引用格式：徐志彬，单鑫宇，李杨，等. 多功能结构电池研究进展[J]. 材料工程，2026，54(8)：150-167.
XU Zhibin，SHAN Xinyu，LI Yang，et al. Research progress in multifunctional structural batteries[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(8)：150-167.

多功能结构电池研究进展

徐志彬，单鑫宇，李 杨，王松蕊，刘兴江*
（中国电子科技集团公司第十八研究所 化学与物理电源全国重点实验室，天津 300384）

摘要：随着电动垂直起降飞行器（eVTOL）与新能源汽车（EVs）等先进交通工具的快速发展，对兼具高能量密度与轻量化特性的高效储能系统提出了迫切需求。多功能结构电池（multifunctional structural batteries，MSBs）作为一种颠覆性的能源与结构一体化技术，其核心在于将能量存储与结构承载功能深度融合于单一部件，为实现系统级减重、空间优化与功能集成开辟了全新路径。本综述阐述了MSBs的基本概念，梳理了主要技术路线及其代表体系，重点聚焦于嵌入式与本征式两类核心集成方式，深入探讨了碳纤维电极的优化与改性、结构电解质的开发以及界面工程策略，综述了通过表面修饰、复合相构建等手段提升力电综合性能的最新进展。同时，介绍了新型结构与制造工艺，以及评估其综合性能的力电耦合理论与多功能效率指标，并总结了该领域仍面临的挑战。尽管实际应用尚需更多基础研究和技术攻关，但MSBs已展现出颠覆传统设计的巨大潜力。

关键词：结构储能一体化；结构电池复合材料；结构电池；碳纤维；结构电解质
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000782 **CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000782
中图分类号：TQ152；TM911.3；TB332 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4381(2026)08-0150-18

Research progress in multifunctional structural batteries

XU Zhibin，SHAN Xinyu，LI Yang，WANG Songrui，LIU Xingjiang*
（National Key Laboratory of Chemical and Physical Power Sources，Tianjin Institute of Power Sources，Tianjin 300384，China）

Abstract：With the rapid development of next-generation vehicles such as electric vertical take-off and landing (eVTOL) aircraft and electric vehicles (EVs), there is an urgent demand for efficient energy storage systems that combine high energy density with lightweight characteristics. Multifunctional structural batteries (MSBs), as a disruptive technology integrating energy storage and structural support, merge these two functions into a single component, thereby offering a novel approach to system-level weight reduction, space optimization, and functional integration. This review outlines the fundamental concepts of MSBs and surveys the primary technical pathways, focusing on two core integration strategies: embedded (physical integration) and intrinsic (chemical fusion) architectures. It provides an in-depth examination of key enabling technologies, including the optimization and modification of carbon fiber electrodes, the development of structural electrolytes, and interface engineering strategies. Recent advances in enhancing electromechanical performance through surface modification and composite-phase construction are summarized. Furthermore, novel structural designs and manufacturing processes are introduced, along with evaluation frameworks based on electromechanical coupling theory and multifunctional efficiency metrics. The review concludes by discussing the persistent challenges in the field. Although further fundamental researchs and technical breakthroughs are required for practical application, MSBs demonstrate significant potential to revolutionize conventional design paradigms.

Key words：structural energy storage integration；structural battery composite；structural battery；carbon fiber；structural electrolyte

在气候变化与全球低碳经济背景下，交通系统电气化转型已成为实现2050年碳中和目标的关键路径之一。在能源转型与交通电动化的全球浪潮下，轻量化与高能效已成为技术发展的核心驱动力[1-2]，但电动汽车(EVs)和电动垂直起降飞行器(eVTOL)等先进运载工具的性能、续航与成本在很大程度上受限于储能系统的质量和体积。以电动汽车为例，电池组可占整车的25%～30%(质量分数，下同)，形成“为运载电池而消耗能量”的悖论[3]，而在航空航天领域，减重需求更为严苛，常规锂离子电池的能量密度仅能支持短时飞行，常需根据具体环境与任务压缩飞行时间[4]。尽管过去三十年中，研究者不断致力于提升锂离子电池能量密度，使其逐步接近理论极限[5-6]，但进一步提高能量密度往往伴随热失控风险的增加与额外防护组件的需求，使得在保障安全性的同时提升续航能力面临巨大挑战。

多功能结构电池(multifunctional structural batteries，MSBs)正是在此背景下应运而生，并被视为能同时解决能源效率与空间布局问题的前瞻性策略[7-8]。其核心理念是开发能够同时承担机械载荷并存储/释放电能的多功能材料，即可以将车身、机翼等结构部件本身变为电池[9-11]。这种“结构即电池”的设计理念，有望实现双重减重，一方面既减少了单纯的结构材料用量，另一方面省去了独立的电池组及其支撑结构。通过以MSBs替代或部分替代传统电池及结构部件，可构建兼具高刚度/强度与足够储能能力的复合储能装置，这使MSBs成为质量敏感型应用(如航天器)与空间受限系统(如船舶)的关键解决方案，对EVs、eVTOL、机器人、船舶、移动设备与便携式电子产品等多个结构与能源需求并重的领域技术发展产生深远影响[12-17]。

本综述旨在系统梳理MSBs领域的最新研究进展与核心挑战(图1)。全文首先阐释其基本概念与定义，并梳理主要技术路线及代表性体系。进而重点剖析实现MSBs的关键技术要素，涵盖碳纤维电极的优化与改性、结构电解质的开发以及界面工程策略。在此基础上，进一步阐述为提升力电综合性能而涌现的新型结构设计与先进制造工艺，并探讨其特有的“电化学-机械耦合”机制与综合效能评估方法。最后，客观总结该技术在走向实际应用过程中面临的主要挑战，展望未来发展方向，以期为相关领域的研究者与工程技术人员提供有价值的参考。

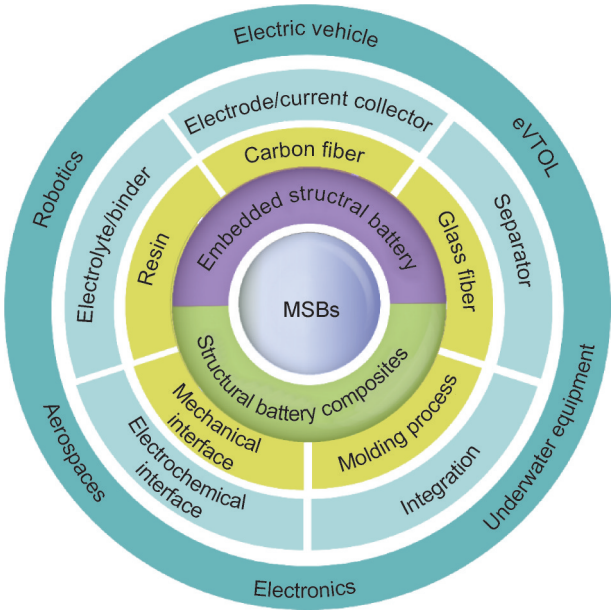


图1　MSBs技术与应用

Fig.1　Technology and applications of multifunctional structural batteries

1　多功能结构电池的基本概念

1.1　多功能结构电池的定义

多功能结构电池(multifunctional structural batteries，MSBs)，代表了一种材料与系统设计的创新范式，其核心在于将能源存储功能与结构承载功能集成于同一组件中，从而实现单个部件在机械支撑与能量存储方面的双重角色。这一技术的兴起，标志着储能系统设计理念从传统的“添加式”向更为先进的“融合式”发生了根本性转变。MSBs的本质是材料层面的多功能一体化，要求材料系统在宏观上能够作为工程结构的一部分，可以承受拉伸、压缩、弯曲等机械载荷，在微观上，其内部组分能够高效地进行离子的嵌入/脱出，实现能量的存储与释放。

与使用常规电池的储能系统相比，使用MSBs的储能系统具有显著优势，如表1所示。相较于传统“添加式”储能系统，使用MSBs的核心优势在于通过功能-结构一体化设计，实现了系统级的轻量化(高质量效率)、空间布局的优化(高空间利用率)以及更高的安全性与设计自由度。然而，其在制造成本与工艺成熟度方面目前仍面临挑战。

1.2　主要研究体系

基于核心电解质材料的化学体系，MSBs的研究主要沿着有机电解质系与水系电解质系两大技术路线展开，它们在性能、安全性和技术挑战上各有侧重，共同构成了该领域多元化发展格局。

表 1 常规储能系统与MSBs储能系统比较

Table 1 Comparison of conventional energy storage systems and MSBs energy storage systems

Feature	Conventional energy storage system	Structural battery-integrated energy storage system
Gravimetric efficiency	Low: energy storage and structural systems are independent	High: integration of structure and function enables system-level weight reduction
Space utilization	Low: dedicated space required for battery installation	High: distributed integration within structures optimizes spatial layout
Design flexibility	Limited: constrained by standard battery form factors	High: customizable shape and size for conformal integration with structures
Multi-functionality	Single function: energy storage	Integrated functions: energy storage, load-bearing, and potential thermal management
System robustness	Centralized architecture: vulnerable to localized failure	Distributed architecture: offers superior system redundancy and resilience
Manufacturing cost	Low to moderate: mature processes with high scalability	Relatively high: novel materials and processes, not yet at full-scale production

(1)有机电解质体系MSBs

有机电解质体系MSBs是目前研究的主流,它沿用并改进传统电池体系,采用有机液态、凝胶或固态电解质,以追求高能量密度和宽电压窗口。在该体系内,结构锂离子电池研究最为深入,其核心挑战在于两方面:一是开发兼具高离子电导率($>10^{-4}$ S·cm^{-1})与优异力学性能(模量>1 GPa)的结构电解质[18];二是将碳纤维优化为集结构承载、电子导电与电化学活性于一体的多功能电极,使其既可作为负极活性材料,也能作为负载磷酸铁锂($LiFePO_4$,LFP)或三元材料(NMC)等活性材料的正极导电骨架[19]。此外,负极采用金属锂的二次电池体系有望进一步提高MSBs的能量密度,结构锂硫电池凭借硫正极高的理论比能量(2600 Wh·kg^{-1})也成为一个重要的前瞻方向[15],其挑战在于如何将硫的多电子反应、巨大的体积变化与结构承载功能结合,需要开发能适应体积膨胀且力学性能稳固的正极结构。

有机电解质系MSBs最大优势在于其较大的能量密度潜力,同时也面临根本性挑战:一方面,有机溶剂的易燃性带来了安全风险;另一方面,在材料层面,高电化学性能与高力学性能之间存在难以调和的内在矛盾,这构成了技术突破的核心瓶颈。随着固态电池技术(采用固态电解质替代液态电解液)的快速发展,为有机电解质体系的MSBs带来了革命性机遇。固态电解质(如聚合物、氧化物、硫化物)可以从根本上消除泄漏与燃烧风险,且自身具备成为结构基体的潜力。因此,固态电池不仅是传统液态电池的升级,更是实现下一代高性能、高可靠MSBs的关键途径。

(2)水体系MSBs

水体系MSBs采用以水为溶剂的电解质,其最大优势在于本质安全性(不燃不爆)、低成本和高离子电导率,并可在开放空气环境中制造封装。但受限于水的窄电化学稳定窗口(通常<2 V),其能量密度上限显著低于有机体系。该路径为MSBs提供了差异化的发展方向,尤其适用于对安全性要求极端苛刻的应用场景。

在水体系MSBs中,锌离子电池因其较高的理论容量、丰富的锌资源以及安全性,成为当前的研究热点。其结构化方式主要是将正极材料(如MnO_2、V基氧化物)和金属锌负极与碳纤维等承力基体相结合,并使用PVA、海藻酸钠等水凝胶聚合物作为兼具离子传导与一定力学性能的结构电解质。已有研究报道了抗拉强度近300 MPa、能量密度(基于活性材料计算)超过180 Wh·kg^{-1}的锌锰MSBs[20]。此外,凭借极高理论能量密度吸引关注的锌空气电池,其结构化需解决空气电极一体化与固态碱性电解质开发等难题,已有研究团队开发了锌空气电池体系仿生复合材料[21]。这些水体系MSBs的多路探索,有望针对特定应用场景开辟差异化的解决方案,共同推动MSBs的多元化发展。

1.3 多功能集成方式

根据材料与功能耦合的深度,MSBs的多功能集成方式可明确划分为嵌入式与本征式两大类,它们分别代表了当前工程应用的可实现方案与未来的终极研究方向。

(1) 嵌入式结构电池(embedded structural batteries,ESB)

ESB是一种物理集成方案,其核心是将成熟的商用软包电池或电芯作为“功能夹层”,直接嵌入到碳纤维/环氧树脂等纤维增强复合材料的层压板或夹芯结构中[22-24],其结构示意图如图2(a)所示。在该设计中,外部增强材料是主要的承力部件,而电池模块本身仅承担有限的载荷,其主要功能仍为提供电能。这种方法本质上是一种系统集成创新,而非材料创新。它的

优势在于可以最大程度地利用现有成熟的电化学体系，快速验证概念和展示潜在效益，且结构与电池的设计相对独立。然而，其根本局限性在于功能耦合度低，电池作为一种力学性能远逊于碳纤维复合材料的“异质体”嵌入，会切断增强纤维的连续性，导致应力集中，从而显著削弱结构整体的刚度、强度和疲劳寿命[25]。同时，电池与复合材料之间的界面结合通常较弱，易成为结构的薄弱环节[26]，电池的热管理需求与结构完整性的设计也相互制约。为缓解这些问题，研究集中于优化电池的排布与封装形式、采用互锁结构或将其嵌入泡沫芯材中以减小对主承力结构的影响[24,27-29]。

总体而言，嵌入式路径通过系统集成创新取得了一定进展，但由于电池本体并未成为有效的承载元件，其在提升系统整体多功能效率方面存在天花板，更多是作为技术发展过程中的一种重要过渡方案。

（2）本征式结构电池复合材料（structural battery composites，SBC）

SBC 则代表了一种从材料本源出发的化学融合策略，是从“物理集成”迈向“化学融合”的技术演进。其核心理念是将电池的每一个组分（电极、电解质、隔膜）都设计为兼具特定电化学功能和力学性能的材料，并通过复合材料工艺一体化成型，最早由美国陆军研究实验室提出[30]。例如，使用碳纤维同时作为电极的活性材料、集流体或结构增强体，开发固态聚合物电解质同时担当离子导体和结构基体[31-32]。这使得材料内部结构均匀连续、界面结合紧密、力与离子的传递路径更优，从原理上为实现更高的质量与空间效率奠定基础。

该路径是 MSBs 领域的终极目标和主要研究方向。根据一体化程度，本征式路径可细分为三种构型：层铺式结构（图 2(b)）最接近传统层压工艺和电池叠片工艺，使用碳纤维织物作为结构电极的骨架，是目前研究最深入且最可能率先取得突破的路径；全纤维结构（图 2(c)）更进一步，致力于将活性材料直接负载或复合到单根结构纤维中，再通过编织等技术形成一体化织物电极，力学集成度更高；纤维电池结构（图 2(d)）旨在单根纤维尺度上实现完整的电池功能，结合 3D 打印等增材制造技术，为制造任意形状、功能梯度分布的一体化部件开辟道路。尽管本征式路径技术挑战巨大，需要同时攻克电极多功能化、高性能结构电解质开发等核心材料难题，但它将带来革命性的性能提升和设计自由度，真正实现“结构即电池”的愿景。

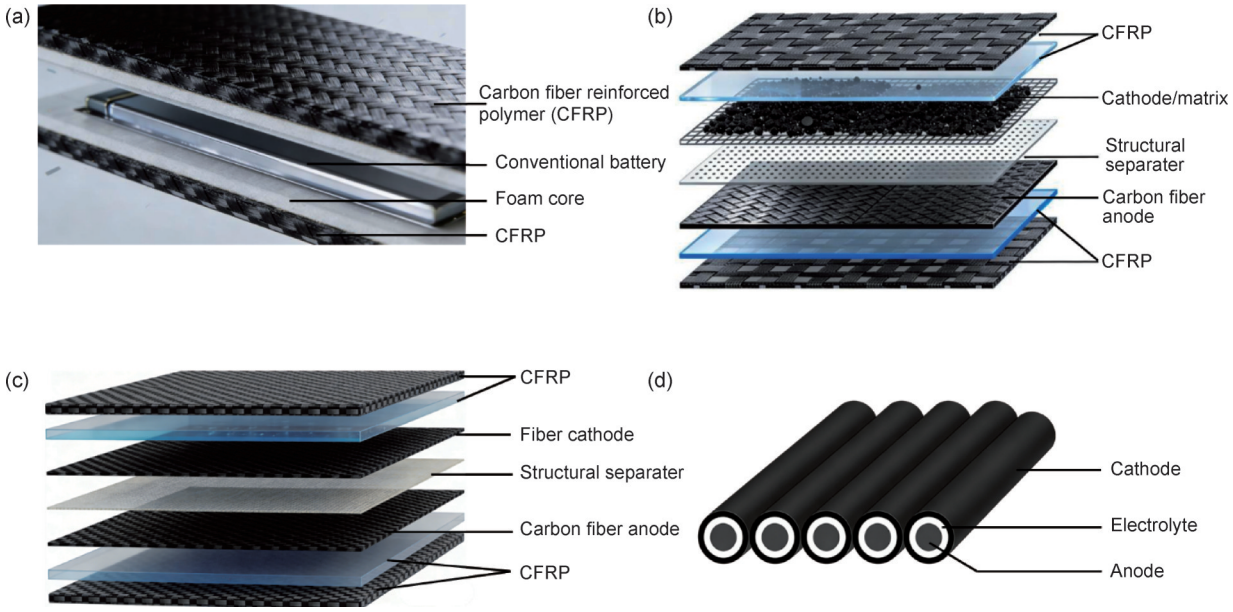


图 2　MSBs 多功能集成方式

（a）嵌入式结构；（b）层铺式结构；（c）全纤维结构；（d）纤维电池结构

Fig.2　Approaches to multifunctional integration of structural batteries

(a)embedded structure; (b)laminated structure; (c)all-fiber structure; (d)fiber battery structure

2　多功能结构电池的关键技术要素

MSBs 的实现依赖于电极材料、电解质系统及界面工程策略的协同创新，不仅需要满足优良的电化学性能，还必须具备优异的力学性能，并通过集成实现功能互补与协同运作。

2.1　碳纤维电极的优化与改性

碳纤维具有优异的力学性能、高热稳定性，且在

极低电位(相对于标准氢电极)下具有锂嵌入能力,因此可用作电极材料。而不同类型的碳纤维在电化学性能上存在显著差异,早在20世纪90年代,已有研究团队开展以沥青基碳纤维、聚丙烯腈(PAN)基碳纤维用作锂离子电池负极材料的研究[33-35]。在嵌入式路径中,碳纤维主要作为结构增强体,其电化学性能并非首要考量。而在本征式路径中,碳纤维被赋予双重使命,其优化与改性的核心目标是实现结构承载与电化学储能功能在单一材料上的最大化协同。

Snyder等[36]报道,PAN基碳纤维可实现力学性能和电化学性能的最佳平衡。碳纤维的加工工艺参数直接影响碳质微观结构的形成,而微观结构又同时决定纤维的力学性能(模量与强度)及其电化学容量。Tavano等[37]系统探究了碳化温度对碳纤维多功能特性的影响规律,发现碳纤维的力学性能与电化学性能存在适度权衡关系:随着碳化温度降低,弹性模量与强度下降,而电化学容量显著提升。因此,通过精准调控碳化温度参数,可在有限设计空间内实现面向特定多功能需求的碳纤维定制化制备。Maria等[38]研究了商用PAN基碳纤维有无上浆剂、不同锂化率和纤维类型等对其电性能的影响,结果表明中等模量纤维的性能优于超高模量纤维,纤维表面的上浆剂会增加内阻从而对容量产生负面影响,而退浆过程可能损伤纤维表面或残留浆料,使其容量与未上浆纤维存在差距,锂化速率是影响碳纤维容量的主要因素。

对于SBC电极材料,电化学循环后保持优异的力学性能至关重要。Eric等[39-40]研究了IMS65和T800H碳纤维在1、10、100、1000次循环后的力学性能,发现经过1000次循环后,碳纤维表面无明显损伤或失效,拉伸强度仍保持在初始强度的80%~90%左右。Fredi等[41]采用HR-TEM和原位拉曼分析高模量M60J和中模量IMS65、T800碳纤维的石墨微结构机理,证实具有小晶体和有限定向特征的碳纤维基电极具有更高比容量,中模量碳纤维的锂离子插入机制更接近于部分无序碳,比容量约300 mAh·g^{-1},而高模量纤维因晶体定向性强、交联阻碍,比容量仅约150 mAh·g^{-1}。基于这些发现,可通过调整石墨的有序度和晶粒尺寸来改进碳纤维的多功能性能。Sutrisnoh等[42]通过解析碳纤维的本征物理化学与力学特性,确定了影响其多功能性能的关键因素,成功研制出兼具155 mAh·g^{-1}比容量与72 GPa模量的优异碳纤维负极材料。

尽管碳纤维具备成为SBC电极材料的潜力,但其容量仍需提升。近年来,研究者通过表面修饰来提高碳纤维的电化学容量,其中在碳纤维上合成金属有机骨架(MOF)结构是一种有效方法。Fu等[43]通过MOF的生长和煅烧,获得了Co_3O_4纳米片原位生长的碳布@Co_3O_4,其中碳布@Co_3O_4-500(500 ℃煅烧)因层叠多孔结构、超细晶体尺寸和高结构稳定性,经过100次循环后具有3 mAh·cm^{-2}的高面容量。Cheng等[44]采用电化学沉积方式在碳布上生长Co_3O_4-MOF纳米片,在0.4 mA·cm^{-2}的电流密度下,100次循环后获得787 mAh·g^{-1}的高比容量。Han等[45]在碳纤维上合成多孔ZnO作为负极材料,100 mA·g^{-1}电流下循环300次后比容量为510 mAh·g^{-1},即使在2000 mA·g^{-1}的高电流密度下,1000次循环后仍可提供395 mAh·g^{-1}的比容量。

目前,SBC研究多集中于负极材料,结构正极的开发相对滞后。碳纤维较好的电子导电能力可作为结构集流体,在其表面涂覆或生长活性材料作为结构正极[46]。

Hagberg等[47]采用电泳沉积法在CF表面沉积LFP纳米颗粒作为结构正极,但因LFP纳米颗粒与碳纤维之间的结合力不足,充放电过程中的体积变化导致二者脱离接触,影响作为结构正极的电性能发挥。Huang等[48]通过在LFP-CF上添加还原氧化石墨烯,显著提升了正极材料的容量和保持率,0.1 C下比容量达163.7 mAh·g^{-1},2 C下循环400次后保持率为98.92%。进一步,Sanchez等[49]在碳纤维表面沉积由LFP和电化学剥离的氧化石墨烯(EGO)纳米片混合组成的正极材料,实现了LFP负载>90%,且黏附性良好。Chaudhary等[50]也通过电泳沉积LFP过程中引入还原氧化石墨烯制备了结构正极,采用真空灌注固液电解质固化处理,既增强碳纤维的机械强度,又构建离子迁移通道,0.05 C倍率下可实现112 mAh·g^{-1}的比容量,模量超过80 GPa。为评估高能量密度结构正极在固液双相结构电解质中的电化学性能,该团队进一步验证了在碳纤维上电泳沉积$LiNi_{0.33}Mn_{0.33}Co_{0.33}O_2$(NMC111)作为结构正极的可行性[51]。

为提高碳纤维电极的容量,目前主要途径是在其表面包覆或生长活性材料。该方法不仅可有效提升电极的比容量,还能增大碳纤维与环氧树脂等基体的接触面积,从而改善界面性能。然而,简单包覆的活性材料因接触面积有限,在充放电循环中易发生脱落,进而影响电化学性能的稳定性;而通过化学生长方式虽能增强活性材料与纤维的结合力,提升界面牢固度,但在制备过程中部分化学反应可能损伤碳纤维本体,导致其机械强度下降。

总体而言,当前碳纤维电极的改性策略主要为本征调控和表面修饰两种思路,表面修饰能快速提升容

量，但往往以牺牲部分力学强度与界面稳定性为代价[52]且工艺复杂，更适用于对能量密度有优先要求的SBC原型开发。而通过前驱体设计与碳化工艺调控纤维本征结构，是高模量、高可靠性应用的优选路径，虽能更好地平衡力-电性能，但容量提升有限且成本高昂。

此外，众多研究团队开展了基于碳纤维电极的SBC集成研究。Fu等[53]提出基于改性金属纤维层合板的SBC制造方法，金属箔兼具抗冲击层和集流体功能。Moyer等[54]采用环氧树脂作为封装介质，碳纤维作为导电集流器和结构加固层，制备的复合材料能量密度超过35 Wh·kg^{-1}(整体)，循环稳定，抗拉强度213 MPa，杨氏模量1.8 GPa，并成功应用于1U CubeSat框架的集成电力输送平台。Dong等[55]制备了锂金属SBC，以锂/碳纤维织物(CFWF)为负极、LFP/CFWF为正极、玻璃纤维织物(GFWF)/PEO为电解质和GFWF/环氧树脂为封装层，放电比容量为147 mAh·g^{-1}(接近LFP理论比容量)，抗拉强度168.4 MPa，抗弯强度157.8 MPa，在适度机械载荷下具有可靠的充放电性能。Chen等[56]以碳纤维作为集流体制备了新型碳纤维增强Zn-MnO_2结构复合电池，采用真空固化工艺制造成型，抗拉强度293 MPa，能量密度181.5 Wh·kg^{-1}(活性材料)/55 Wh·kg^{-1}(整体)，100次循环后容量保持率为88.3%。Tian等[57]以磷酸铁锂涂层碳纤维布为正极、石墨涂层碳纤维布为负极、浸渍液态电解质的多孔树脂为结构电解质构建了SBC，初始能量密度10.0 Wh·kg^{-1}(整体)，100次循环后容量保持率91.9%，拉伸强度221.8 MPa，弯曲强度119.8 MPa。Asp团队[58]对比了不同纤维织物隔膜的SBC电性能，进一步验证了全碳纤维SBC的可行性[32]，如图3所示，采用碳纤维作为负极、电泳沉积磷酸铁锂的碳纤维作为正极、纤维素薄膜作为隔膜，能量密度30 Wh·kg^{-1}(整体)，循环稳定性高达1000次，库仑效率100%。

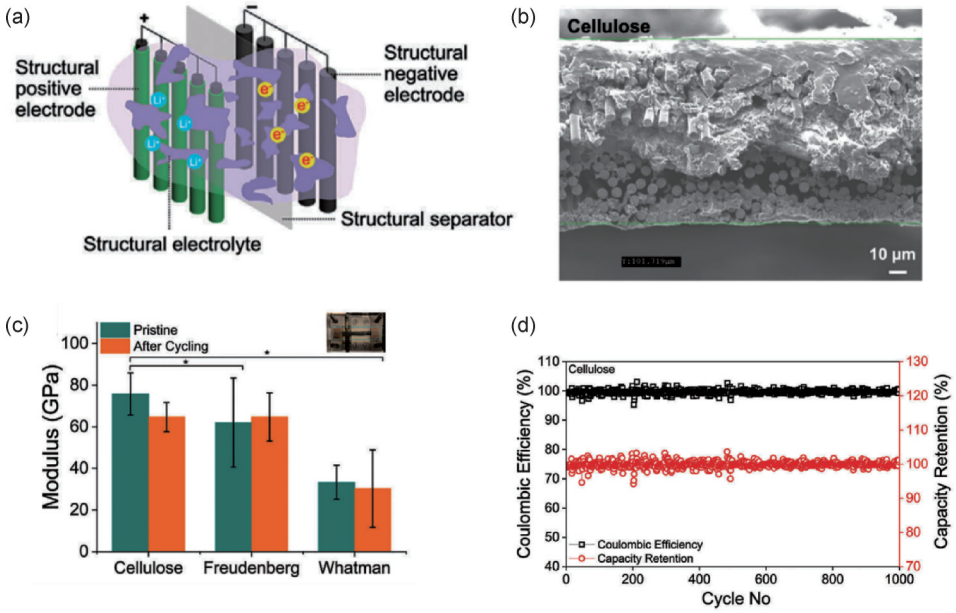


图3　全纤维SBC及性能[32]

(a)全纤维SBC示意图；(b)全电池截面；(c)全纤维电池恒电流循环前后的模量；(d)全电池在0.1 C倍率下循环1000次的库仑效率与容量保持率

Fig.3　All-carbon-fiber structural battery[32]

(a)schematic diagram of all-fiber SBC; (b)cross-section of full cell; (c)modulus of an all-fiber structural battery full cells before and after galvanometric cycling; (d)coulombic efficiency and capacity retention of full cell at 0.1 C for 1000 cycles

结合表2[51,54,56-60]汇总的数据可以看到，SBC基于整体质量的能量密度普遍低于50 Wh·kg^{-1}，与商用电池存在较大差距。本征式设计得益于材料层面的深度功能融合，其拉伸强度显著优于嵌入式设计，展现出作为承载结构的真正潜力。然而，现有研究普遍缺乏在机械-电化学耦合工况下的长周期循环数据，对其实际工况下的耐久性评估尚不充分。当前性能数据揭示了该领域的核心矛盾，即在系统层面，高能量密度与高力学性能难以兼得。未来的突破必须依赖于在材料、界面、结构3个维度上的协同创新，以打破现有的性能权衡边界。

2.2　结构电解质的开发

对于本征式路径，电解质必须成为承力结构的一部分，其力学贡献至关重要，树脂基的结构电解质

表2 SBC的电化学性能与力学性能

Table 2 Electrochemical and mechanical properties of structural battery composites

Anode	Cathode	Structural electrolyte	Energy density/($Wh\cdot kg^{-1}$)	Young's modulus/GPa	Tensile strength/MPa	Flexural modulus/GPa	Flexural strength/MPa	Cycle	Ref.
Gr@CF	LFP@CF	SEP&1 $mol\cdot L^{-1}$ LiTFSI in $EMIMBF_4$	35(cell)	1.8	213			High capacity retention for 50 cycles	[54]
CF	LFP@CF	BPAMA/0.4 $mol\cdot L^{-1}$ LiBoB+0.6 $mol\cdot L^{-1}$ LiTf in EC:PC	23.6(cell)	25	300			High capacity retention for 60 cycles	[58]
Zn@CF	MnO_2@CF	PVA/$ZnCl_2$-$MnSO_4$	181.5(active)/55(cell)	12.5	293	4.4	181	88.3% retained after 100 cycles	[56]
Zn sheet	$NH_4V_4O_{10}$@CF	PVHF/KL-Z	159(active)	5.7	166	52.4	584	94.6% retained after 500 cycles	[59]
T800 CF	NCM111@T800 CF	BPAMA/IM LiTFSI in EC:PC	84(active)						[51]
Gr@CF	LFP@CF	TETRAD-C/1 $mol\cdot L^{-1}$ $LiPF_6$ in DEC:DMC:EC	10.0(cell)		221.8		119.8	91.9% retained after 100 cycles	[57]
Al mesh	NG@T300 CF	Epoxy+resin/$AlCl_3$ in [EMIm]Cl	22.58(active)/8.3(cell)	22.12	299.4		150.9	90% retained after 500 cycles	[60]

是SBC实现多功能的核心与难点。理想的结构电解质需兼具高离子电导率($>10^{-4}$ $S\cdot cm^{-1}$)与优异的力学性能(高模量、高强度)。环氧树脂本身不具备离子传导能力,通过在树脂中掺入高离子导率材料以提升其电化学性能,但少量添加剂对整体电导率提升有限,过量添加又会导致树脂机械结构坍塌[61]。如何破解这种"此消彼长"的性能矛盾,仍是当前面临的核心挑战。

双连续相结构电解质是结构电解质中的一种主流技术方案,其核心特征在于构建了在三维空间均连续且相互贯穿的双相网络结构,其中一相为提供机械支撑的刚性聚合物骨架(如环氧树脂),为了匹配环氧热树脂固化条件,另一相为具有高热稳定性和宽电化学窗口的离子液体(ion liquid,IL)[62]。通过精确调控相分离过程,可在微纳米尺度优化两相形貌,从而协同提升机械强度与电化学性能[63]。

两相比例对复合结构的力学和电化学性能有极大影响,通过调整环氧树脂与电解质的配比,可有效调控结构电解质的形态。Abdou等[64]系统分析了由乙氧化双酚A甲基丙烯酸双酯(DMA)、1-乙基咪唑双三氟甲基磺酰亚胺质子型离子液体([C_2HIm][TFSI])构成的SBC电解质体系(图4(a)),当液态电解质含量为50%时,复合体系在保持约150 MPa剪切模量的同时实现约10^{-4} $S\cdot cm^{-1}$的离子电导率。Quan等[65]基于双酚A二缩水甘油醚(DGEBA)与1-乙基-3-甲基咪唑双三氟甲磺酰亚胺离子液体(EMIM-TFSI)合成了系列结构电解质,室温固化可形成双连续结构,含35%(体积分数)EMIM-TFSI的体系同步实现了800 MPa的杨氏模量与2.8×10^{-4} $S\cdot cm^{-1}$的离子电导率,进一步引入多功能嵌段共聚物,结构电解质杨氏模量达530 MPa,离子电导率提升至6.4×10^{-4} $S\cdot cm^{-1}$。

Dong等[31]采用酸化短切碳纤维对树脂/IL结构电解质进行增强,制备的电解质抗拉强度22.6 MPa,杨氏模量1.08 GPa,离子电导率9.46×10^{-5} $S\cdot cm^{-1}$。Yu等[63]报道了连续IL/环氧树脂/有机黏土结构电解质,有机黏土的引入改变了连续相结构,当有机黏土含量为5%时,复合材料的多功能性能最优,拉伸模量211 MPa,离子电导率9×10^{-5} $S\cdot cm^{-1}$。

树脂和离子液体的种类对结构电池的性能也会产生影响,Singavarapu等[66]系统性地将$EMIM^+$、$EVIM^+$、$PYR13^+$等阳离子与SI^-、TSI^-阴离子组合,验证了PYR13-SI离子液体体系的应用潜力。Xu等[67]对比了含双酚A二甲基丙烯酸酯和双酚A乙氧基二甲基丙烯酸酯两种树脂制备的结构电解质与碳纤维的粘接性能。树脂的固化方法和种类对结构电解质性能也有显著影响[68-69]。Ihrner等[70]利用紫外线固化得到具有相分离结构的电解质,室温离子电导率达1.5×10^{-4} $S\cdot cm^{-1}$,弹性模量为750 MPa,通过改变

单体结构和比例，可定制相分离尺寸和形态。Schneider等[71]研究了热引发聚合诱导相分离制备双连续结构电解质方法，与紫外光固化膜相比，热固化样品的热机械性能更优，环境温度下离子电导率约2×10^{-4} S·cm^{-1}。

填充型结构电解质是通过在固化后的树脂基体中构建三维连通多孔网络，再注入液态电解质形成的复合体系。其核心特征在于“骨架-通道”分离设计，刚性树脂骨架提供机械支撑与稳定性，而孔隙中的液态电解质则构建高效离子传输通道。这种结构通常通过致孔剂分解、相分离或模板法等技术实现，能够显著提高离子电导率（接近液态电解质水平），同时保持基体材料的力学完整性。然而，其挑战在于需平衡孔隙率与机械强度的关系，该设计为破解结构电解质离子电导率与力学性能间的矛盾提供了重要路径。

Qi等[72]基于紫外引发的阳离子聚合，采用光刻技术开发了具有垂直离子通道的大孔图像化结构电解质，液体电解质填充的多孔环氧树脂杨氏模量为1.2 GPa，离子电导率为3.7×10^{-3} mS·cm^{-1}。Fu等[73]通过树脂造孔方式制备了自支撑LiDFOB基结构电解质薄膜，该材料具备3.65 MPa的拉伸强度、良好的成膜性、电化学稳定性及2.2×10^{-4} S·cm^{-1}的离子电导率。Ye等[74]通过磁场引导环氧树脂内Fe_3O_4纳米颗粒定向排列，结合超声酸蚀处理，开发出兼具高力学拉伸性能与优异离子电导率的多通道环氧固体电解质（图4(b)）。高分辨率显微计算机断层扫描证实，经磁场定向排列的Fe_3O_4纳米颗粒被酸蚀去除后，形成了丰富的定向通道，多通道固体电解质的拉伸强度达（78.97±1.06）MPa，弹性模量（1.66±0.04）GPa（与纯环氧树脂相当），同时实现（1.67±0.13）×10^{-3} mS·cm^{-1}的高离子电导率。

固态电解质因其本质安全性、高机械强度及宽电化学稳定窗口，在结构电池领域备受关注。近年来，多个研究团体探索了使用聚合物电解质来增强SBC的力学性能。相较于易泄漏的液态电解质，固态电解质可显著提升SBC的安全性与结构完整性，尤其当其作为基体材料时，更能赋予构件优异的力学性能[75]。聚环氧乙烷（PEO）、聚丙烯腈、聚乙烯醇（PVA）、聚偏氟乙烯（PVDF）或聚碳酸酯等是常见的聚合物基体材料，高离子电导率通常要求聚合物链段具备高运动自由度（对应低玻璃化转变温度T_g），而高机械强度则依赖于致密交联网络（对应高T_g），二者本质上是相悖的[76]，通常加入添加剂，如陶瓷填料、液体或固体增塑剂，以增强离子电导率[77]。

Andrews等[78]制备出一种类环氧树脂固态聚合物电解质，仅添加不足23%的增塑剂，室温下电导率接近10^{-3} S·cm^{-1}，极限拉伸强度约403.5 kPa，相较于传统高导电性固态聚合物电解质（需30%～60%增塑剂）具有显著优势。Feng等[79]采用聚乙二醇（PEG）、锂盐、纳米二氧化硅及环氧树脂/固化剂体系，制备了基于PEG-环氧树脂的结构电解质，纳米二氧化硅含量为10%时获得最优的力电协同性能。Dong等[80]以PEO-LiTFSI为聚合物电解质基质，磷酸铝钛锂（LATP）和玻璃纤维（GF）为增强填料，制备了LATP-GF/PEO-LiTFSI复合结构电解质，该电解质抗拉强度33.1 MPa，离子电导率6.3×10^{-5} S·cm^{-1}。Niazi等[81]采用平纹编织玻璃纤维增强复合聚合物基体，通过多功能平衡优化获得PVA/环氧树脂/锂盐/氧化铝的最佳配比（0.34/0.14/0.32/0.2），制备的玻璃纤维结构电解质具有弹性模量3 GPa、拉伸强度56.9 MPa、离子电导率1.74×10^{-4} S·cm^{-1}。

Choi等[82]介绍了通过反应诱导相变制造的多氢键杂化电解质，双（羟甲基）环己烷（CHDM）通过塑化作用和氢键形成多维通道增强阳离子运动，室温离子电导率2×10^{-4} S·cm^{-1}，弹性模量约为300 MPa，与碳纤维复合制成的半电池展现出承载机械负荷和离子传输的潜力。He等[83]提出一种新型双相凝胶-树脂电解质体系，通过在多孔环氧树脂骨架中嵌入PVDF-HFP基凝胶电解质，环氧树脂与凝胶电解质的耦合效应使材料拉伸模量提升了22%（图4(c)）。Yang团队[84]使用准固态聚合物电解质改善SBC的弯曲性能和能量密度，该电解质由三官能丙烯酸酯单体和双盐电解质组成，可在55 ℃低温下热原位聚合，离子电导率1.2×10^{-3} S·cm^{-1}，弯曲模量176 MPa，拉伸强度2.7 MPa。He等[85]提出高熵带状电解质概念，设计为两侧具有黏性表层、中间具有坚固骨架层，利用聚合物-离子相互作用实现高熵微结构，该电解质室温下离子电导率（3.50±0.53）×10^{-4} S·cm^{-1}，力学性能优异（韧性为（11.28±1.12）MJ·m^{-3}，强度为（8.18±0.28）MPa），且具有带状黏合性（界面韧度为（231.6±9.6）J·m^{-2}），有望应用于SBC（图4(d)）。

从表3[51,64-65,73-74,81,83,86]中汇总的不同类型结构电解质的离子电导率与力学性能可看出，通过构建双连续相结构，可在保持百MPa级模量的同时，实现10^{-4} S·cm^{-1}量级的离子电导率，展现了该设计路径在平衡力-电性能方面的有效性。相比之下，填充多孔型电解质凭借连续的离子通道，能获得更高的电导率（＞10^{-3} S·cm^{-1}），但其力学强度通常需依赖树脂骨架的强化。

无机固态电解质凭借其高安全性、优异热稳定性

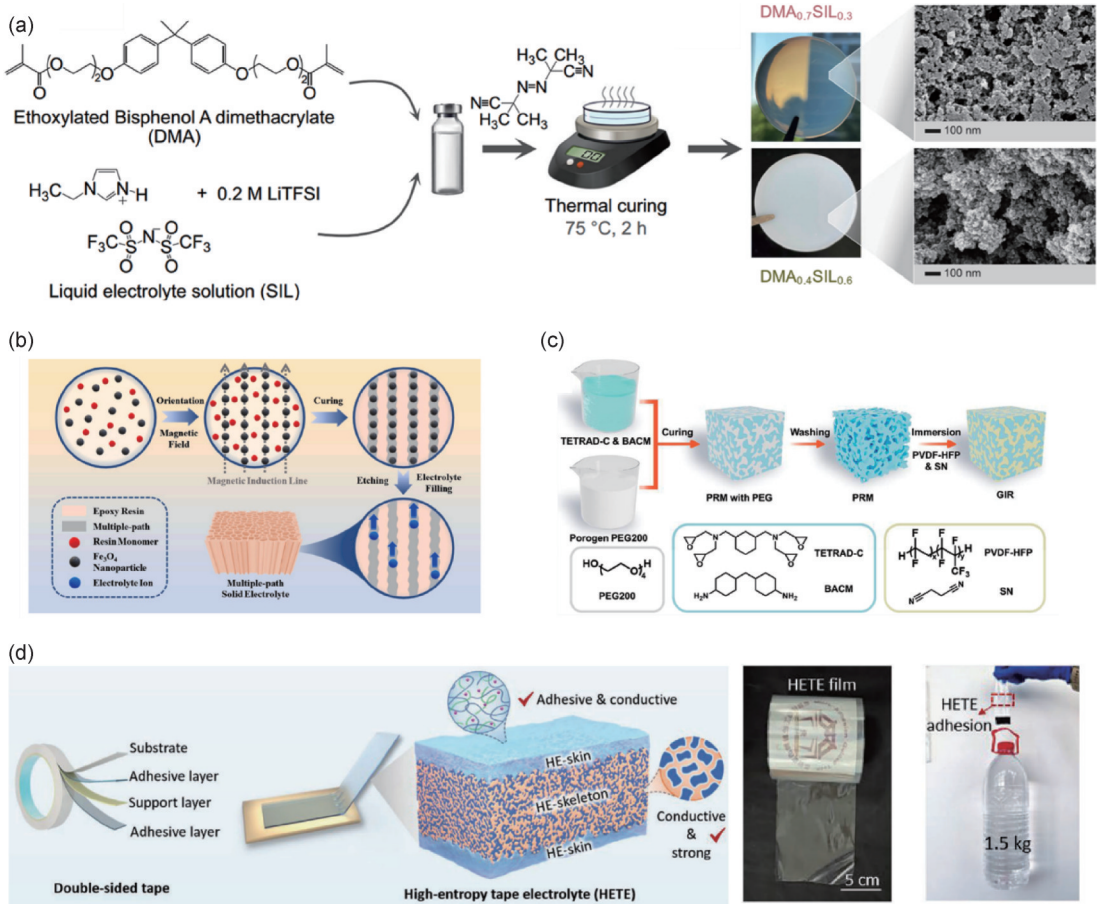


图4 不同路径结构电解质的构建

(a)双连续结构[64];(b)造孔树脂浸润电解质[74];(c)树脂-凝胶复合结构[83];(d)高熵电解质[85]

Fig.4 Multi-path construction of structural electrolytes

(a)bi-continuous structure[64];(b)porous polymer resin infused with electrolyte[74];(c)resin-gel composite structure[83];(d)high-entropy electrolyte[85]

表3 不同类型结构电解质的离子电导率与力学性能

Table 3 Ionic conductivity and mechanical properties of different types of structural electrolytes

Matrix	Electrolyte	Ionic conductivity/ ($S\cdot cm^{-1}$)	Young's modulus/GPa	Tensile strength/ MPa	Ref.
DGEBA+iPDA	EMIM-TFSI	0.64×10^{-3}	0.53		[65]
Bisphenol A	LiTFSI in EMIM-TFSI/PC	4.99×10^{-4}	0.85		[86]
BPAMA	1 $mol\cdot L^{-1}$ LiTFSI in EC/PC	2.5×10^{-5}			[51]
Epon-862+EK3402	1 $mol\cdot L^{-1}$ $LiPF_6$ in EC/EMC/DEC	$(1.67\pm0.13)\times10^{-3}$	1.66±0.04	78.97±1.06	[74]
EBPADMA+PEGDA	1 $mol\cdot L^{-1}$ LiDFOB in EC/PC	2.2×10^{-4}		3.65	[73]
DMA	0.2 $mol\cdot L^{-1}$ LiTFSI in $[C_2HIm][TFSI]$	0.1×10^{-3}			[64]
AS-89	$PVA_{0.34}$/$epoxy_{0.14}$/$LiTFSI_{0.32}$/$(Al_2O_3)_{0.2}$	1.7×10^{-4}		56.9	[81]
TETRAD-C+BACM	PVDF-HFP+SN	0.52×10^{-3}	0.77	22	[83]

和宽电化学窗口,为结构电池带来了突破性的机遇与挑战。其体系主要分为氧化物与硫化物两类,氧化物电解质(如LLZO、LATP等)具有高杨氏模量(>60 GPa),是理想的结构增强相,但其高温烧结工艺与聚合物基体的低温固化存在根本冲突,且本征脆性与界面阻抗高。硫化物电解质(如LPS、LGPS等)则拥有极高的室温离子电导率(10^{-2} $S\cdot cm^{-1}$量级)和良好的冷压成型性,但其对空气/水分敏感、化学稳定性差、力学模量偏低且承载能力有限。两类材料对于本征式设计均会面临与电极及基体的固-固界面接触难题,并在循环载荷下因热机械失配而引发的界面退化风险,在MSBs领域的应用仍处于早期探索阶段,目前研究主要集中于将其作为复合电解质中的功能填料或构筑特定复合结构。采用嵌入式设计既能利用固态电池

的本征安全优势，又能通过模块化设计降低系统集成复杂度，可能为MSBs的发展提供近期内可行的技术路径。此外，随着智能材料前沿方向发展，基于动态键合的自修复电解质能在损伤后恢复离子通道与结构完整性[87]，为实现功能与结构的自主恢复提供新思路[88]，有望显著提升结构电池的循环寿命与服役可靠性。

2.3　界面工程策略

界面工程是保障MSBs优越性能的共性关键技术，其设计侧重点与功能耦合程度而有所区别。对于嵌入式路径，界面策略的核心在于通过如界面机械耦合强化等方式，充分调用并传递传统电池本体的固有强度，使其有效参与结构承载，从而提升整体系统的力学性能。而在“本征式”路径中，界面问题则更为内在与复杂，还需着重维护电极/电解质及纤维/基体之间在电化学循环与机械载荷协同作用下的多场耦合稳定性，以解决力-电性能相互制约的根本瓶颈。

传统锂离子电池内部集流体、隔膜等均具有一定的力学强度，但由于电极层叠结构且采用液态电解液，其层间无任何机械耦合强度，很小的弯曲就会造成内部层间滑移[89]。为充分利用电池本体结构强度，Jin等[7]在电极和隔膜之间构建了仿生树根形界面，使电池的弯曲模量增加了11倍，达到3.1 GPa，该电池可以作为机翼同时为飞机模型提供动力。Ladpli等[27]使用贯穿电芯的互锁铆钉来稳定松散的电极层，并固定在外部封装的高强度碳纤维复合材料面板上，从而抑制电极层间剪切运动，实现电芯直接承载机械负荷，如图5(a)所示。铆钉互锁结构显著提升抗弯强度，在弯曲疲劳测试1000次循环后采用铆钉结构的容量仅减少了约3%，直流阻抗增加约3%，而未采用铆钉结构的容量减少了约25%，直流阻抗增加约21%。

针对MSBs设计中由于集流体、电解质层与隔膜之间的界面结合力较弱，易导致分层现象、内阻增加及电荷传输效率下降等问题。He等[90]通过将电池材料与树脂基体以图案化点阵形式分别分布在碳纤维

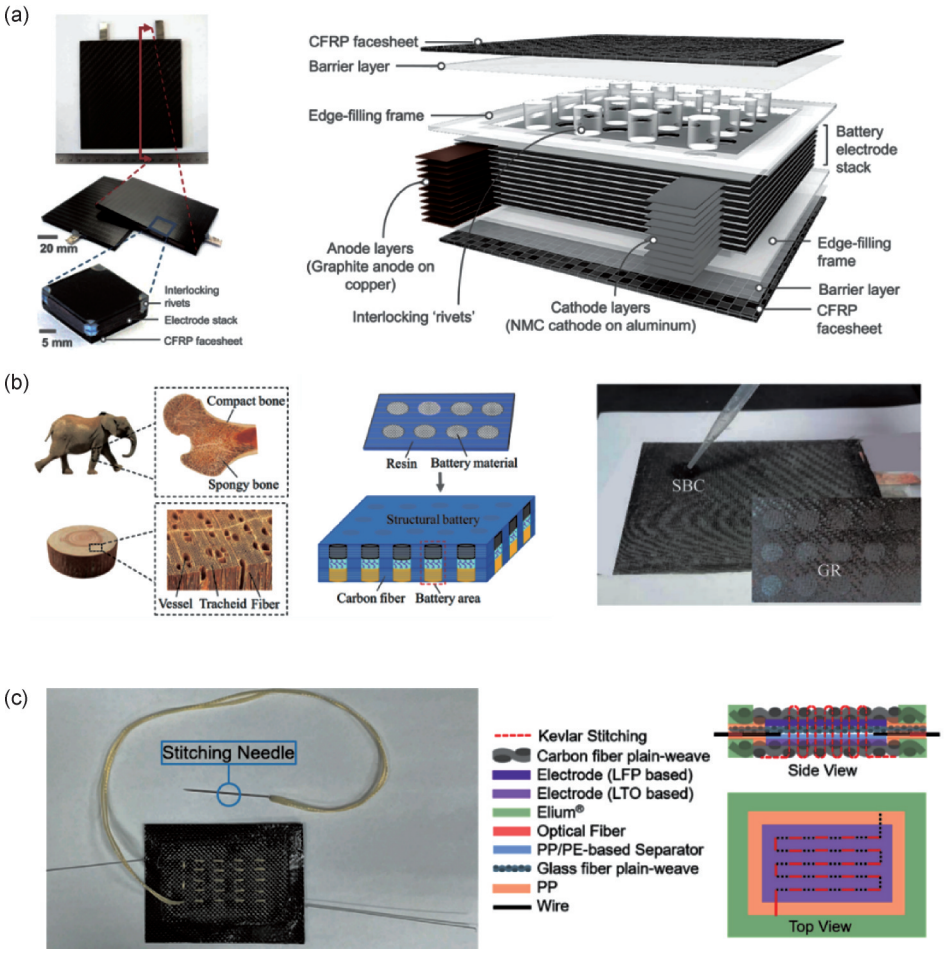


图5　界面增强策略

(a)铆钉互锁结构增强[27]；(b)点阵式多孔复合框架[90]；(c)缝合增强[91]

Fig.5　Interface reinforcement strategy

(a)rivets interlocking structure[27]; (b)porous composite frame-work[90]; (c)stitched architecture[91]

织物上制备电极预浸料(图5(b)),设计并制造出一种新型多孔磷酸铁锂-石墨MSBs复合材料,固化后的多孔复合框架既提供承载功能,又将电化学反应限制于点阵结构内的液态电解质区域,与液-固双相混合型MSBs电解质体系相比,力学性能显著提升。如图5(c)所示,Cha等[91]采用缝合增强技术,通过最小化正负极间距优化离子传输路径,所开发的MSBs拉伸强度达189 MPa,拉伸模量9.1 GPa,基于电池总质量计算的能量密度高达39.5 Wh·kg^{-1}(整体)。该团队进一步通过芳纶纤维缝合技术与选择性构建的热塑性界面层来增强电化学机械耦合性能[92],系统研究不同缝线密度的定制化缝合架构,揭示了缝合工艺对电化学阻抗及层间剪切强度的调控规律,最终制备的MSBs能量密度达42.2 Wh·kg^{-1}(整体),弯曲强度达215.6 MPa,弹性模量达14.7 GPa,较未缝合构型提升了40%。

3 新型结构设计与制造工艺

新型结构与先进制造工艺是前述关键材料技术要素(碳纤维电极、结构电解质等)的工程化落地与系统集成路径,通过在系统层面优化力-电功能的分布与传递,有效提升复合结构的整体力学性能与耐久性,并实现对内部空间的更高效利用,从而在宏观上协同优化能量密度与可靠性,这可为MSBs面向复杂工况的实际应用奠定关键基础。

Asp团队的Xu等[93]制备了一种多电芯MSBs复合层压板,通过串联3个最先进的MSBs复合单体构成,针对单体间电荷转移电阻差异引发的问题,提出了配备均衡电路的电池管理系统方案。Siraj等[94]成功实现了6单元MSBs的集成制备(图6(a)),其多功能性能与尺寸均达到现有最优MSBs的两倍,制备的MSBs复合材料能量密度达41 Wh·kg^{-1}(整体),弹性模量26 GPa,与第一代MSBs相比性能翻倍。

Pyo等[95]提出一种具有管状形态的聚合物基复合材料结构锂离子电池系统,该结构采用热压罐成型,为保障有机液态电解质在连续树脂聚合物体系中的稳定性,系统集成了热塑性热熔膜、双层玻璃纤维承载隔膜、铝箔及聚二甲基硅氧烷等多重防护组件(图6(b)),“管状层压复合电池”的初始比容量达120~130 mAh·g^{-1},具备良好的循环性能与稳定的库仑效率,在四点弯曲载荷条件下展现出良好的机械承载能力。Thakur等[96-97]提出了一种用共挤压沉积法增材制造连续碳纤维三维MSBs复合材料的方法,正极材料极掺杂在基体材料与固体聚合物电解质包覆的碳纤维共挤压打印,带有结构电解质涂层的碳纤维不仅直接作为负极材料,同时提高打印结构的力学性能(图6(c))。

近几年,线型电池因其柔性以及与传统纤维的结构相似性等特点,被认为是匹配智能电子织物的首选能量器件,已有科研机构开发了有高强度、稳定电化学特性的锂金属复合纱线[98],将线性电池与碳纤维进行复合编织后,进一步采用树脂固化成型,成为MSBs研制的另一个思路。日本株式会社丰田中央研究所Makimura等[99]提出了一种同轴纤维束MSBs,其中心是由碳纤维制成的负极,内壳是由Al_2O_3和聚偏二氟乙烯制成的隔膜,外壳是正极,以288个纤维电极组合的MSBs容量达225 mAh,100次循环后容量保持率为92%(图6(d))。

4 力电耦合与多功能效率评估

在MSBs中,电化学-机械耦合效应尤为显著。机械应力通过影响电极材料的化学势,直接改变电池电位;而离子扩散则诱发局部应力集中,形成复杂的反馈循环。这种耦合机制在损伤演化过程中表现得更为复杂:微裂纹的形成可能增加电解质与活性材料的接触面积,暂时提升能量密度,却又同时增加电极电阻;电化学循环导致的电极体积变化会促进纤维/基体界面脱粘,进而影响结构的完整性。对这些耦合效应的深入理解,不仅是构建准确预测模型的前提,也是评估MSBs应用潜力的基础。

作为建立电化学-力学耦合模型的第一步,Tu等[100]研究了MSBs电解质在有限变形作用下的化学扩散行为,Yin等[101]通过多物理场建模方法系统分析了表面改性碳纤维在结构锂离子电池中的电化学-力学耦合行为,建立了包含正极、负极、隔膜和电解质的二维多物理场模型,并利用改性碳纤维电极的实验数据对模型进行了全面验证,Rollin等[102]针对饱含液态电解质的多孔黏结剂基体及其中的活性颗粒三相系统构建了线性电化学-力学耦合模型,Zhang等[103]提出了一种整体有限元计算模型,用于评估MSBs在复杂载荷工况下的力学性能与损伤机制。

Johannisson等[104]为系统评估众多设计参数的影响机制,建立了MSBs多功能性能分析模型;通过将MSBs的力学行为与电能存储性能,分别与传统碳纤维复合材料的力学特性及标准锂离子电池的储能性能进行对标,并基于已知性能与质量的单一功能系统,构建了质量等效对比模型。Carlstedt等[105]提出一种半解析计算框架,用于预测恒电流循环条件下MSBs中热-扩散耦合诱导应力的分布规律,进一步搭

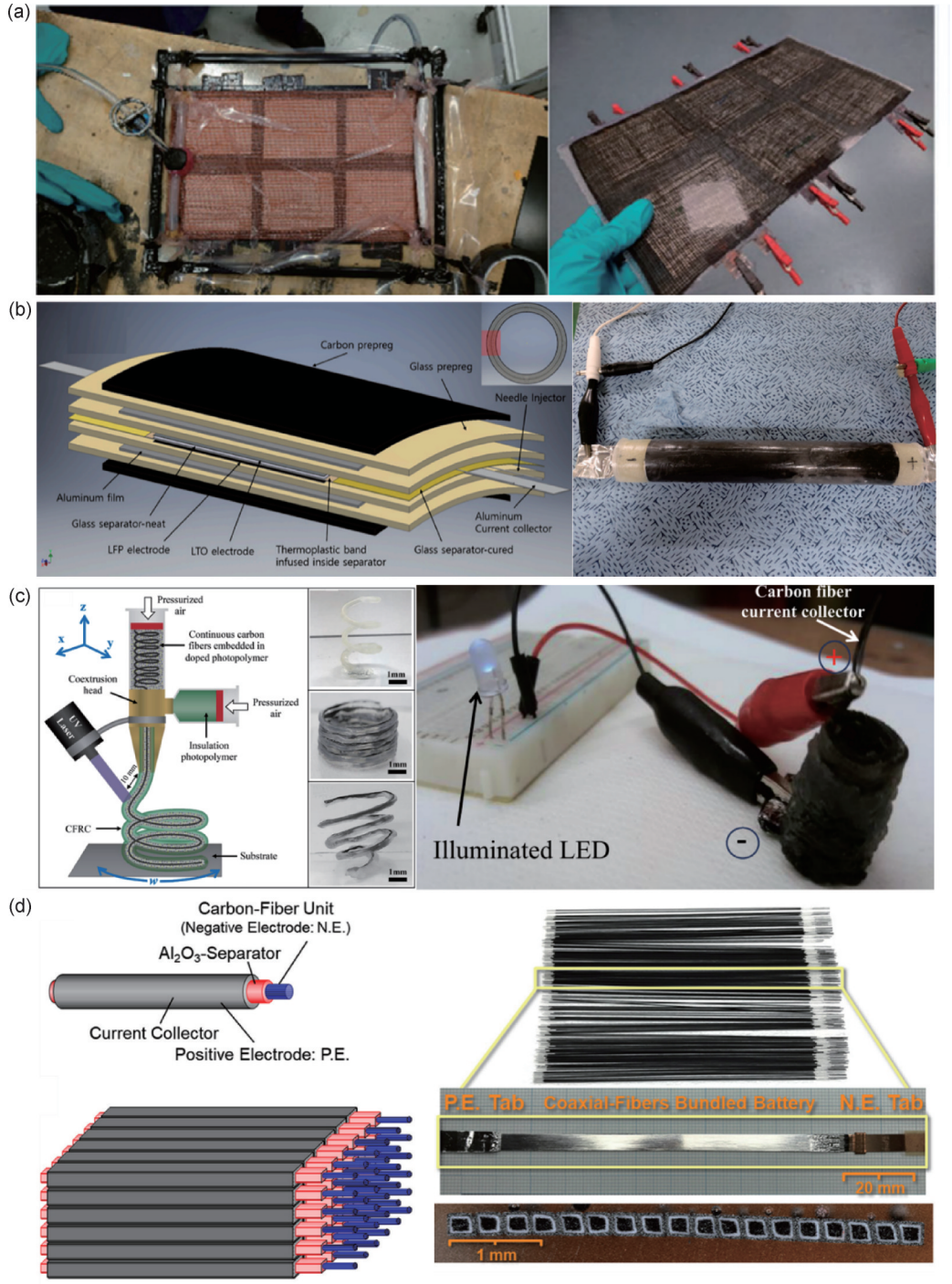


图 6　新型结构设计

(a)多单元复合 MSBs[94]；(b)管状 MSBs[95]；(c)3D 打印 MSBs[97]；(d)同轴纤维束 MSBs[99]

Fig.6　Novel structural designs

(a)multicell structural battery composites[94]; (b)tubular structural battery[95];
(c)3D-printed structural battery[97]; (d)coaxial fiber bundle structural battery[99]

建了面向碳纤维 MSBs 的热-电-化学-力学全耦合计算的模型框架[106]，该模型综合考虑了锂离子嵌入碳纤维引发的嵌入应变及各组分热胀冷缩导致的热应变，并基于横向各向同性假设开展分析。此外，采用实验与数值模拟相结合的方法，系统研究了基于结构电解质的碳纤维电极层状材料的多功能性能[107]。

为全面理解复合结构与电池相应力学和电化学性能之间的关系，各种表征技术可以为电化学-力学性能的耦合效应提供有效手段，鉴于 MSBs 被设计为同时存储电能和承受机械载荷，在外部机械载荷下评估其电化学性能也至关重要。目前已开发出如微滴脱粘测试、单纤维拔出、推出和纤维碎裂等测试方法，来

表征纤维/树脂基体的黏附性，在更大尺度上，如短梁剪切等层间测试方法，可表征结构电极/隔膜界面的机械强度。原位测试技术在揭示MSBs电化学-机械耦合机制方面发挥着不可替代的作用，目前已开发出多种先进的原位表征方案，例如，结合数字图像相关法与同步辐射XRD，能够在施加拉伸或弯曲载荷的同时，精确量化碳纤维电极的应变分布与晶体结构演变[108]；通过搭建可同时进行力学加载与电化学测试的原位测试平台，可实现在控制应变条件下监测界面阻抗的实时变化，揭示机械应力对界面演化规律的影响。这些测试数据为建立准确的电化学-机械耦合模型提供了关键验证依据，并为优化材料体系与结构设计提供直接指导。

评估MSBs不能仅看其独立的电化学容量或力学强度，必须采用综合指标衡量其多功能性。O'Brien等[109]在提出了以“多功能效率(η_{mf})”作为量化多功能性能的评价指标，只有MSBs复合材料比性能（单位质量或体积的性能）相对于传统“分立系统”（即独立的电池＋独立的结构件）的比性能之和应大于1，才意味着实现了系统减重，即应满足式(1)：

$$\eta_{mf}=\frac{\bar{E}_{mf}}{\bar{E}}+\frac{\bar{\Gamma}_{mf}}{\bar{\Gamma}}>1 \tag{1}$$

式中：$\bar{E}_{mf}$和$\bar{E}$分别是多功能系统和传统系统的比结构性能，$\bar{\Gamma}_{mf}$和$\bar{\Gamma}$分别是多功能系统和传统系统的比电化学性能。

为更全面的评估需考虑多种性能（如剪切模量、强度、功率密度）和实际工况，Snyder等[110]进一步提出采用最小化原则来更好地评估器件的多功能效率，即在计算器件比结构性能和比电化学性能时，应以其中的最小值来进行综合效率计算。此外，Johannisson等[111]提出了一种用于评估多功能系统优势的“剩余比性能”方法，可以更加清晰地揭示在提供同等结构性能的前提下，多功能系统用于储能的“剩余”部分是否比独立的储能器件更高效。

现有评估方法仍存在局限，还不能全面反映多功能材料带来的系统效益，下一步研究应发展面向特定应用场景（如无人机、汽车、船舶等）的多功能设计方法，综合考量性能目标、集成策略与利弊，从而评估其实际优势。

5 应用场景

MSBs的最终价值体现在具体的工程应用中，不同应用场景对储能与结构功能的性能需求侧重点各异，因此，在选择MSBs的技术体系与集成方式，需进行系统性的权衡分析。针对几类典型应用场景，探讨其适配的技术路径。

（1）航空航天领域

卫星、临近空间飞行器等领域对减重的效益最为敏感，但同时对比刚度、比强度、极端环境耐受性及绝对可靠性的要求也最高。采用SBC作为卫星壁板、机翼蒙皮等承力结构是唯一可行的技术方向，其发展必须优先保障材料的模量、强度与空间环境稳定性，为此可能在能量密度上做出妥协。固体电解质（包括高性能聚合物与复合电解质）因其无泄漏风险与宽温域潜力，在此类应用中不可或缺，未来需深入研究在长期机械载荷与空间环境耦合下的电化学-力学性能演化与失效机制。

（2）电动垂直起降飞行器与高性能无人机

此类应用对质量能量密度和体积能量密度的要求极为苛刻，直接决定了航时与有效载荷，同时须具备高功率输出能力以满足起飞、爬升阶段的需求，并保证在复杂机械振动与冲击环境下的高可靠性。SBC体系是首要攻关方向，重点应发展基于高容量正极与改性碳纤维负极的层铺式或全纤维SBC，并解决其快充与热管理问题。嵌入式高性能软包电池与碳纤维复合材料的集成方案，可作为技术验证与早期应用的过渡选择，需重点优化电池排布以最小化对主承力结构强度的削弱。

（3）新能源汽车

电动汽车对MSBs的需求兼顾高能量密度、高安全性、长循环寿命与可控的成本。相较于航空航天与飞行器，其对减重效应的经济性评估更为严格。长期看，本征式体系是实现系统级大幅减重的关键。但近期更可能采用嵌入式方案将标准模组集成于车身非核心承力区域（如车门、行李箱盖板），以平衡性能、安全与成本。

（4）机器人与可穿戴电子领域

在机器人与可穿戴电子领域，MSBs的核心挑战在于适应复杂的异型几何结构并实现共形集成。技术重点从追求极致力学承载转向实现高度的形状适应性、轻量化及生物兼容性，因此纤维状、编织状或可定制薄膜等本征式设计成为理想路径。电解质体系需在保证离子传输的同时，优先满足成型工艺性、界面稳定性与使用安全性，固态或凝胶电解质是研究重点，其发展关键在于攻克与异型基底牢固、可靠集成的先进制造与封装工艺，推动储能结构微型化、分布式与模块化发展。

综上所述，MSBs的研究不仅需要继续突破技术瓶颈，还应注重面向场景的定制化设计与全生命周期

评估，从而加速其从实验室走向实际工程应用。

6　主要挑战

尽管前景广阔，MSBs走向大规模应用仍面临一系列严峻挑战，主要体现在：

（1）关键材料性能平衡

MSBs的发展受限于关键材料体系的内在矛盾，电解质材料面临离子电导率与力学性能的根本性权衡，高离子电导率需要聚合物链段具有高运动自由度，而优异的力学性能则依赖于致密交联网络，二者本质相悖。碳纤维电极同样面临容量与模量的平衡难题，表面改性虽能提升电化学性能，却可能损害其力学强度。此外，除碳纤维外，高强度聚合物纤维、先进陶瓷纤维等其他高性能纤维也被视为有潜力的备选材料，有望拓展电极的材料选择范围。然而，这些材料在MSBs中的实际应用，仍面临电化学兼容性、界面结合强度及多功能协同机制等尚未系统解决的基础科学问题。这些材料层面的根本矛盾构成了性能突破的首要瓶颈。

（2）电化学-机械耦合机制

电化学-机械多场耦合是MSBs特有的核心挑战，荷电状态会改变碳纤维的力学性能，而外部载荷也影响电极电势，离子扩散诱发局部应力，材料中的应力又反过来改变离子扩散特性。在循环过程中，电极体积变化导致界面脱粘，引发应力分布不均和级联裂纹，同时充放电过程中的缺陷增殖与聚集会加速性能衰减，当前研究对界面演化机制及疲劳行为的探索仍显不足。

（3）系统集成与成本控制

MSBs的系统集成面临制造、维护与回收全链条上的严峻挑战。在制造端，储能单元的加工编织、电极-电解质的精密界面控制等工艺复杂且成本高昂。在维护端，电池与机翼、车身等关键结构深度集成，局部故障可能迫使整体更换，推高维修成本。此外，其高度一体化的设计使服役期满后的回收极为困难，多组分材料强耦合导致传统拆解与分选方法失效，亟须发展高效、低成本的专用回收技术并系统评估其全生命周期环境影响。因此，如何在保障性能的前提下，实现从生产、使用到回收的全周期成本可控，是决定该技术能否规模化应用的关键。

（4）标准化评估体系建立

当前缺乏统一的标准化性能表征方法和安全评估体系，不同研究团队的性能测试条件各异，导致结果难以直接比较，针对多功能材料的效率评价指标尚未形成共识，在安全方面，MSBs需要建立比传统电池更严格的标准，涵盖机械-电化学耦合工况下的失效模式分析、失控防护等多重要求，标准化体系的缺失严重阻碍了技术迭代和产业化进程。

7　结束语

MSBs作为一项前沿交叉技术，深度融合材料科学、电化学与机械工程，为实现轻量化、高空间利用率及系统功能集成提供了革命性解决方案。本文系统梳理了其基本概念、技术体系、集成方式、关键材料、创新设计及性能评估方法等方面的研究进展。当前，研究已在碳纤维电极的多功能化改性、具有双连续相或定向孔道结构的高性能电解质开发及基于界面工程增强力电耦合性能等方面取得显著成果。同时，各类新型结构设计与先进制造工艺不断涌现，标志着该领域正从概念验证迈向系统集成与性能优化阶段，充分展现出在电动汽车、航空航天及可穿戴设备等领域的巨大应用潜力。

然而，通往大规模商业化的道路依然充满挑战。未来研究亟须在多个层面取得协同突破：在研究方法论层面，人工智能与机器学习将深刻变革材料与结构的设计范式，通过高通量计算筛选、生成式模型与多目标逆向设计，有望发掘出力-电性能最优协同的新材料体系与多尺度结构构型。在机理认知层面，需发展跨尺度表征技术与多场耦合理论模型的协同研究，解析材料从微观到宏观的演化行为，从而为构建与验证精确的电化学-机械-热耦合模型提供关键实验依据，共同揭示复杂服役环境下的失效机制。在材料层面，必须从根本上解决电解质中离子传导与机械承载、电极中能量存储与结构强化之间的固有矛盾，并积极探索包括新型高比容量、高强度纤维电极与高离子电导率、高模量固态或复合电解质等下一代多功能协同材料体系。在工程应用层面，则需致力于开发低成本、可规模化且与现有复合材料制造工艺兼容的制造技术，并建立起统一、可靠的多功能性能表征与安全评估标准体系。此外，还需前瞻性地布局MSBs的可持续性策略研究，以应对其全生命周期终结时的环境挑战，形成完整的绿色技术闭环。唯有通过跨学科的理论、材料、结构与工艺的深度融合与协同创新，才能最终克服现有瓶颈，真正释放MSBs在构建下一代智能、高效、轻量化集成系统方面的全部潜能。

参考文献

[1]　Dunn J B，Gaines L，Kelly J C，et al. The significance of Li-ion bat-

teries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction[J]. Energy & Environmental Science, 2015,8(1):158-168.
[2] Pacala S, Socolow R. Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies[J]. Science,2004,305(5686):968-972.
[3] Neubauer J, Pesaran A, Bae C, et al. Updating United States Advanced Battery Consortium and Department of Energy battery technology targets for battery electric vehicles[J]. Journal of Power Sources,2014,271:614-621.
[4] Donateo T, De Pascalis C L, Ficarella A. Electric aircraft: exploiting the synergy between powertrain, energy management and structure[J].MATEC Web of Conferences,2018,233:00026.
[5] Li M, Lu J, Chen Z W, et al. 30 years of lithium-ion batteries[J]. Advanced Materials,2018,30(33):1800561.
[6] Turcheniuk K, Bondarev D, Singhal V, et al. Ten years left to redesign lithium-ion batteries[J].Nature,2018,559(7715):467-470.
[7] Jin T W, Ma Y R, Xiong Z C, et al. Bioinspired, tree-root-like interfacial designs for structural batteries with enhanced mechanical properties[J].Advanced Energy Materials,2021,11(25):2100997.
[8] Liu P, Sherman E, Jacobsen A. Design and fabrication of multifunctional structural batteries[J]. Journal of Power Sources, 2009, 189(1):646-650.
[9] Thomas J P, Qidwai M A. Mechanical design and performance of composite multifunctional materials[J]. Acta Materialia, 2004, 52(8):2155-2164.
[10] Ekstedt S, Wysocki M, Asp L E. Structural batteries made from fibre reinforced composites[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2010,39(3/4/5):148-150.
[11] Asp L E, Greenhalgh E S. Structural power composites[J]. Composites Science and Technology,2014,101:41-61.
[12] Wang H M, Diao Y F, Lu Y, et al. Energy storing bricks for stationary PEDOT supercapacitors[J]. Nature Communications, 2020,11:3882.
[13] Carlstedt D, Asp L E. Performance analysis framework for structural battery composites in electric vehicles[J]. Composites Part B:Engineering,2020,186:107822.
[14] Riboldi C E D, Trainelli L, Biondani F. Structural batteries in aviation: a preliminary sizing methodology[J]. Journal of Aerospace Engineering,2020,33(4):04020031.
[15] Huang W L, Wang P Y, Liao X B, et al. Mechanically-robust structural lithium-sulfur battery with high energy density[J]. Energy Storage Materials,2020,33:416-422.
[16] Asp L E, Johansson M, Lindbergh G, et al. Structural battery composites: a review[J]. Functional Composites and Structures, 2019, 1(4):042001.
[17] Wu H Y, Wei L, Li W, et al. Highly conductive carbon/carbon composites as advanced multifunctional anode materials for structural lithium-ion batteries[J]. Advanced Functional Materials, 2024,34(40):2403729.
[18] Danzi F, Camanho P P, Braga M H. An all-solid-state coaxial structural battery using sodium-based electrolyte[J]. Molecules, 2021,26(17):5226.
[19] Pejman R, Gorman J, Najafi A R. Multi-physics design of a new battery packaging for electric vehicles utilizing multifunctional composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 237: 109810.
[20] Liu X, Li H M, Wang J H, et al. Achieving mechanically sturdy properties and high energy density for Zn-ion structural batteries based on carbon-fiber-reinforced composites[J]. Composites Science and Technology,2022,218:109156.
[21] Wang M Q, Vecchio D, Wang C Y, et al. Biomorphic structural batteries for robotics[J].Science Robotics,2020,5(45):eaba1912.
[22] Kalnaus S, Asp L E, Li J L, et al. Multifunctional approaches for safe structural batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102747.
[23] Arief Budiman B, Rahardian S, Saputro A, et al. Structural integrity of lithium-ion pouch battery subjected to three-point bending [J].Engineering Failure Analysis,2022,138:106307.
[24] Attar P, Galos J, Best A S, et al. Compression properties of multifunctional composite structures with embedded lithium-ion polymer batteries[J].Composite Structures,2020,237:111937.
[25] Thomas J P, Pogue W R Ⅲ, Pham G T, et al. Flexure and pressure-loading effects on the performance of structure-battery composite beams[J]. Journal of Composite Materials, 2019, 53(20):2863-2874.
[26] Wang X C, Shang Y X, Lei Z K, et al. Study on bending-after-impact performance of composite sandwich structural batteries[J]. Thin-Walled Structures,2025,213:113240.
[27] Ladpli P, Nardari R, Kopsaftopoulos F, et al. Multifunctional energy storage composite structures with embedded lithium-ion batteries[J].Journal of Power Sources,2019,414:517-529.
[28] Galos J, Best A S, Mouritz A P. Multifunctional sandwich composites containing embedded lithium-ion polymer batteries under bending loads[J].Materials & Design,2020,185:108228.
[29] Pattarakunnan K, Galos J, Das R, et al. Tensile properties of multifunctional composites embedded with lithium-ion polymer batteries[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020,136:105966.
[30] Chung D D L, Wang S K. Carbon fiber polymer-matrix structural composite as a semiconductor and concept of optoelectronic and electronic devices made from it[J]. Smart Materials and Structures,1999,8(1):161-166.
[31] Dong G H, Guo F L, Sun Z, et al. Short carbon fiber reinforced epoxy-ionic liquid electrolyte enabled structural battery via vacuum bagging process[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials,2022,5(3):1799-1811.
[32] Chaudhary R, Xu J, Xia Z Y, et al. Unveiling the multifunctional carbon fiber structural battery[J]. Advanced Materials, 2024, 36(48):2409725.
[33] Imanishi N, Kashiwagi H, Ichikawa T, et al. Charge-discharge characteristics of mesophase-pitch-based carbon fibers for lithium cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993, 140(2): 315-320.
[34] Iijima T, Suzuki K, Matsuda Y. Electrodic characteristics of various carbon materials for lithium rechargeable batteries[J]. Syn-

thetic Metals,1995,73(1):9-20.

[35] Suzuki K,Iijima T,Wakihara M.Electrode characteristics of pitch-based carbon fiber as an anode in lithium rechargeable battery[J]. Electrochimica Acta,1999,44(13):2185-2191.

[36] Snyder J F,Wong E L,Hubbard C W.Evaluation of commercially available carbon fibers,fabrics,and papers for potential use in multifunctional energy storage applications[J].Journal of the Electrochemical Society,2009,156(3):A215.

[37] Tavano R,Xu J,Creighton C,et al.Influence of carbonisation temperatures on multifunctional properties of carbon fibres for structural battery applications[J].Batteries & Supercaps,2024,7(8):e202400110.

[38] Kjell M H,Jacques E,Zenkert D,et al.PAN-based carbon fiber negative electrodes for structural lithium-ion batteries[J].Journal of the Electrochemical Society,2011,158(12):A1455.

[39] Jacques E,Kjell M H,Zenkert D,et al.Impact of electrochemical cycling on the tensile properties of carbon fibres for structural lithium-ion composite batteries[J].Composites Science and Technology,2012,72(7):792-798.

[40] Jacques E,Kjell M H,Zenkert D,et al. The effect of lithium-intercalation on the mechanical properties of carbon fibres[J].Carbon,2014,68:725-733.

[41] Fredi G,Jeschke S,Boulaoued A,et al.Graphitic microstructure and performance of carbon fibre Li-ion structural battery electrodes[J].Multifunctional Materials,2018,1(1):015003.

[42] Sutrisnoh N A A,Lim G J H,Chan K K,et al.From properties to performance:understanding the multifunctional performance of carbon fiber cathodes for structural batteries[J].Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,2025,190:108696.

[43] Fu Y,Zhou H M,Hu Z H,et al.Temperature-induced microstructure optimization of Co_3O_4 for the achievement of a high-areal-capacity carbon cloth-based lithium ion battery anode[J].Composites Communications,2020,22:100446.

[44] Cheng C,Zhou G,Du J,et al. Hierarchical porous Co_3O_4 nanosheet arrays directly grown on carbon cloth by an electrochemical route for high performance Li-ion batteries[J]. New J Chem,2014,38(6):2250-2253.

[45] Han Q G,Li X,Wang F X,et al.Carbon fiber@ pore-ZnO composite as anode materials for structural lithium-ion batteries[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry,2019,833:39-46.

[46] Park H W,Jang M S,Choi J S,et al.Characteristics of woven carbon fabric current collector electrodes for structural battery[J]. Composite Structures,2021,256:112999.

[47] Hagberg J,Maples H A,Alvim K S P,et al.Lithium iron phosphate coated carbon fiber electrodes for structural lithium ion batteries[J]. Composites Science and Technology,2018,162:235-243.

[48] Huang Y,Liu H,Lu Y C,et al.Electrophoretic lithium iron phosphate/reduced graphene oxide composite for lithium ion battery cathode application[J]. Journal of Power Sources,2015,284:236-244.

[49] Sanchez J S,Xu J,Xia Z Y,et al. Electrophoretic coating of $LiFePO_4$/Graphene oxide on carbon fibers as cathode electrodes for structural lithium ion batteries[J]. Composites Science and Technology,2021,208:108768.

[50] Chaudhary R,Chetry A,Xu J,et al.Structural positive electrodes engineered for multifunctionality[J].Advanced Science,2024,11(33):2404012.

[51] Chaudhary R,Afira Sutrisnoh N A,Chan K K,et al.High-energy cathode in carbon fibre structural battery[J].Composites Part B:Engineering,2025,304:112629.

[52] Choi J,Zabihi O,Ahmadi M,et al.Advancing structural batteries:cost-efficient high-performance carbon fiber-coated $LiFePO_4$ cathodes[J].RSC Advances,2023,13(44):30633-30642.

[53] Fu Y,Chen Y F,Yu X Y,et al.Fiber metal laminated structural batteries with multifunctional solid polymer electrolytes[J].Composites Science and Technology,2022,230:109731.

[54] Moyer K,Meng C Z,Marshall B,et al. Carbon fiber reinforced structural lithium-ion battery composite:multifunctional power integration for CubeSats[J]. Energy Storage Materials,2020,24:676-681.

[55] Dong G H,Mao Y Q,Wang D Y,et al.Lithium metal structural battery developed with vacuum bagging[J]. Journal of Materials Chemistry C,2022,10(5):1887-1895.

[56] Chen J Y,Zhou Y,Islam M S,et al.Carbon fiber reinforced Zn-MnO_2 structural composite batteries[J].Composites Science and Technology,2021,209:108787.

[57] Tian L,Ji X L,Zhao L,et al.Improved performance of structural battery composites through carbon fiber electrode/current collector integration[J].Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,2025,198:109065.

[58] Asp L E,Bouton K,Carlstedt D,et al.A structural battery and its multifunctional performance[J].Advanced Energy and Sustainability Research,2021,2(3):2000093.

[59] Liu X,Han Q G,Wang J H,et al. Tree root-inspired structural electrolyte for laminated carbon fiber reinforced composites with high energy density and mechanically-robust properties[J].Chemical Engineering Journal,2022,449:137828.

[60] Wang J K,Wang J R,Wang X Y,et al.Multifunctional analysis of novel aluminum-ion structural battery composites with optimization in cathode material[J]. Composites Communications,2025,56:102410.

[61] Fu Y,Zhou H M,Zhou L M. Phase-microstructure-mechanical properties relationship of carbon fiber reinforced ionic liquid epoxy composites[J]. Composites Science and Technology,2021,207:108711.

[62] Shirshova N,Johansson P,Marczewski M J,et al. Polymerised high internal phase ionic liquid-in-oil emulsions as potential separators for lithium ion batteries[J].Journal of Materials Chemistry A,2013,1(34):9612.

[63] Yu Y L,Zhang B M,Wang Y,et al.Co-continuous structural electrolytes based on ionic liquid,epoxy resin and organoclay:effects of organoclay content [J]. Materials & Design,2016,104:126-133.

[64] Abdou N,Pipertzis A,Chaudhary R,et al.Structural battery electrolytes based on a cross-linked methacrylate polymer and a protic

ionic liquid: is there an optimal composition [J]. Advanced Energy and Sustainability Research, 2025, 6(5): 2570041.

[65] Quan W D, Dent J, Arrighi V, et al. Biphasic epoxy-ionic liquid structural electrolytes: minimising feature size through cure cycle and multifunctional block-copolymer addition [J]. Multifunctional Materials, 2021, 4(3): 035003.

[66] Singavarapu L S, Gilmore P, Yap J W, et al. Room-temperature ionic liquid electrolytes for carbon fiber anodes in structural batteries[J]. Composites Science and Technology, 2025, 259: 110952.

[67] Xu J, Johannisson W, Johansen M, et al. Characterization of the adhesive properties between structural battery electrolytes and carbon fibers [J]. Composites Science and Technology, 2020, 188: 107962.

[68] Asp L E. Multifunctional composite materials for energy storage in structural load paths [J]. Plastics, Rubber and Composites, 2013, 42(4): 144-149.

[69] Shirshova N, Bismarck A, Carreyette S, et al. Structural supercapacitor electrolytes based on bicontinuous ionic liquid-epoxy resin systems [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013, 1(48): 15300.

[70] Ihrner N, Johannisson W, Sieland F, et al. Structural lithium ion battery electrolytesviareaction induced phase-separation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(48): 25652-25659.

[71] Schneider L M, Ihrner N, Zenkert D, et al. Bicontinuous electrolytes *via* thermally initiated polymerization for structural lithium ion batteries [J]. ACS Applied Energy Materials, 2019, 2(6): 4362-4369.

[72] Qi G C, Cui Q, Zhang B M, et al. A carbon fiber lamina electrode based on macroporous epoxy with vertical ion channels for structural battery composites [J]. Composite Structures, 2023, 304: 116425.

[73] Fu Y, Chen Y F, Zhou H M, et al. LiDFOB-based multifunctional electrolyte-enabled high cycling stability and rate capability of solid-state batteries for composite structural batteries[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2025, 188: 108589.

[74] Ye J R, Chen J Y, Xie W H, et al. Magnetic field orientated ionic transport pathway in epoxy solid electrolyte [J]. Composites Science and Technology, 2025, 269: 111229.

[75] Vogt D, Michalowski P, Kwade A. Production and characterisation of fibre-reinforced all-solid-state electrodes and separator for the application in structural batteries[J]. Batteries, 2022, 8(6): 55.

[76] Snyder J F, Carter R H, Wetzel E D. Electrochemical and mechanical behavior in mechanically robust solid polymer electrolytes for use in multifunctional structural batteries [J]. Chemistry of Materials, 2007, 19(15): 3793-3801.

[77] An H W, Li M L, Liu Q S, et al. Strong Lewis-acid coordinated PEO electrolyte achieves 4.8 V-class all-solid-state batteries over 580 Wh kg-1[J]. Nature Communications, 2024, 15: 9150.

[78] Andrews W T, Liebig A, Cook J, et al. Development of a PEO-based lithium ion conductive epoxy resin polymer electrolyte [J]. Solid State Ionics, 2018, 326: 150-158.

[79] Feng Q H, Yang J P, Yu Y L, et al. The ionic conductivity, mechanical performance and morphology of two-phase structural electrolytes based on polyethylene glycol, epoxy resin and nano-silica[J]. Materials Science and Engineering: B, 2017, 219: 37-44.

[80] Dong G H, Mao Y Q, Yang G M, et al. High-strength poly(ethylene oxide) composite electrolyte reinforced with glass fiber and ceramic electrolyte simultaneously for structural energy storage [J]. ACS Applied Energy Materials, 2021, 4(4): 4038-4049.

[81] Niazi M, Paiva D, Danzi F, et al. Multifunctional structural electrolyte with glass fiber-reinforced polyvinyl alcohol/epoxy matrix with optimized lithium salt and nanofiller [J]. Advanced Energy and Sustainability Research, 2026, 7(2): e202500222.

[82] Choi J, Zabihi O, Varley R, et al. Multiple hydrogen bond channel structural electrolyte for an enhanced carbon fiber composite battery[J]. ACS Applied Energy Materials, 2022, 5(2): 2054-2066.

[83] He W Y, Liu Z D, Zhang H Q, et al. "Gel-in-resin" multifunctional electrolytes for enhanced electrochemical and mechanical performance in lithium-ion structural battery composites [J]. Advanced Functional Materials, 2026, 36(5): e07493.

[84] Singer G, Hsieh C T, Jin T W, et al. A quasi-solid polymer electrolyte-based structural battery with high mechanical and electrochemical performance[J]. EcoMat, 2023, 5(12): e12418.

[85] He X W, Zhu Z W, Wen G J, et al. Design of high-entropy tape electrolytes for compression-free solid-state batteries [J]. Advanced Materials, 2024, 36(16): 2307599.

[86] Yu B Y, Wang Z B, Sun J, et al. Energy storaging multifunctional carbon fiber composites based on nano-SiO_2 reinforced epoxy matrix structural electrolytes [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025, 142(5): e56428.

[87] Li Q Q, Zhang Z J, Li Y, et al. Rapid self-healing gel electrolyte based on deep eutectic solvents for solid-state lithium batteries[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(44): 49700-49708.

[88] 刘梓洋, 李杨, 刘兴江, 等. 自修复聚合物在电化学储能领域的研究进展[J]. 材料工程, 2021, 49(1): 1-10.
Liu Z Y, Li Y, Liu X J, et al. Research progress of self-repairing polymers in electrochemical energy storage devices [J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(1): 1-10.

[89] Sahraei E, Hill R, Wierzbicki T. Calibration and finite element simulation of pouch lithium-ion batteries for mechanical integrity [J]. Journal of Power Sources, 2012, 201: 307-321.

[90] He Y X, Zhang J C, Zhang Y Q, et al. Porous structural battery composite for coordinated integration of mechanical and electrical functionalities[J]. Polymer Composites, 2025, 46(2): 1604-1616.

[91] Cha J H, Lee J D, Kim T H, et al. Effect of interlayer stitching in thermoplastic composite-packaged structural battery on electrochemical performance under mechanical loads [J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 303: 112583.

[92] Park G, Kim C G, Kwon H, et al. Tailored stitching and vertical stacking for high-voltage multifunctional structural batteries with enhanced electrochemical-mechanical coupling [J]. Advanced Science, 2026, 13(2): e14967.

[93] Xu J, Geng Z Y, Johansen M, et al. A multicell structural battery composite laminate[J]. EcoMat, 2022, 4(3): e12180.

[94] Siraj M S, Tasneem S, Carlstedt D, et al. Advancing structural battery composites: robust manufacturing for enhanced and consistent multifunctional performance[J]. Advanced Energy and Sustainability Research, 2023, 4(11): 2300109.

[95] Pyo J, Park H W, Jang M S, et al. Tubular laminated composite structural battery[J]. Composites Science and Technology, 2021, 208: 108646.

[96] Thakur A, Dong X Y. Additive manufacturing of 3D structural battery composites with coextrusion deposition of continuous carbon fibers[J]. Manufacturing Letters, 2020, 26: 42-47.

[97] Thakur A, Dong X Y. Printing with 3D continuous carbon fiber multifunctional composites *via* UV-assisted coextrusion deposition[J]. Manufacturing Letters, 2020, 24: 1-5.

[98] Gao Y, Hu H, Chang J, et al. Realizing high-energy and stable wire-type batteries with flexible lithium-metal composite yarns [J]. Advanced Energy Materials, 2021, 11(40): 2101809.

[99] Makimura Y, Okuda C, Munekata T, et al. Three-dimensional electrode characteristics and size/shape flexibility of coaxial-fibers bundled batteries[J]. Energy & Environmental Science, 2024, 17(8): 2864-2878.

[100] Tu V, Larsson F, Runesson K, et al. Deformation-dependent effective mobility in structural battery electrolytes[J]. International Journal of Solids and Structures, 2025, 315: 113342.

[101] Yin S, Hong Z G, Hu Z H, et al. Fabrication and multiphysics modeling of modified carbon fiber as structural anodes for lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2020, 476: 228532.

[102] Rollin D, Larsson F, Runesson K, et al. Electro-chemo-mechanical modeling of structural battery electrode materials[J]. Pamm, 2023, 23(4): e202300137.

[103] Zhang W N, Ma D Y, Manes A. A numerical approach to damage modelling for mechanical assessment of structural batteries [J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 174: 109535.

[104] Johannisson W, Zenkert D, Lindbergh G. Model of a structural battery and its potential for system level mass savings[J]. Multifunctional Materials, 2019, 2(3): 035002.

[105] Carlstedt D, Asp L E. Thermal and diffusion induced stresses in a structural battery under galvanostatic cycling[J]. Composites Science and Technology, 2019, 179: 69-78.

[106] Carlstedt D, Runesson K, Larsson F, et al. On the coupled thermo-electro-chemo-mechanical performance of structural batteries with emphasis on thermal effects[J]. European Journal of Mechanics- A, 2022, 94: 104586.

[107] Carlstedt D, Rittweger F, Runesson K, et al. Experimental and computational characterization of carbon fibre based structural battery electrode laminae[J]. Composites Science and Technology, 2022, 220: 109283.

[108] Barthelay T, Gray R, Richards H, et al. Comparative analysis of cathode morphologies in structural batteries using X-ray absorption near edge spectroscopy (XANES) and electrochemical methods[J]. Journal of Power Sources, 2025, 630: 236050.

[109] O'Brien D J, Baechle D M, Wetzel E D. Design and performance of multifunctional structural composite capacitors[J]. Journal of Composite Materials, 2011, 45(26): 2797-2809.

[110] Snyder J F, Gienger E B, Wetzel E D. Performance metrics for structural composites with electrochemical multifunctionality[J]. Journal of Composite Materials, 2015, 49(15): 1835-1848.

[111] Johannisson W, Nguyen S, Lindbergh G, et al. A residual performance methodology to evaluate multifunctional systems[J]. Multifunctional Materials, 2020, 3(2): 025002.

基金项目：国家自然科学基金项目(U25B6023)

收稿日期：2025-12-29；**录用日期**：2026-03-03

通讯作者：刘兴江(1965—)，男，研究员，博士，研究方向为电能源，联系地址：天津市西青区海泰华科七路6号中国电子科技集团公司第十八研究所(300384)，E-mail：xjliu1@nklps.org

(本文责编：齐　新)