得到了纤维锂离子电池的正极,同时,使用锂金属丝作为负极纤维,与碳纳米管/二氧化锰复合纤维组装成纤维锂离子电池,该电池在 5×10^{-4} mA的电流下表现出 109.62 mAh/cm^3 (218.32 mAh/g)的比容量和 92.84 mWh/cm^3 的能量密度,在可穿戴器件中展现出一定的应用前景.然而,由于缺乏相应纤维负极与之相匹配,且金属锂负极具有极大的安全隐患,制约了此类纤维电池的实际应用^[32];进一步,研究者们利用电子束蒸发将硅纳米颗粒沉积到取向碳纳米管薄膜上,然后在 180 r/min 的转速下加捻得到碳纳米管/硅复合纤维负极,它具有良好的柔性,在反复弯曲后其结构保持稳定.与金属锂丝相结合组装了半电池,测试其电化学性能,在经过50次充放电循环后仍然能保持58%的可逆容量,显著优于纯硅负极及镀硅铜箔,同时碳纳米管/硅复合纤维表现出良好的柔韧性,它能够在连续弯曲100次后保持其原有的电化学性能,在20次形变后,依然保持了94%的容量.但是依然需要进一步地提高复合纤维的电化学稳定性,以满足实际应用的要求^[33].

在全电池研究方面,研究者们使用碳纳米管/锰酸锂复合纤维作为纤维正极,用碳纳米管/硅复合纤维代替锂金属作为纤维负极.将水热法合成的锰酸锂颗粒分散于溶剂中沉积到取向碳纳米管薄膜上,进一步加捻得到复合纤维正极(图2(a)),

设计了一种三明治结构的多层复合纤维,将使用电子束蒸发法沉积有硅负极的碳纳米管薄膜夹在两层碳纳米管薄膜之间,然后加捻成具有多层结构的复合纤维负极,有效改善了由于硅负极体积膨胀造成的容量衰减.将碳纳米管/锰酸锂纤维正极、碳纳米管/硅纤维负极依次缠绕到棉纤维上,并涂布凝胶电解质,经过封装得到纤维全电池,该纤维全电池的初始的放电比容量为 106.5 mAh/g (相对于碳纳米管/锰酸锂正极),在100圈后容量保持率为87%,在数百圈循环后依然稳定工作,电化学性能优异.然而,该全电池并不能充分利用硅电极的高容量,其容量仅为 106.5 mAh/g ,此外,负极和正极之间的容量匹配使得制备过程复杂,限制了其实际应用^[35];随后,研究者们以碳纳米管/锰酸锂和碳纳米管/钛酸锂复合纤维分别作为正负电极构造了纤维锂离子电池(图2(b)),在 0.01 mA 的电流下,纤维钛酸锂/锰酸锂电池的比容量高达 138 mAh/g (基于纤维负极),体积能量密度为 17.7 Wh/L ,体积功率密度为 560 W/L (基于电极纤维总体积,以 0.05 mA 的电流进行全电池的循环稳定性测试,循环100圈后容量保持率为85%,库仑效率超过80%;得益于碳纳米管复合纤维良好的柔性和力学强度,纤维锂离子电池具有良好的柔性,可以被弯曲成不同的形状,依然可以保持结构和性能的稳定,不同拉伸形变下,可拉伸纤维电池仍具有良好的容量保持

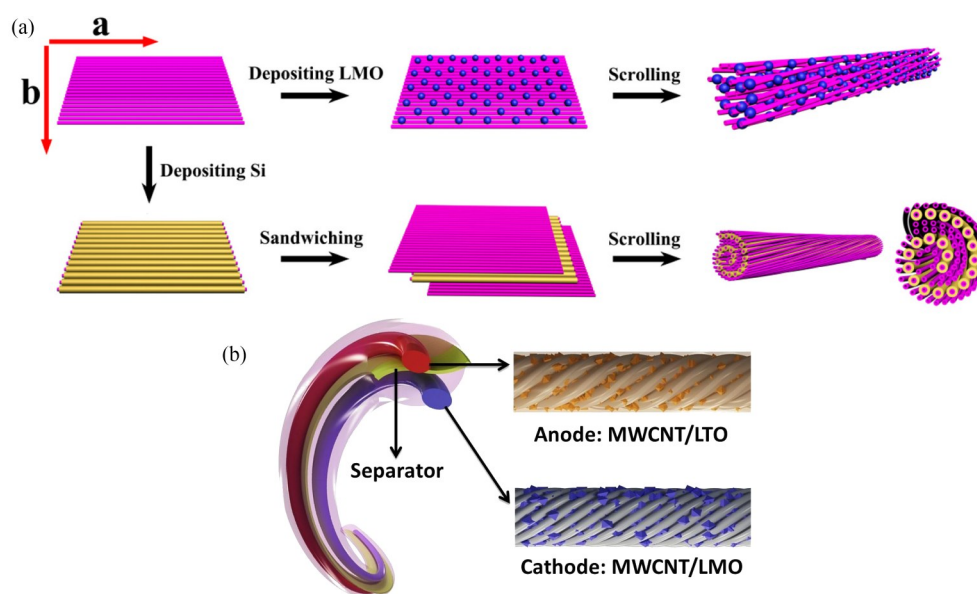


Fig. 2 (a) Schematic illustration of the synthesis of high-performance composite yarns (Reproduced with permission from Ref.[35]; Copyright (2014) American Chemical Society); (b) Structure of the flexible wire-shaped lithium-ion battery (Reproduced with permission from Ref.[34]; Copyright (2014) John Wiley and Sons).

率,在拉伸比为100%时,比容量仍然保持在90%以上,在经过了200次拉伸循环后,比容量保持在80%以上.使用聚二甲基硅氧烷代替橡胶纤维作为弹性基体,可以进一步提高纤维电池的拉伸比至600%,在可穿戴设备中具有良好的应用前景,通过编织可以得到与衣物集成的柔性储能织物^[34];进一步,研究者们设计了以锂化硅/碳纳米管杂化纤维为内负极,聚合物凝胶填充其间作为电解质,碳纳米管片为外正极的同轴结构,开发了具有高能量密度和超高柔性的硅氧纤维电池,该电池具有512 Wh/kg的高能量密度,并且可以在弯曲20000次后正常工作,这些纤维电池已被进一步编织进了展现出规模应用前景的柔性纺织品^[77].

1.3 纤维锂离子电池的连续化制备

纤维锂离子电池作为纤维储能器件的代表,凭借其较高的能量密度,受到人们越来越强烈的关注,但纤维锂离子电池的连续化制备面临诸多挑战.首先,目前所制备的大多数单根纤维电池的长度较短,实际容量较低,虽然可以通过串并联方式增加电池容量,但是也伴随着电池一致性和串并联引入的多接口在柔性形变过程失效的挑战;其次,电池的性能发挥受其内阻大小的影响较大,人们普遍认为电池长度越长,内阻越大,这一认知极大地限制了纤维锂离子电池的连续化规模制备^[23,78-80];最后,纤维锂离子电池的制备工艺与平面锂离子电池相比,区别较大,其中隔膜和封装等工艺都面临着极大的挑战^[81-86].

为了推进纤维储能电池的实际应用,研究者们针对上述问题,首先建立了针对缠绕结构的纤维锂离子电池的等效模型(图3(a)),系统揭示了纤维状锂离子电池内阻随长度的依赖关系,即随着电池的长度增加,其内阻逐渐降低并趋于稳定,该稳定值受到电池集流体内阻的影响较大(图3(b)),该理论一方面为纤维电池的连续化生产和应用提供了可能性,另一方面也为后期同结构纤维储能器件的发展奠定了理论基础.随后通过构建连续化产线模型(图3(c)),结合活性材料筛选、工艺参数调节和封装工艺的创新,在2021年成功实现了纤维锂离子电池连续化制备,取得了从实验室层面到规模化生产的突破(图3(d))^[57].其中隔膜和封装工艺为主要难点,前者既要求在一维纤维尺度上实现隔膜的均匀覆盖,又需要满足连

续化制备要求,因此传统的平面隔膜覆盖方式已不再适用.研究者们利用条带状隔膜连续包绕的工艺,通过调节条带状隔膜的宽度和包绕角度,实现了在纤维电极表面均匀连续覆盖隔膜的要求;后者既要满足纤维锂离子电池对水氧透过率的要求,又要满足纤维电池应用过程中的柔性需求,研究者在平衡上述要求的前提下,对封装材料进行了细致筛选,确定以全氟乙烯丙烯共聚物为主要封装材料的前提下,通过调节封装管材的挤出工艺(温度、速率和厚度等),实现了纤维锂离子电池封装管材在隔绝性和柔性方面的平衡.通过综合上述各方面的优化,可以连续化制备米级以上的纤维锂离子电池,同时实现在一定长度范围内电池的容量随着长度增加线性增加、循环容量保持率在500圈后保持90%以上和1 C放电倍率超过90%等性能发挥,基本达到商业应用水平.同时,该连续化制备方法同样适用于其他锂离子电池体系,需要注意的是针对不同电池体系特点进行制备方法上的对应优化.在此基础上进一步采用溶液挤出法,实现了纤维锂离子电池工程化制备上的突破^[87].

2 纤维锂离子电池的性能

2.1 电化学性能

电化学性能作为纤维锂离子电池的核心指标,直接影响了电池的实际应用可能性和前景,其中,能量密度、倍率性能和循环寿命作为电池最重要的三大性能,分别直接影响了电池的续航能力、适用范围和使用寿命,对纤维储能电池的应用场景起到了决定性作用.

储能电池作为能量的储存媒介,其单位质量或体积所能存储的能量多少直接决定了其实际应用的可能性.从储能电池的整体能量密度考虑,研究者们前期通过电沉积将二氧化锰负载到碳纳米管纤维集流体上,得到了纤维锂离子电池的正极,使用锂金属丝作为负极纤维,与碳纳米管/二氧化锰复合纤维组装成纤维锂离子电池,其整体能量密度不足1 Wh/kg^[32],不能满足最基本的实际使用需求;随着对于纤维器件内部电荷传输和物质传递动力学过程以及界面稳定性的理解的加深,通过调节电池正负极结构匹配度以及浆料配比、涂覆厚度和导电剂含量等工艺方面的优化改进,现有的纤维锂离子电池能量密度已可以超

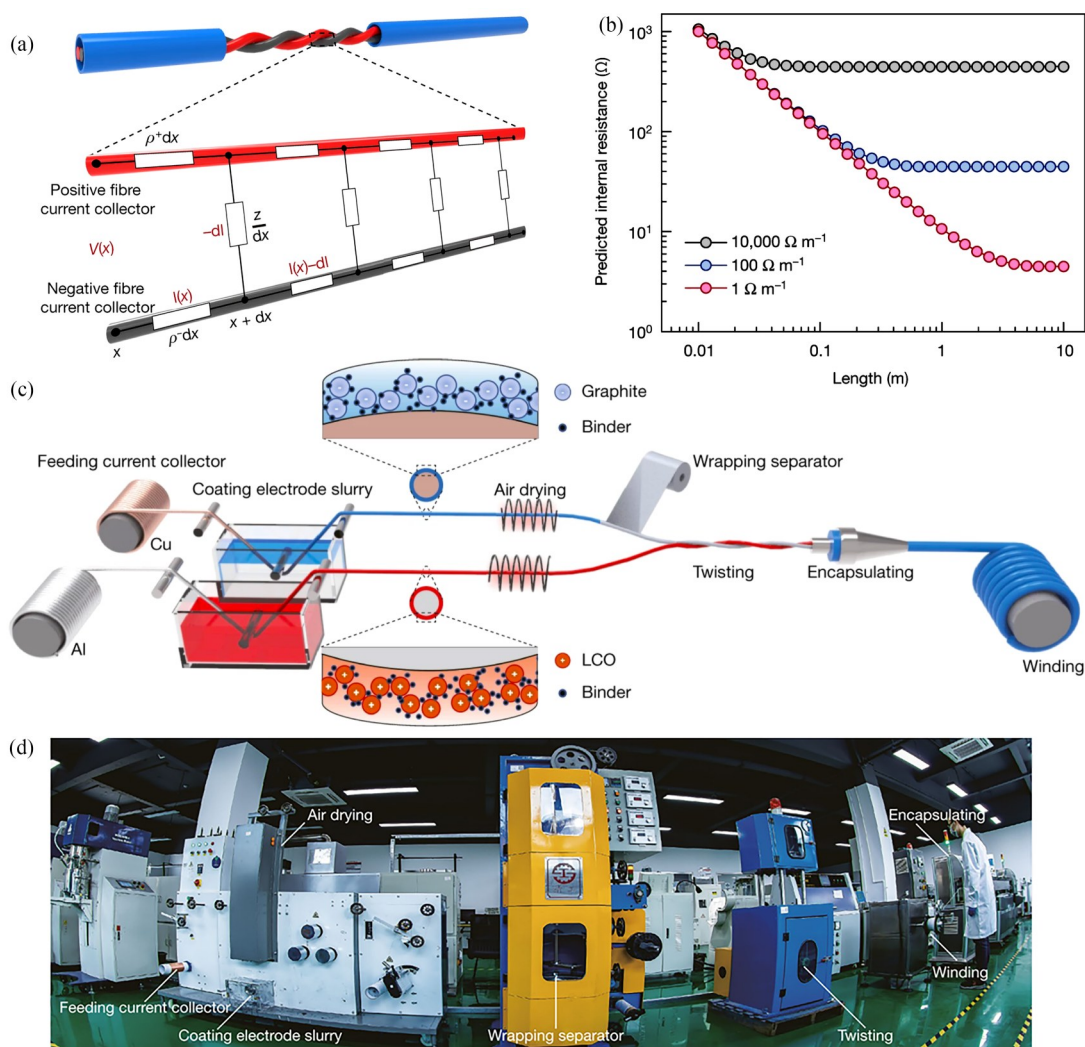


Fig. 3 (a) Equivalent circuit diagram of twisted FLIB, per unit length; (b) Graph shows that as fibre length increases, the predicted internal resistance of current collectors with different resistances with predicted values; (c) Schematic of the set-up used to produce continuous fibre lithium-ion batteries; (d) Photograph of industrial-scale fabrication line of fibre lithium-ion batteries (Reproduced with permission from Ref.[57]; Copyright (2021) Springer Nature).

过 85 Wh/kg , 并取得了第三方认证(图4(a)), 初步满足了实际使用的可能性, 并为后期纤维储能电池能量密度的进一步提升提供了宝贵经验^[57].

储能电池的倍率性能尤其是放电倍率性能决定了其应用范围, 不同的用电设备对储能电池的倍率性能提出了不同的要求. 鉴于此, 研究者们一直努力从电极材料、电解液和电极结构等方面做出积极改进, 集中体现在保证电极材料比容量发挥的前提下, 提高电池的最高放电电流大小, 但是距离实际可穿戴设备毫安级别放电电流的水平仍然具有2~4个数量级的差距^[32,34]. 进一步, 通过标准化、连续化和规模化纤维锂离子电池制备技术的运用, 保障了电池性能一致性的同时, 结合对电极配方、正负极缠绕方式和导电通路

等方面的优化, 实现了毫安级别的电流输出, 且在 1 C 放电倍率条件下的容量保持率高达 93% (图4(b)), 基本满足可穿戴设备的使用需求^[57].

相比于能量密度和倍率性能, 储能电池的循环寿命同样制约着其使用场景及成本, 一般定义电池的循环寿命为电池在一定倍率条件下充放电循环固定圈数后, 电池容量达到某一规定值(一般为电池初始容量的 80%)时, 该过程进行的完整充放电次数为电池的循环寿命. 因为需要保证电池容量等方面的要求, 纤维锂离子电池一般采用有机电解液、含锂化合物甚至金属锂负极, 而上述材料对水分较敏感, 因此, 前期纤维锂离子电池的循环寿命一般只能达到循环 100 圈容量保持率 $80\% \sim 90\%$, 通过应用单一水氧透过率较低

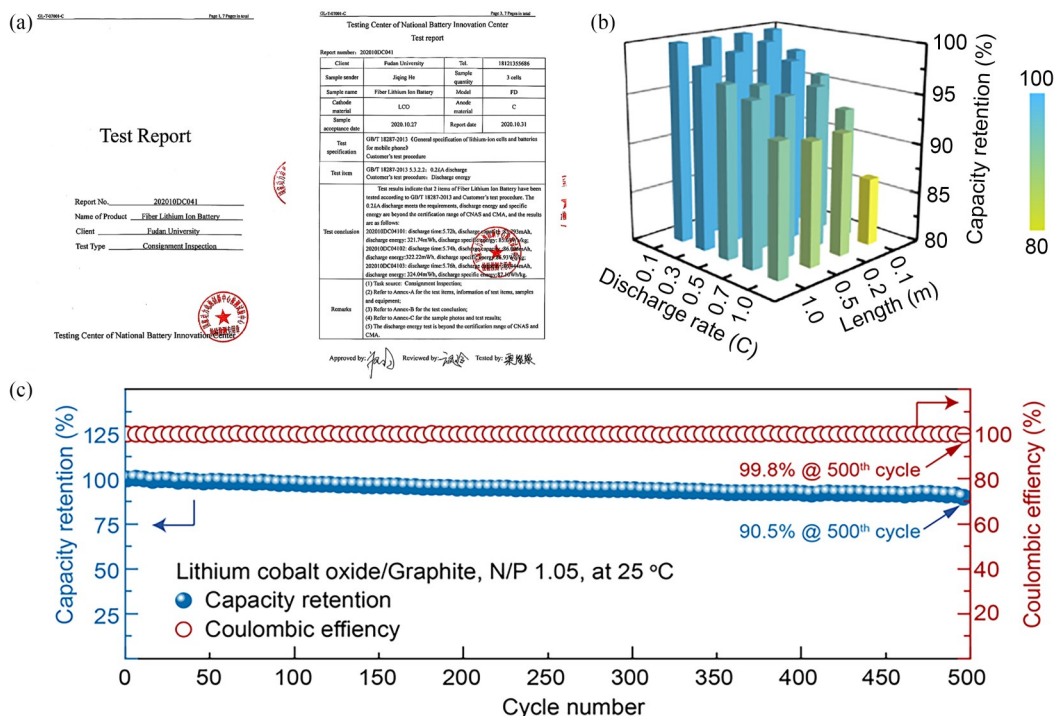


Fig. 4 (a) The certificated report on capacity and energy density of FLIB; (b) Capacity retention of FLIBs ranging from 0.1 m to 1 m long at different applied discharge rates; (c) Cycling performance of FLIB show capacity retention and coulombic efficiency remained high even after 500 cycles (Reproduced with permission from Ref.[57]; Copyright (2021) Springer Nature).

的高分子管材以及高分子管材和耐水涂层的复合等方式, 针对纤维锂离子电池对水分敏感的问题, 成功实现了纤维锂离子电池循环寿命超过500圈容量保持率依然达到90.5% (图4(c)), 满足了商业消费类电池的使用需求, 可满足大多数可穿戴设备的使用场景。

2.2 力学性能

对于可穿戴设备的供能器件, 相比于刚性储能电池, 纤维储能电池需要具备一定的可形变能力、疲劳强度和抗拉强度, 以满足与可穿戴织物等在形变方面的匹配性以及满足日常生活中反复弯曲的动态场景。研究者们利用电子束蒸发将硅纳米颗粒沉积到取向碳纳米管薄膜上, 然后在180 r/min的转速下加捻得到碳纳米管/硅复合纤维负极, 它具有良好的柔性, 能够在连续弯曲100次后保持其原有的电化学性能, 在20次形变后, 依然保持了94%的容量^[33]; 通过以碳纳米管/锰酸锂和碳纳米管/钛酸锂复合纤维分别作为正负电极的纤维锂离子电池使用聚二甲基硅氧烷代替橡胶纤维作为弹性基体, 可以进一步提高纤维电池的拉伸比至600%^[34]; 进一步, 通过选用塑性适中、导电性良好以及具备一定疲劳强度的铝、铜和其与高分子材料复合的纤维材料作为纤

维电池集流体, 一方面保障了其在电化学性能方面的要求, 另一方面满足了纤维电池在柔性方面的使用需求, 结合采用的以高分子为主体的封装管材, 最终将纤维锂离子电池的抗拉强度提升为89 MPa, 断裂伸长率提升至13%, 在弯曲 1×10^5 次后, 电池的容量保持率仍然在80%以上, 同时在动态弯曲条件下, 电池可以连续工作24 h以上, 为其在柔性可穿戴领域的应用提供了充足的条件^[57]。

2.3 耐受性

除了最核心的电学性能和匹配可穿戴场景的力学性能外, 纤维储能电池及其织物在可编织性、机械形变能力和各种安全性测试方面都有一定的要求。研究者在连续化、规模化制备纤维锂离子电池的基础上, 通过对电芯材料和封装工艺的优化, 实现了纤维电池和普通纱线的连续织造, 可根据实际应用场景制作出不同长度和样式的纤维电池织物(图5(a)~5(d)); 在此基础上, 通过对封装管材优化以及对电池封端工艺的改进, 确保了电池在经受不同外界影响下的稳定性。电池织物在经受反复弯折的过程中, 仍然可以稳定对用电器进行能源供给(图5(e)); 电池织物在经受较大外力压迫(如汽车碾压)的条件下, 并没有出

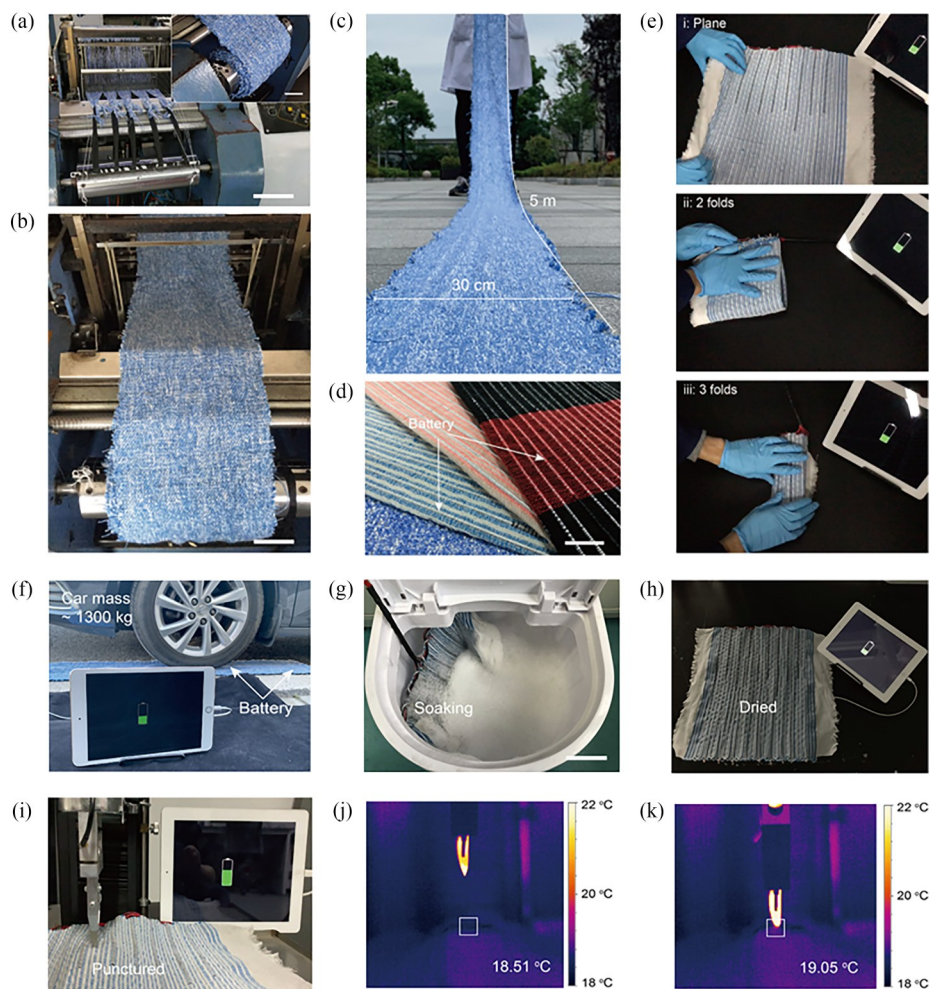


Fig. 5 Fabrication of FLIB textile and FLIB textile charging an iPad under harsh conditions. (a–d) FLIB textile made from FLIBs by a commercial rapier loom: (a, b) fabrication process using a rapier loom (inset, rolling-up of a textile) (scale bar, 10 cm); (c) photograph of a 5-metre-long, 0.3-metre-wide FLIB textile; (d) photograph of FLIB textile with different styles (scale bar, 2 cm). (e) FLIB textile normally charge an iPad under folding: (i) FLIB textile charging iPad; (ii) charging iPad after 2 folds; (iii) charging iPad after 3 folds. The size of the textile was 0.3 m long \times 0.5 m wide. (f) FLIB textile charging iPad under car crushing. The car mass was about 1300 kg; (g) FLIB textile being washed by a washing machine (scale bar, 10 cm). (h) FLIB textile charging an iPad after washed and dried; (i) FLIB textile charging iPad when punctured by a blade. (j, k) The temperature of the zone monitored by the infrared imager remains almost unchanged before (j) and after puncture (k) (Reproduced with permission from Ref.[57]; Copyright (2021) Springer Nature).

现失效的情况(图 5(f)); 同时, 在反复水洗和干燥后, 电池织物仍然可以正常工作(图 5(g)~5(h)), 并没有出现明显的漏液和失效的情况. 在更加极端的安全性方面, 因为纤维电池采用具有一定孔隙率的电极活性材料设计, 可以保持较高的保液系数, 因此在穿刺等不同场景和破坏条件下不会出现大面积的漏液和电池失效情况, 且电池织物在穿刺等破坏实验的断口处也没有出现明显的温度变化, 说明上述破坏并不会造成电池织物的短路, 可以保障电池的持续工作(图 5(i)~5(k)). 纤维储能电池及其织物在上述不同应用场景的性能表

现为纤维储能电池应对不同使用情况下的适应性提供了充足的实验基础^[57].

3 其他纤维储能器件

伴随着纤维储能电池的快速发展, 人们对电池的性能和安全等方面提出了更高的要求, 因此各种新型的纤维电池体系便应运而生, 主要包括纤维金属-空气电池、水系纤维电池、纤维锂硫电池和纤维超级电容器等.

柔性金属-空气电池由于兼具柔性形变和能源存储受到广泛关注, 且能量密度极具竞争力.

然而, 柔性金属空气电池目前仍存在诸多问题, 电池柔性、空气电极催化活性和空气电极柔性都亟待提高, 使用的固态凝胶电解质存在离子电导率不高、力学性能差等问题^[88]. 研究者们通过将金属锂丝、凝胶电解质、缠绕的薄膜空气正极构成纤维锂-空气电池, 原位合成的凝胶电解质有效地阻碍了空气中水和二氧化碳向金属负极的扩散, 有效保护了金属锂不受腐蚀. 因而, 该纤维锂-空气电池具有优异的电化学性能, 可在 500 和 1400 mA/g 的电流密度下, 在空气环境中稳定循环 100 圈^[89]; 进一步, 在纤维镁-空气电池中使用了一种双层凝胶电解质, 防止了镁负极的腐蚀和致密钝化层的产生, 避免了镁负极因副反应而消耗, 提高了镁在放电过程中的利用率, 从而提高了电池的比容量和能量密度. 所得镁空气电池的平均比容量为 2190 mAh/g (基于全部镁负极质量, 镁负极利用率为 99.3%) 和 2282 Wh/kg 的能量密度(基于全部金属负极和空气电极质量)^[90].

具有优异循环稳定性和高能量密度的锂离子电池(LIB)已经占领了商用可充电电池市场. 不幸的是, 有机电解质引起的固有的不安全性严重阻碍了其在可穿戴和便携式电子设备中的应用. 相比之下, 水系锌离子电池(ZIB)因其价格便宜和高安全性而成为理想的候选者^[91]. 除此之外, 其高离子导电性、低成本和无毒性也使其在柔性储能系统中极具潜力^[92]. 但其也存在着一些问题, 以具有代表性的柔性水系锌电池为例, 工作电压低、倍率、循环稳定性较差等问题, 严重制约了其发展和在可穿戴器件领域中的进一步应用^[93]. 研究者们以聚酰亚胺/碳纳米管混合纤维为负极, 锰酸锂/碳纳米管混合纤维为正极, 开发了一种新型纤维状水系锂离子电池. 具有远超传统纤维超级电容器的功率输出率密度(10217.74 W/kg), 和与薄膜锂离子电池相当的能量密度(48.93 Wh/kg)^[94]; 进一步, 研究人员制造了一种高能量密度的水系锌离子纤维电池, 它可以直接从环境的空气中收集能量进行充电, 而无需使用外接电源. 空气再充电能力源于通过简单的溶液氧化还原法合成的三氧化六钒/碳纳米管正极纤维, 在放电状态下, 它可以与环境中的空气发生自发的氧化还原反应以恢复自身容量. 这种空气再充电过程是可逆的, 并且与水系锌离子电池的常规恒电流充放电兼容^[95].

纤维锂离子电池能量密度有限(< 150 mAh/g), 受到基于插层机制的限制, 难以实现高能量密度, 很难满足未来可穿戴设备对能量供给的实际需要, 从而严重阻碍了以小型化为目标的可穿戴设备的发展. 锂硫电池由于其高理论能量密度(2600 Wh/kg)和低成本等优势被认为是最有可能商业化应用的下一代电池之一. 且单质硫具有对环境污染小、在自然界储量大、成本低等优点. 然而, 锂硫电池仍然面临着诸多挑战. 其中, 硫正极的穿梭效应和体积效应严重阻碍了电池的实际应用. 此外, 锂金属负极方面同样面临着严重的安全隐患, 包括不受控制的锂枝晶生长, 锂金属与过量的液态电解液发生持续的副反应, 以及穿梭效应导致 LiPSs 穿过隔膜接触锂金属负极. 这些隐患影响了锂硫电池在可穿戴设备中的进一步应用^[96]. 设计开发同时满足高能量密度、柔性和安全性的锂硫电池仍然是一个挑战. 研究者们开创性地以氧化石墨烯/中孔碳/硫为正极, 与金属锂丝负极搭配制造了纤维锂硫电池, 具有良好的电化学性能, 并具有轻质、柔韧性好、可编织等优势^[97]. 有力填补了国内外此类研究的空白, 对高能量密度柔性储能系统的发展具有一定的启发作用.

超级电容器具有功率密度高(>10 kW/kg)、充放电快和循环寿命长(>1×10⁵ 次充放)等特点. 纤维状超级电容器具有质量轻、高柔性和高能量密度的特点, 并且可用于不同集成系统中, 受到各界的广泛关注, 可穿戴、可弯曲和可拉伸的纤维状超级电容器成为目前研究热点之一^[98]. 相比于纤维锂离子电池, 纤维状超级电容器在功率密度方面显现出独特的优势, 与传统的刚性平面超级电容器不同, 一维纤维型超级电容器可直接作为柔性电源用于可穿戴设备, 因而受到越来越多的关注. 现阶段纤维超电的制备通常有 2 种方式: 一种是利用纺丝技术、加捻技术及炭化工艺获取高比表面积的高性能碳纤维, 利用纤维的高比表面积与电解液形成的双电层存储能量, 得到高比容量的纤维超电; 另一种是以纺织纤维作为基体, 将碳纤维材料、导电高分子材料、无机氧化物等材料负载在纤维表面, 使普通纺织纤维改性为储能纤维. 二者均具有各自的优势与不足, 前者由于活性物质本身就是基体材料, 故能量存储较高, 但纤维的力学性能较差, 难以满足后道纺

织加工对纤维强力的要求,可织性较差,与纺织品融合度差.后者以普通纺织纤维为基体保证了后道加工工艺对纺织材料力学性能的要求,较易加工生产,与纺织品融合度高,整体一致性强,但由于基体材料占据纤维的主体,活性物质含量较低,导致其能量存储相对较低^[99].研究者们开发了一种中空纤维电极包括中空还原氧化石墨烯/导电聚合物复合纤维和中空裸还原氧化石墨烯纤维,具有高柔韧性和导电性,比面电容可达 304.5 mF/cm^2 ,同时其比电容在弯曲500次后基本保持不变,在10000次循环后仍可保持96%^[100];进一步,通过设计分层导电结构,创造了具有高能量存储性能的 100 cm^2 的大面积超级电容器纺织品,并保持了 69.3 F 的高电容^[101].

4 纤维储能电池的应用

由于纤维储能电池在保有储能功能的同时,还兼具独有的柔性和可编织特性,可以很自然地构建成储能织物,赋予普通织物新的功能性;与此同时,纤维储能电池凭借其独特的一维结构,可以较容易地与可穿戴设备或其他纤维电子器件集成,形成具有丰富功能的可穿戴闭环系统,满足不同应用场景的需求.

4.1 储能织物的规模化制备

在纤维储能电池满足连续化规模化制备的基础上,可穿戴设备特有的柔性等方面的要求促使其功能系统同样朝着具备良好柔性的方向发展,而将纤维储能电池规模化的制备成纤维储能织物是目前较为有效的解决途径.纤维电池的一维特性以及足够的柔性,使其可以与我们日常生活中的织物纤维一起编织加工,获得的储能织物相较于二维柔性电池在实际使用中更具优势,储能织物具有常规织物同样的柔韧性,在较小的外力或自身重量下变形,在磨损和洗涤过程中保持结构完整性的能力非常突出,它们可以被拉伸、扭曲、弯曲或剪切,储能织物的高孔隙率和大的表面积使得热空气和水蒸气在炎热气候中从人体上扩散出去,储能织物可以长期舒适地覆盖具有数百万个毛孔的人体皮肤上,并且对外界机械损伤的容忍度更高.将纤维电池编织进常规织物的主要难点是电池和常规织物纤维柔性的匹配以及电池连接方式的,面向实际应用场景时需要做更多的优化.研究人员通过溶液挤出法大规模连续化

地制备出可水洗的纤维锂离子电池,同时利用商业编织手段,实现了大规模储能织物的制作(图6(a))^[87];进一步,通过一步挤出法制备出优良性能的纤维锂离子电池,并制作出 $135\text{ cm}\times 120\text{ cm}$ 的大面积储能织物(图6(b))^[102],为后期纤维储能电池在可穿戴领域的大规模应用提供了可能.

4.2 纤维储能电池与可穿戴设备的集成应用

由于现代各种电子设备都朝着微型化和高度集成化的方向发展,这对于新型可穿戴设备而言既是机遇又是挑战,一方面微型化的电子设备可以进一步丰富可穿戴设备的功能;另一方面,对于可穿戴设备的供能系统提出了更高的要求.传统的三维甚至二维储能电池已经难以满足一位可穿戴电子器件如能量收集器件、发光器件和传感器件在使用场景下对于能源的需求^[103-105].研究者们进行了大量纤维储能电池与可穿戴电子设备集成的尝试^[87,95,102,105-110],通过将不同体系和结构的纤维储能电池与身体区域网络(图6(c))^[108]、柔性指尖传感器(图6(d))^[95]、用于检测汗液中离子的纤维传感器和用于显示数据的电致发光纤维显示器(图6(e))以及实现检测^[57]、传感和手机数据传输网络(图6(f))^[57]集成,充分实现了储能纤维电池和可穿戴电子设备的集成,为可穿戴设备领域的蓬勃发展提供了强劲动力.

5 总结与展望

本文以本课题组的工作为主,综述了柔性纤维储能电池方面的研究进展.具体而言,实现了具有良好电学、力学和其他性能的纤维锂离子电池的连续化、大规模和稳定化制备,为发展纤维储能电池的发展奠定了工业化生产的方法学基础.进一步,基于纤维储能电池的成功连续化制备,发展了纤维储能织物的规模化制备和纤维储能电池与可穿戴设备以及其他纤维状电子器件的集成,为纤维储能电池的实际大规模应用提供积极的可能性.

然而,纤维储能电池的发展仍然处于起步阶段,各方面性能距离商业平面储能电池仍有一定差距,为进一步提升性能、拓展功能,走向实用化,需要研究人员在多个方面进行深入探索.第一,在纤维储能电池的各方面性能减小与平面储能电池的差距,具体来说可以尝试从正负极结构设计、体系创新和材料等方面入手,减小电池内

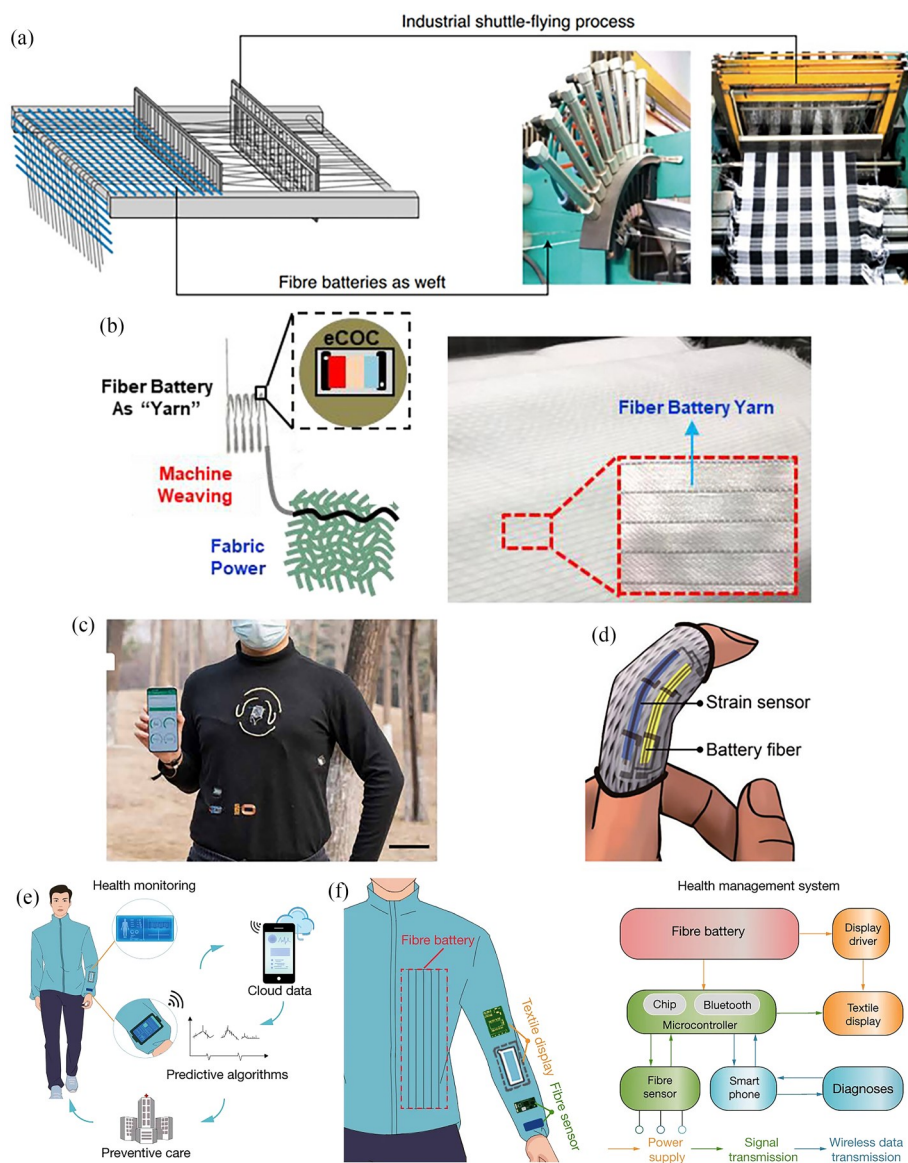


Fig. 6 (a) Schematic (left) and photographs (right) of a commercial braiding machine used to weave textile battery from aqueous FLIBs (Reproduced with permission from Ref.[87]; Copyright (2022) Springer Nature); (b) A battery fiber embedded within 135 cm × 120 cm textile (Reproduced with permission from Ref.[102]; Copyright (2021) Elsevier); (c) Photograph of the application of bodystate monitoring, with a coauthor wearing the TBAN in the outdoor environment. Scale bar, 10 cm (Reproduced with permission from Ref.[108]; Copyright (2022) The Authors); (d) A strain sensor fiber was powered by VCF/Zn battery fibers integrated in a flexible fingertip (Reproduced with permission from Ref.[95]; Copyright (2021) The Royal Society of Chemistry); (e) Schematic illustrating an outdoor trial of a health management jacket integrated with fibre sensors for detecting ions in sweat and an electroluminescent textile display for displaying the data. Data collected by the fibre sensors are transmitted to mobile phones for real-time monitoring and diagnosis. Predictive algorithms offer preventive care to the user; (f) Block diagram shows how the FLIB powers the microcontroller and display driver. Data and feedback (two-way arrows) are fed between the fibre sensors, microcontroller and smart phone. Data and diagnoses are eventually displayed on the textile display. Orange, green and blue arrows represent power supply, signal transmission and wireless data transmission, respectively (Reproduced with permission from Ref.[57]; Copyright (2021) Springer Nature).

阻, 改善封装可靠性等, 使纤维储能电池的能量密度、倍率性能和循环寿命等主要性能可以达到大规模应用的水平; 第二, 单一的纤维储能电池无法满足所有的应用场景, 需要通过对纤维电池

组技术进行探索和优化, 探寻其中的科学问题, 寻求一套适合纤维储能电池独特结构的规律性理论, 为后期纤维储能电池的大规模联用提供技术积累; 第三, 纤维储能电池的应用场景需要进一

步拓宽，不仅仅局限在可穿戴领域，在动力电池领域也需要进行积极探索，尽可能拓展纤维储能电池在大功率设备供电方面的可能性。最后，我们期望形成适合纤维储能电池独特结构甚至原理

的实际应用理论，促进高分子、电子和通讯等多领域的融合和发展，共同推进包括但不限于能源、信息和智能化的理论创新和技术革命。



作者简介：王兵杰，男，1986年生。复旦大学先进材料实验室副研究员，博士生导师。2009年本科毕业于四川大学高分子材料与工程专业，2014年获得中国科学院宁波材料技术与工程研究所高分子化学与物理专业理学博士学位，随后进入复旦大学先进材料实验室工作至今。2022年获得国家自然科学基金优秀青年基金资助。研究方向：柔性储能材料与器件，重点在高性能纤维储能器件的基础研究与产业化应用方面开展了系统研究。

REFERENCES

- 1 Stoppa, M.; Chiolerio, A. Wearable electronics and smart textiles: a critical review. *Sensors (Basel)*, **2014**, 14(7), 11957–11992.
- 2 Wang, X. F.; Lu, X. H.; Liu, B.; Chen, D.; Tong, Y. X.; Shen, G. Z. Flexible energy-storage devices: design consideration and recent progress. *Adv. Mater.*, **2014**, 26(28), 4763–4782.
- 3 Zeng, W.; Shu, L.; Li, Q.; Chen, S.; Wang, F.; Tao, X. M. Fiber-based wearable electronics: a review of materials, fabrication, devices, and applications. *Adv. Mater.*, **2014**, 26(31), 5310–5336.
- 4 Shi, Q. F.; Dong, B. W.; He, T.; Sun, Z. D.; Zhu, J. X.; Zhang, Z. X.; Lee, C. K. Progress in wearable electronics/ photonics—moving toward the era of artificial intelligence and internet of things. *InfoMat*, **2020**, 2(6), 1131–1162.
- 5 Chen, M. X.; Wang, Z.; Li, K. W.; Wang, X. D.; Wei, L. Elastic and stretchable functional fibers: a review of materials, fabrication methods, and applications. *Adv. Fiber Mater.*, **2021**, 3(1), 1–13.
- 6 Liu, W.; Song, M. S.; Kong, B.; Cui, Y. Flexible and stretchable energy storage: recent advances and future perspectives. *Adv. Mater.*, **2017**, 29(1), 1603436.
- 7 Ma, W. J.; Zhang, Y.; Pan, S. W.; Cheng, Y. H.; Shao, Z. Y.; Xiang, H. X.; Chen, G. Y.; Zhu, L. P.; Weng, W.; Bai, H.; Zhu, M. F. Smart fibers for energy conversion and storage. *Chem. Soc. Rev.*, **2021**, 50(12), 7009–7061.
- 8 Wang, L.; Fu, X. M.; He, J. Q.; Shi, X.; Chen, T. Q.; Chen, P. N.; Wang, B. J.; Peng, H. S. Application challenges in fiber and textile electronics. *Adv. Mater.*, **2020**, 32(5), e1901971.
- 9 Chen, M. Z.; Zhang, Y. Y.; Xing, G. C.; Chou, S. L.; Tang, Y. X. Electrochemical energy storage devices working in extreme conditions. *Energy Environ. Sci.*, **2021**, 14(6), 3323–3351.
- 10 Li, H.; Wang, H. B.; Xu, Z.; Wang, K. X.; Ge, M. Z.; Gan, L.; Zhang, Y. Y.; Tang, Y. X.; Chen, S. Thermal-responsive and fire-resistant materials for high-safety lithium-ion batteries. *Small*, **2021**, 17(43), e2103679.
- 11 Lee, S. Y.; Choi, K. H.; Choi, W. S.; Kwon, Y. H.; Jung, H. R.; Shin, H. C.; Kim, J. Y. Progress in flexible energy storage and conversion systems, with a focus on cable-type lithium-ion batteries. *Energy Environ. Sci.*, **2013**, 6(8), 2414–2423.
- 12 Li, L.; Wu, Z.; Yuan, S.; Zhang, X. B. Advances and challenges for flexible energy storage and conversion devices and systems. *Energy Environ. Sci.*, **2014**, 7(7), 2101–2122.
- 13 Zhou, G. M.; Li, F.; Cheng, H. M. Progress in flexible lithium batteries and future prospects. *Energy Environ. Sci.*, **2014**, 7(4), 1307–1338.
- 14 Sumboja, A.; Liu, J. W.; Zheng, W. G.; Zong, Y.; Zhang, H.; Liu, Z. L. Electrochemical energy storage devices for wearable technology: A rationale for materials selection and cell design. *Chem. Soc. Rev.*, **2018**, 47(15), 5919–5945.
- 15 Chang, J.; Huang, Q. Y.; Gao, Y.; Zheng, Z. J. Pathways of developing high-energy-density flexible lithium batteries. *Adv. Mater.*, **2021**, 33(46), e2004419.
- 16 Koo, M.; Park, K. I.; Lee, S. H.; Suh, M.; Jeon, D. Y.; Choi, J. W.; Kang, K.; Lee, K. J. Bendable inorganic thin-film battery for fully flexible electronic systems. *Nano Lett.*, **2012**, 12(9), 4810–4816.
- 17 Wang, K.; Luo, S.; Wu, Y.; He, X. F.; Zhao, F.; Wang, J. P.; Jiang, K. L.; Fan, S. S. Super-aligned carbon nanotube films as current collectors for lightweight and flexible lithium ion batteries. *Adv. Funct. Mater.*, **2013**, 23(7), 846–853.

- 18 Liu, W.; Chen, Z.; Zhou, G. M.; Sun, Y. M.; Lee, H. R.; Liu, C.; Yao, H. B.; Bao, Z. N.; Cui, Y. 3D porous sponge-inspired electrode for stretchable lithium-ion batteries. *Adv. Mater.*, **2016**, 28(18), 3578–3583.
- 19 Zheng, S.; Wu, Z. S.; Zhou, F.; Wang, X.; Ma, J.; Liu, C.; He, Y. B.; Bao, X. All-solid-state planar integrated lithium ion micro-batteries with extraordinary flexibility and high-temperature performance. *Nano Energy*, **2018**, 51, 613–620.
- 20 Liao, X. B.; Shi, C. M.; Wang, T. Y.; Qie, B. Y.; Chen, Y. L.; Yang, P. F.; Cheng, Q.; Zhai, H. W.; Chen, M. J.; Wang, X.; Chen, X.; Yang, Y. High-energy-density foldable battery enabled by zigzag-like design. *Adv. Energy Mater.*, **2019**, 9(4), 1802998.
- 21 Song, Z. M.; Ma, T.; Tang, R.; Cheng, Q.; Wang, X.; Krishnaraju, D.; Panat, R.; Chan, C. K.; Yu, H. Y.; Jiang, H. Q. Origami lithium-ion batteries. *Nat. Commun.*, **2014**, 5, 3140.
- 22 Mackanic, D. G.; Kao, M.; Bao, Z. N. Enabling deformable and stretchable batteries. *Adv. Energy Mater.*, **2020**, 10(29), 2001424.
- 23 Mo, F. N.; Liang, G. J.; Huang, Z. D.; Li, H. F.; Wang, D. H.; Zhi, C. Y. An overview of fiber-shaped batteries with a focus on multifunctionality, scalability, and technical difficulties. *Adv. Mater.*, **2020**, 32(5), e1902151.
- 24 Wang, Z.; Chen, M. X.; Zheng, Y.; Zhang, J.; Wang, Z. X.; Yang, J.; Zhang, Q. C.; He, B.; Qi, M.; Zhang, H. Z.; Li, K. W.; Wei, L. Advanced thermally drawn multimaterial fibers: structure-enabled functionalities. *Adv. Devices Instrum.*, **2021**, 2021, 1–15.
- 25 Shen, Y. N.; Wang, Z.; Wang, Z. X.; Wang, J. J.; Yang, X.; Zheng, X. H.; Chen, H. S.; Li, K. W.; Wei, L.; Zhang, T. Thermally drawn multifunctional fibers: toward the next generation of information technology. *InfoMat*, **2022**, 4(7), 98–119.
- 26 Liu, L. B.; Yu, Y.; Yan, C.; Li, K.; Zheng, Z. J. Wearable energy-dense and power-dense supercapacitor yarns enabled by scalable graphene-metallic textile composite electrodes. *Nat. Commun.*, **2015**, 6, 7260.
- 27 Zhao, Y. M.; Dong, D. S.; Wang, Y.; Gong, S.; An, T. C.; Yap, L. W.; Cheng, W. L. Highly stretchable fiber-shaped supercapacitors based on ultrathin gold nanowires with double-helix winding design. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2018**, 10(49), 42612–42620.
- 28 Du, X.; Zhang, K. Recent progress in fibrous high-entropy energy harvesting devices for wearable applications. *Nano Energy*, **2022**, 101, 107600.
- 29 Jung, Y.; Jeong, Y. C.; Kim, J. H.; Kim, Y. S.; Kim, T.; Cho, Y. S.; Yang, S. J.; Park, C. R. One step preparation and excellent performance of CNT yarn based flexible micro lithium ion batteries. *Energy Storage Mater.*, **2016**, 5, 1–7.
- 30 Wang, Y. B.; Chen, C. J.; Xie, H.; Gao, T. T.; Yao, Y. G.; Pastel, G.; Han, X. G.; Li, Y. J.; Zhao, J. P.; Fu, K. K.; Hu, L. B. 3D-printed all-fiber Li-ion battery toward wearable energy storage. *Adv. Funct. Mater.*, **2017**, 27(43), 1703140.
- 31 Kwon, Y. H.; Woo, S. W.; Jung, H. R.; Yu, H. K.; Kim, K.; Oh, B. H.; Ahn, S.; Lee, S. Y.; Song, S. W.; Cho, J.; Shin, H. C.; Kim, J. Y. Cable-type flexible lithium ion battery based on hollow multi-helix electrodes. *Adv. Mater.*, **2012**, 24(38), 5192–5197.
- 32 Ren, J.; Li, L.; Chen, C.; Chen, X. L.; Cai, Z. B.; Qiu, L. B.; Wang, Y. G.; Zhu, X. R.; Peng, H. S. Twisting carbon nanotube fibers for both wire-shaped micro-supercapacitor and micro-battery. *Adv. Mater.*, **2013**, 25(8), 1155–1159.
- 33 Lin, H. J.; Weng, W.; Ren, J.; Qiu, L. B.; Zhang, Z. T.; Chen, P. N.; Chen, X. L.; Deng, J.; Wang, Y. G.; Peng, H. S. Twisted aligned carbon nanotube/silicon composite fiber anode for flexible wire-shaped lithium-ion battery. *Adv. Mater.*, **2014**, 26(8), 1217–1222.
- 34 Ren, J.; Zhang, Y.; Bai, W. Y.; Chen, X. L.; Zhang, Z. T.; Fang, X.; Weng, W.; Wang, Y. G.; Peng, H. S. Elastic and wearable wire-shaped lithium-ion battery with high electrochemical performance. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2014**, 53(30), 7864–7869.
- 35 Weng, W.; Sun, Q.; Zhang, Y.; Lin, H. J.; Ren, J.; Lu, X.; Wang, M.; Peng, H. S. Winding aligned carbon nanotube composite yarns into coaxial fiber full batteries with high performances. *Nano Lett.*, **2014**, 14(6), 3432–3438.
- 36 Zhang, Y.; Bai, W. Y.; Ren, J.; Weng, W.; Lin, H. J.; Zhang, Z. T.; Peng, H. S. Super-stretchy lithium-ion battery based on carbon nanotube fiber. *J. Mater. Chem. A*, **2014**, 2(29), 11054–11059.
- 37 Luo, Y. F.; Zhang, Y.; Zhao, Y.; Fang, X.; Ren, J.; Weng, W.; Jiang, Y. S.; Sun, H.; Wang, B. J.; Cheng, X. L.; Peng, H. S. Aligned carbon nanotube/molybdenum disulfide hybrids for effective fibrous supercapacitors and lithium ion batteries. *J. Mater. Chem. A*, **2015**, 3(34), 17553–17557.
- 38 Rao, J. Y.; Liu, N. S.; Li, L. Y.; Su, J.; Long, F.; Zou, Z. G.; Gao, Y. H. A high performance wire-shaped flexible lithium-ion battery based on silicon nanoparticles within polypyrrole/twisted carbon fibers. *RSC Adv.*, **2017**, 7(43), 26601–26607.

- 39 Zhang, Y.; Bai, W. Y.; Cheng, X. L.; Ren, J.; Weng, W.; Chen, P. N.; Fang, X.; Zhang, Z. T.; Peng, H. S. Flexible and stretchable lithium-ion batteries and supercapacitors based on electrically conducting carbon nanotube fiber springs. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2014**, 53(52), 14564–14568.
- 40 Wang, X. S.; Pan, Z. H.; Yang, J.; Lyu, Z. Y.; Zhong, Y. T.; Zhou, G. M.; Qiu, Y. C.; Zhang, Y. G.; Wang, J.; Li, W. S. Stretchable fiber-shaped lithium metal anode. *Energy Storage Mater.*, **2019**, 22, 179–184.
- 41 Xu, X. J.; Xie, S. L.; Zhang, Y.; Peng, H. S. The rise of fiber electronics. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2019**, 58(39), 13643–13653.
- 42 Chen, C.; Feng, J.; Li, J.; Guo, Y.; Shi, X.; Peng, H. Functional fiber materials to smart fiber devices. *Chem. Rev.*, **2023**, 123(2), 613–662.
- 43 Harrison, D.; Qiu, F. L.; Fyson, J.; Xu, Y. M.; Evans, P.; Southee, D. A coaxial single fibre supercapacitor for energy storage. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **2013**, 15(29), 12215–12219.
- 44 Tang, Z. H.; Jia, S. H.; Wang, F.; Bian, C. S.; Chen, Y. Y.; Wang, Y. L.; Li, B. Highly stretchable core-sheath fibers via wet-spinning for wearable strain sensors. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2018**, 10(7), 6624–6635.
- 45 Gao, Y.; Yu, G. H.; Shu, T.; Chen, Y. Q.; Yang, W. Z.; Liu, Y.; Long, J.; Xiong, W.; Xuan, F. Z. 3D-printed coaxial fibers for integrated wearable sensor skin. *Adv. Mater. Technol.*, 2019, 4(10), 1900504.
- 46 Seyedin, S.; Uzun, S.; Levitt, A.; Anasori, B.; Dion, G.; Gogotsi, Y.; Razal, J. M. MXene composite and coaxial fibers with high stretchability and conductivity for wearable strain sensing textiles. *Adv. Funct. Mater.*, **2020**, 30(12), 1910504.
- 47 Chen, D.; Jiang, K.; Huang, T. T.; Shen, G. Z. Recent advances in fiber supercapacitors: materials, device configurations, and applications. *Adv. Mater.*, **2020**, 32(5), e1901806.
- 48 Zhou, X.; Fang, S. L.; Leng, X. Q.; Liu, Z. F.; Baughman, R. H. The power of fiber twist. *Acc. Chem. Res.*, **2021**, 54(11), 2624–2636.
- 49 Hatzell, K. B.; Boota, M.; Gogotsi, Y. Materials for suspension (semi-solid) electrodes for energy and water technologies. *Chem. Soc. Rev.*, **2015**, 44(23), 8664–8687.
- 50 Hu, M. M.; Li, Z. J.; Li, G. X.; Hu, T.; Zhang, C.; Wang, X. H. All-solid-state flexible fiber-based MXene supercapacitors. *Adv. Mater. Technol.*, **2017**, 2(10), 1700143.
- 51 张智涛, 张晔, 李一明, 彭慧胜. 新型纤维状能源器件的发展和思考. *高分子学报*, **2016**, (10), 1284–1299.
- 52 Yu, Z. N.; Thomas, J. Energy storing electrical cables: integrating energy storage and electrical conduction. *Adv. Mater.*, **2014**, 26(25), 4279–4285.
- 53 Yu, D. S.; Qian, Q. H.; Wei, L.; Jiang, W. C.; Goh, K.; Wei, J.; Zhang, J.; Chen, Y. Emergence of fiber supercapacitors. *Chem. Soc. Rev.*, **2015**, 44(3), 647–662.
- 54 Kishore, R. Electrical conductivity of metals. *Phys. Status Solidi B*, **1968**, 26(1), 133–138.
- 55 Dong, X. L.; Guo, Z. Y.; Song, Y. F.; Hou, M. Y.; Wang, J. Q.; Wang, Y. G.; Xia, Y. Y. Flexible and wire-shaped micro-supercapacitor based on Ni(OH)₂-nanowire and ordered mesoporous carbon electrodes. *Adv. Funct. Mater.*, **2014**, 24(22), 3405–3412.
- 56 Zhang, L. H.; Qin, X. Y.; Zhao, S. Q.; Wang, A.; Luo, J.; Wang, Z. L.; Kang, F. Y.; Lin, Z. Q.; Li, B. H. Advanced matrixes for binder-free nanostructured electrodes in lithium-ion batteries. *Adv. Mater.*, **2020**, 32(24), e1908445.
- 57 He, J. Q.; Lu, C. H.; Jiang, H. B.; Han, F.; Shi, X.; Wu, J. X.; Wang, L. Y.; Chen, T. Q.; Wang, J. J.; Zhang, Y.; Yang, H.; Zhang, G. Q.; Sun, X. M.; Wang, B. J.; Chen, P. N.; Wang, Y. G.; Xia, Y. Y.; Peng, H. S. Scalable production of high-performing woven lithium-ion fibre batteries. *Nature*, **2021**, 597(7874), 57–63.
- 58 Sun, H. T.; Zhu, J.; Baumann, D.; Peng, L. L.; Xu, Y. X.; Shakir, I.; Huang, Y.; Duan, X. F. Hierarchical 3D electrodes for electrochemical energy storage. *Nat. Rev. Mater.*, **2019**, 4(1), 45–60.
- 59 Zhang, X. H.; Lu, W. B.; Zhou, G. H.; Li, Q. W. Understanding the mechanical and conductive properties of carbon nanotube fibers for smart electronics. *Adv. Mater.*, **2020**, 32(5), e1902028.
- 60 Li, S.; Zhang, X. H.; Zhao, J. N.; Meng, F. C.; Xu, G.; Yong, Z. Z.; Jia, J. J.; Zhang, Z. G.; Li, Q. W. Enhancement of carbon nanotube fibres using different solvents and polymers. *Compos. Sci. Technol.*, **2012**, 72(12), 1402–1407.
- 61 Bai, Y. X.; Zhang, R. F.; Ye, X.; Zhu, Z. X.; Xie, H. H.; Shen, B. Y.; Cai, D. L.; Liu, B. F.; Zhang, C. X.; Jia, Z.; Zhang, S. L.; Li, X. D.; Wei, F. Carbon nanotube bundles with tensile strength over 80 GPa. *Nat. Nanotechnol.*, **2018**, 13(7), 589–595.
- 62 Li, Q. W.; Li, Y.; Zhang, X. F.; Chikkannanavar, S. B.; Zhao, Y. H.; Dangelewicz, A. M.; Zheng, L. X.; Doorn, S. K.; Jia, Q. X.; Peterson, D. E.; Arendt, P. N.; Zhu, Y. T. Structure-dependent electrical properties of carbon nanotube fibers. *Adv. Mater.*, **2007**, 19(20), 3358–3363.

- 63 Pan, Z. Y.; Sun, H.; Pan, J.; Zhang, J.; Wang, B. J.; Peng, H. S. The creation of hollow walls in carbon nanotubes for high-performance lithium ion batteries. *Carbon*, **2018**, 133, 384–389.
- 64 Sun, X. M.; Sun, H.; Li, H. P.; Peng, H. S. Developing polymer composite materials: carbon nanotubes or graphene? *Adv. Mater.*, **2013**, 25(37), 5153–5176.
- 65 Zhu, Y. W.; Murali, S.; Cai, W. W.; Li, X. S.; Suk, J. W.; Potts, J. R.; Ruoff, R. S. Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. *Adv. Mater.*, **2010**, 22(35), 3906–3924.
- 66 Cheng, H. H.; Hu, C. G.; Zhao, Y.; Qu, L. T. Graphene fiber: a new material platform for unique applications. *NPG Asia Mater.*, **2014**, 6(7), e113.
- 67 Fang, B.; Chang, D.; Xu, Z.; Gao, C. A review on graphene fibers: expectations, advances, and prospects. *Adv. Mater.*, **2020**, 32(5), e1902664.
- 68 Tian, Q. S.; Xu, Z.; Liu, Y. J.; Fang, B.; Peng, L.; Xi, J. B.; Li, Z.; Gao, C. Dry spinning approach to continuous graphene fibers with high toughness. *Nanoscale*, **2017**, 9(34), 12335–12342.
- 69 Frank, E.; Steudle, L. M.; Ingildeev, D.; Spörl, J. M.; Buchmeiser, M. R. Carbon fibers: Precursor systems, processing, structure, and properties. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2014**, 53(21), 5262–5298.
- 70 Chen, S. H.; Qiu, L.; Cheng, H. M. Carbon-based fibers for advanced electrochemical energy storage devices. *Chem. Rev.*, **2020**, 120(5), 2811–2878.
- 71 Nishide, H.; Oyaizu, K. Toward flexible batteries. *Science*, **2008**, 319(5864), 737–738.
- 72 Muench, S.; Wild, A.; Friebe, C.; Häupler, B.; Janoschka, T.; Schubert, U. S. Polymer-based organic batteries. *Chem. Rev.*, **2016**, 116(16), 9438–9484.
- 73 Sun, G. Z.; Zheng, L. X.; An, J.; Pan, Y. Z.; Zhou, J. Y.; Zhan, Z. Y.; Pang, J. H. L.; Chua, C. K.; Leong, K. F.; Li, L. Clothing polymer fibers with well-aligned and high-aspect ratio carbon nanotubes. *Nanoscale*, **2013**, 5(7), 2870–2874.
- 74 Yang, Z. B.; Deng, J.; Chen, X. L.; Ren, J.; Peng, H. S. A highly stretchable, fiber-shaped supercapacitor. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2013**, 52(50), 13453–13457.
- 75 Kang, T. J.; Choi, A.; Kim, D. H.; Jin, K.; Seo, D. K.; Jeong, D. H.; Hong, S. H.; Park, Y. W.; Kim, Y. H. Electromechanical properties of CNT-coated cotton yarn for electronic textile applications. *Smart Mater. Struct.*, **2011**, 20(1), 015004.
- 76 Ma, R. J.; Lee, J. Y.; Choi, D.; Moon, H.; Baik, S. Knitted fabrics made from highly conductive stretchable fibers. *Nano Lett.*, **2014**, 14(4), 1944–1951.
- 77 Zhang, Y.; Jiao, Y. D.; Lu, L. J.; Wang, L.; Chen, T. Q.; Peng, H. S. An ultraflexible silicon-oxygen battery fiber with high energy density. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2017**, 56(44), 13741–13746.
- 78 Cheng, X. L.; Fang, X.; Chen, P. N.; Doo, S. G.; Son, I. H.; Huang, X. L.; Zhang, Y.; Weng, W.; Zhang, Z. T.; Deng, J.; Sun, X. M.; Peng, H. S. Designing one-dimensional supercapacitors in a strip shape for high performance energy storage fabrics. *J. Mater. Chem. A*, **2015**, 3(38), 19304–19309.
- 79 Li, G. X.; Liu, Z.; Huang, Q. Q.; Gao, Y.; Regula, M.; Wang, D. W.; Chen, L. Q.; Wang, D. H. Stable metal battery anodes enabled by polyethylenimine sponge hosts by way of electrokinetic effects. *Nat. Energy*, **2018**, 3(12), 1076–1083.
- 80 Randau, S.; Weber, D. A.; Kötz, O.; Koerver, R.; Braun, P.; Weber, A.; Ivers-Tiffée, E.; Adermann, T.; Kulisch, J.; Zeier, W. G.; Richter, F. H.; Janek, J. Benchmarking the performance of all-solid-state lithium batteries. *Nat. Energy*, **2020**, 5(3), 259–270.
- 81 Li, M.; Gao, D. Y.; Li, S.; Zhou, Z. W.; Zou, J. H.; Tao, H.; Wang, L.; Xu, M.; Peng, J. B. Realization of highly-dense Al₂O₃ gas barrier for top-emitting organic light-emitting diodes by atomic layer deposition. *RSC Adv.*, **2015**, 5(127), 104613–104620.
- 82 Nehm, F.; Klumbies, H.; Richter, C.; Singh, A.; Schroeder, U.; Mikolajick, T.; Mönch, T.; Hoßbach, C.; Albert, M.; Bartha, J. W.; Leo, K.; Müller-Meskamp, L. Breakdown and protection of ALD moisture barrier thin films. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2015**, 7(40), 22121–22127.
- 83 Guo, H. C.; Ye, E. Y.; Li, Z. B.; Han, M. Y.; Loh, X. J. Recent progress of atomic layer deposition on polymeric materials. *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.*, **2017**, 70, 1182–1191.
- 84 Jarvis, K. L.; Evans, P. J. Growth of thin barrier films on flexible polymer substrates by atomic layer deposition. *Thin Solid Films*, **2017**, 624, 111–135.
- 85 Le Floch, P.; Meixuanzi, S.; Tang, J. D.; Liu, J. J.; Suo, Z. G. Stretchable seal. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2018**, 10(32), 27333–27343.

- 86 Tanskanen, A.; Karppinen, M. Iron-terephthalate coordination network thin films through *in-situ* atomic/molecular layer deposition. *Sci. Rep.*, **2018**, 8(1), 8976.
- 87 Liao, M.; Wang, C.; Hong, Y.; Zhang, Y. F.; Cheng, X. L.; Sun, H.; Huang, X. L.; Ye, L.; Wu, J. X.; Shi, X.; Kang, X. Y.; Zhou, X. F.; Wang, J. W.; Li, P. Z.; Sun, X. M.; Chen, P. N.; Wang, B. J.; Wang, Y. G.; Xia, Y. Y.; Cheng, Y. H.; Peng, H. S. Industrial scale production of fibre batteries by a solution-extrusion method. *Nat. Nanotechnol.*, **2022**, 17(4), 372–377.
- 88 Ye, L.; Hong, Y.; Liao, M.; Wang, B. J.; Wei, D. C.; Peng, H. S.; Ye, L.; Hong, Y.; Liao, M.; Wang, B.; Wei, D.; Peng, H. Recent advances in flexible fiber-shaped metal-air batteries. *Energy Storage Mater.*, **2020**, 28, 364–374.
- 89 Zhang, Y.; Wang, L.; Guo, Z. Y.; Xu, Y. F.; Wang, Y. G.; Peng, H. S. High-performance lithium-air battery with a coaxial-fiber architecture. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2016**, 55(14), 4487–4491.
- 90 Li, L. H.; Chen, H.; He, E.; Wang, L.; Ye, T. T.; Lu, J.; Jiao, Y. D.; Wang, J. C.; Gao, R.; Peng, H. S.; Zhang, Y. High-energy-density magnesium-air battery based on dual-layer gel electrolyte. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2021**, 60(28), 15317–15322.
- 91 Zhao, Y. L.; Zhu, Y. H.; Zhang, X. B. Challenges and perspectives for manganese-based oxides for advanced aqueous zinc-ion batteries. *InfoMat*, **2020**, 2(2), 237–260.
- 92 Dubal, D. P.; Chodankar, N. R.; Kim, D. H.; Gomez-Romero, P. Towards flexible solid-state supercapacitors for smart and wearable electronics. *Chem. Soc. Rev.*, **2018**, 47(6), 2065–2129.
- 93 Wang, H.; Lu, Y. F.; Nie, Z. T.; Liu, H. D.; Dai, B. F.; Shi, X. F.; Yan, B.; Zhao, T. C.; Zhang, Z. T.; Zhu, J. X.; Zhao, Y. Constructing carbon nanotube hybrid fiber electrodes with unique hierarchical microcrack structure for high-voltage, ultrahigh-rate, and ultralong-life flexible aqueous zinc batteries. *Small*, **2022**, 2206338.
- 94 Zhang, Y.; Wang, Y. H.; Wang, L.; Lo, C. M.; Zhao, Y.; Jiao, Y. D.; Zheng, G. F.; Peng, H. S. A fiber-shaped aqueous lithium ion battery with high power density. *J. Mater. Chem. A*, **2016**, 4(23), 9002–9008.
- 95 Liao, M.; Wang, J. W.; Ye, L.; Sun, H.; Li, P. Z.; Wang, C.; Tang, C. Q.; Cheng, X. R.; Wang, B. J.; Peng, H. S. A high-capacity aqueous zinc-ion battery fiber with air-recharging capability. *J. Mater. Chem. A*, **2021**, 9(11), 6811–6818.
- 96 Xia, J.; Gao, R. H.; Yang, Y.; Tao, Z.; Han, Z. Y.; Zhang, S. C.; Xing, Y. L.; Yang, P. H.; Lu, X.; Zhou, G. M. $\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$ /MXene hierarchical bifunctional catalyst anchored on graphene aerogel toward flexible and high-energy Li-S batteries. *ACS Nano*, **2022**, 16(11), 19133–19144.
- 97 Fang, X.; Weng, W.; Ren, J.; Peng, H. S. A cable-shaped lithium sulfur battery. *Adv. Mater.*, **2016**, 28(3), 491–496.
- 98 Lu, Y. J.; Tian, M. W.; Sun, X. T.; Pan, N.; Chen, F. X.; Zhu, S. F.; Zhang, X. S.; Chen, S. J. Highly sensitive wearable 3D piezoresistive pressure sensors based on graphene coated isotropic non-woven substrate. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, **2019**, 117, 202–210.
- 99 Shirshova, N.; Qian, H.; Shaffer, M. S. P.; Steinke, J. H. G.; Greenhalgh, E. S.; Curtis, P. T.; Kucernak, A.; Bismarck, A. Structural composite supercapacitors. *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, **2013**, 46, 96–107.
- 100 Qu, G. X.; Cheng, J. L.; Li, X. D.; Yuan, D. M.; Chen, P. N.; Chen, X. L.; Wang, B.; Peng, H. S. A fiber supercapacitor with high energy density based on hollow graphene/conducting polymer fiber electrode. *Adv. Mater.*, **2016**, 28(19), 3646–3652.
- 101 Sun, H.; Xie, S. L.; Li, Y. M.; Jiang, Y. S.; Sun, X. M.; Wang, B. J.; Peng, H. S. Large-area supercapacitor textiles with novel hierarchical conducting structures. *Adv. Mater.*, **2016**, 28(38), 8431–8438.
- 102 Khudiyev, T.; Grena, B.; Loke, G.; Hou, C.; Jang, H.; Lee, J.; Noel, G. H.; Alain, J.; Joannopoulos, J.; Xu, K.; Li, J.; Fink, Y.; Lee, J. T. Thermally drawn rechargeable battery fiber enables pervasive power. *Mater. Today*, **2022**, 52, 80–89.
- 103 Chen, T.; Qiu, L. B.; Cai, Z. B.; Gong, F.; Yang, Z. B.; Wang, Z. S.; Peng, H. S. Intertwined aligned carbon nanotube fiber based dye-sensitized solar cells. *Nano Lett.*, **2012**, 12(5), 2568–2572.
- 104 Wang, L.; Wang, L. Y.; Zhang, Y.; Pan, J.; Li, S. Y.; Sun, X. M.; Zhang, B.; Peng, H. S. Weaving sensing fibers into electrochemical fabric for real-time health monitoring. *Adv. Funct. Mater.*, **2018**, 28(42), 1804456.
- 105 Shi, X.; Zuo, Y.; Zhai, P.; Shen, J. H.; Yang, Y.; Gao, Z.; Liao, M.; Wu, J. X.; Wang, J. W.; Xu, X. J.; Tong, Q.; Zhang, B.; Wang, B. J.; Sun, X. M.; Zhang, L. H.; Pei, Q. B.; Jin, D. Y.; Chen, P. N.; Peng, H. S. Large-area display textiles integrated with functional systems. *Nature*, **2021**, 591(7849), 240–245.
- 106 Chen, G. R.; Li, Y. Z.; Bick, M.; Chen, J. Smart textiles for electricity generation. *Chem. Rev.*, **2020**, 120(8), 3668–3720.
- 107 Parrilla, M.; De Wael, K. Wearable self-powered electrochemical devices for continuous health management. *Adv. Funct. Mater.*, **2021**, 31(50), 2107042.
- 108 Xiao, X.; Xiao, X.; Zhou, Y. H.; Zhao, X.; Chen, G. R.; Liu, Z. X.; Wang, Z. H.; Lu, C. Y.; Hu, M. L.; Nashalian, A.; Shen, S.; Xie, K. D.; Yang, W. W.; Gong, Y. J.; Ding, W. B.; Servati, P.; Han, C.; Dou, S. X.; Li, W. J.; Chen, J. An ultrathin rechargeable solid-state zinc ion fiber battery for electronic textiles. *Sci. Adv.*, **2021**, 7(49), 3742.

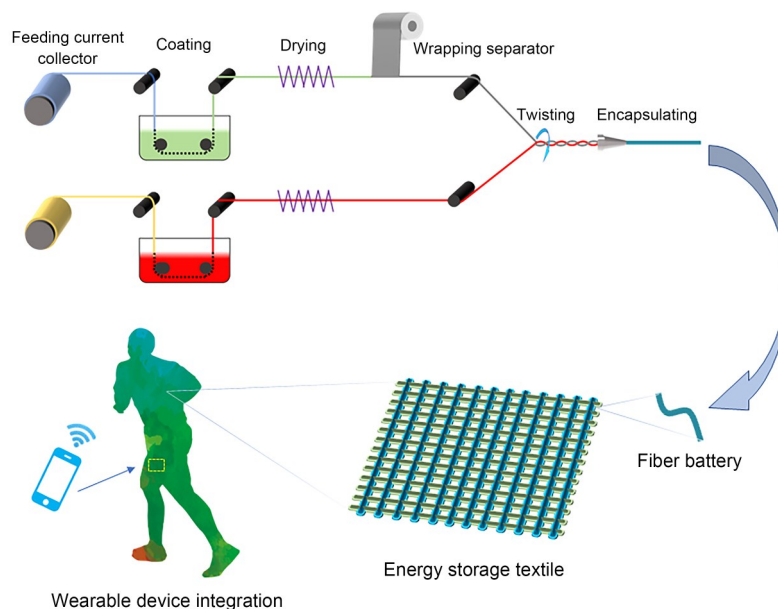
- 109 Yang, Y. X.; Wei, X. F.; Zhang, N. N.; Zheng, J. J.; Chen, X.; Wen, Q.; Luo, X. X.; Lee, C. Y.; Liu, X. H.; Zhang, X. C.; Chen, J.; Tao, C. Y.; Zhang, W.; Fan, X. A non-printed integrated-circuit textile for wireless theranostics. *Nat. Commun.*, **2021**, 12(1), 4876.
- 110 Yin, L.; Kim, K. N.; Lv, J.; Tehrani, F.; Lin, M. Y.; Lin, Z. Z.; Moon, J. M.; Ma, J.; Yu, J. L.; Xu, S.; Wang, J. A self-sustainable wearable multi-modular E-textile bioenergy microgrid system. *Nat. Commun.*, **2021**, 12(1), 1542.

Feature Article

Design and Application of Fiber Batteries

Hai-bo Jiang, Meng Liao, Ying-fan Chang, Kun Zhang, Yi Jiang, Bing-jie Wang*, Hui-sheng Peng
(State Key Laboratory of Molecular Engineering of Polymers, Department of Macromolecular Science,
and Laboratory of Advanced Materials, Fudan University, Shanghai 200438)

Abstract With the unique one-dimensional structure, fiber shape energy storage batteries, represented by lithium-ion fiber batteries, play an important role in energy supplement for wearable devices. The diameter of lithium-ion fiber batteries usually lies between tens to hundreds of micrometers. The outstanding flexibility can accommodate multiple deformation such as bending, twisting, and stretching. By low-cost weaving method, lithium-ion fiber batteries can be easily weaved into energy storage fabrics and integrate with daily clothes. However, traditional fiber batteries suffer from inefficient preparation and poor performance matching, which can hardly move forward from laboratory to industrial production. In addition, researchers used to believe that with the increase of length, the internal resistance of fiber batteries also increase, which seriously hindered the theoretical development of large-scale fiber batteries. In this feature article, we briefly summarize the research progress of fiber shape energy storage devices in recent years. For practical application requirement, the development of flexible lithium-ion fiber batteries is sufficiently concluded based on the work of our group. Firstly, continuous manufacture of lithium-ion fiber batteries is discussed. Large-scale production of lithium-ion batteries was realized for the first time, which met the prerequisites of broad usage. The variation of internal resistance with length was revealed for the special 1D structure of fiber batteries. The electrochemical performance, mechanical properties, and tolerance performance were



* Corresponding author: Bing-jie Wang, E-mail: wangbingjie@fudan.edu.cn

characterized under practical scenarios. Furthermore, based on continuously prepared lithium-ion fiber batteries, energy storage fabrics and integration with wearable devices are developed. This showed promising applications in healthcare, communication, and motion monitoring. Finally, the future of flexible fiber shape energy storage devices is prospected. Efforts should be devoted to improving the electrochemical performance of lithium-ion fiber batteries, such as energy density, power density and cycle performance. Besides, fiber battery pack technique should be investigated to adapt more real-life scenarios. Suitable application for energy storage fabrics are still awaited to be explored.

Keywords Fiber battery, Continuous production, Energy storage fabrics, Integration