

碳纤维复合材料结构锂离子电池研究综述

张峻滔 王亚震 李晖 马心旗 宗文波 籍天威 吴海宏

Study review on structure lithium-ion batteries of carbon fiber reinforced composites

ZHANG Juntao, WANG Yazhen, LI Hui, MA Xinqi, ZONG Wenbo, JI Tianqi, WU Haihong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220608.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

结构储电碳纤维复合材料研究进展

Recent progress in carbon fiber reinforced composites for electricity storage

复合材料学报. 2021, 38(1): 16–24 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200921.006>

碳纤维复合材料空间反射镜制造技术研究进展

Research progress on fabrication technology of space mirror using carbon fiber composite

复合材料学报. 2017, 34(1): 1–11 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160328.012>

$\text{SnO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 复合材料应用于碳纳米管集流体对锂离子电池性能的影响

Effect of $\text{SnO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ composites on performance of carbon nanotubes current collectors for lithium-ion batteries

复合材料学报. 2019, 36(7): 1753–1760 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180927.001>

竹基碳纤维/ MoS_2 锂离子电池负极材料

Bamboo-based carbon fibers/ MoS_2 composite as an anode material for lithium ion batteries

复合材料学报. 2021, 38(11): 3578–3585 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210129.003>

石墨烯及其衍生物掺配水泥基材料研究进展

Research progress of cement-based materials blended with graphene and its derivatives

复合材料学报. 2021, 38(2): 339–360 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200902.001>

Ti基MXene及其复合材料在金属离子电池中的进展

Research progress of Ti-based MXene and its composites in metal-ion batteries

复合材料学报. 2020, 37(12): 2984–3003 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200717.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220608.001

碳纤维复合材料结构锂离子电池研究综述



分享本文

张峻滔¹, 王亚震¹, 李晖^{*2}, 马心旗¹, 宗文波¹, 籍天威¹, 吴海宏^{*1}

(1. 河南工业大学 碳纤维复合材料国际合作实验室, 郑州 450001; 2. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819)

摘 要: 碳纤维复合材料结构锂离子电池是将结构件和储能系统相结合, 在保持碳纤维力学性能的同时, 赋予其优异的储能性能, 使动力电池组在减重的同时简化结构设计, 提高能量效率和结构效率。在低碳经济的大环境下, 碳纤维复合材料结构锂离子电池作为一种新型储能器件引起了国内外学者的极大关注。本文综述了嵌入集成式结构电池和多功能复合材料结构电池的工作原理、制备工艺及储能性能等基础问题的研究现状, 提出了全碳纤维固态结构电池的概念及其设计原型。同时简要介绍了现阶段碳纤维复合材料结构锂离子电池最具代表性的应用, 并展望了其在航空航天和交通运输等领域的应用价值。

关键词: 碳纤维复合材料; 结构电池; 嵌入集成; 多功能复合材料; 研究进展

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)03-1263-11

Study review on structure lithium-ion batteries of carbon fiber reinforced composites

ZHANG Juntao¹, WANG Yazhen¹, LI Hui^{*2}, MA Xinqi¹, ZONG Wenbo¹, JI Tianqi¹, WU Haihong^{*1}

(1. Carbon fiber Composites International Joint Research Lab in Henan, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Carbon fiber structure lithium-ion batteries (CFSLB) are combination of structural parts and energy storage system. CFSLB have excellent energy storage properties while maintaining the mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer. Structural batteries can improve the energy efficiency and structural efficiency of the power battery pack while reducing weight and simplifying structure. Structure batteries, as a new energy storage device, have attracted great attention of home and aboard scholars in the requirement of low-carbon emission. This article reviews the research status and fundamental problems included working principle, preparing process and storing energy properties of embedded structure batteries and multifunctional composite structure batteries. The concept and design prototype on All-carbon solidity structure batteries are suggested. The representative applications of structure batteries are introduced. The future applications in aerospace, transportation and other industrial fields are discussed.

Keywords: carbon fiber reinforced polymer; structural batteries; embedded integration; multifunctional composites; research progress

锂离子电池具有较高的能量密度和功率密度、工作电压高、循环寿命长、能快速充放电等优点^[1-5], 广泛应用于航空航天、电动汽车、便携电子设备等领域^[6-8]。然而, 传统的锂离子电池组存在体积庞大、笨重、有热失控爆炸的风险等问题, 在全

球低碳经济的环境趋势下, 需要一种更加高效、轻质、安全、绿色环保的电池。碳纤维复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)结构锂离子电池 (Structural battery, SB) 是将结构件和储能系统相结合, 在保持了碳纤维出色的力学性能的

收稿日期: 2022-04-19; 修回日期: 2022-05-22; 录用日期: 2022-05-31; 网络首发时间: 2022-06-09 13:11:04
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220608.001>
基金项目: 国家自然科学基金委-河南省联合基金重点项目 (U1604253); 国家重点研发计划 (2016 YFB0101602) National Natural Science Foundation of China-Henan Province Joint Fund Key Project (U1604253); Supported by the National Key Research and Development Program of China (2016 YFB0101602)
通信作者: 李晖, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为多功能碳纤维复合材料的研究 E-mail: lihui@mail.neu.edu.cn; 吴海宏, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为碳纤维复合材料结构-功能一体化 E-mail: hwhu@haut.edu.cn
引用格式: 张峻滔, 王亚震, 李晖, 等. 碳纤维复合材料结构锂离子电池研究综述 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1263-1273. ZHANG Juntao, WANG Yazhen, LI Hui, et al. Study review on structure lithium-ion batteries of carbon fiber reinforced composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1263-1273(in Chinese).

同时，赋予其优异的储能性能，使动力电池组在减重的同时简化结构设计，提高能量效率和结构效率^[9-11]。从新能源汽车到小型无人机，从人造卫星到电动飞机^[12-15]，碳纤维复合材料结构锂离子电池能在结构中分布储能，在避免热失控的同时提高安全性能。

事实上，早在 20 多年前一些学者就提出了 SB 的基本概念^[16-18]，但受限于 CF 性能及实验条件，SB 的研究进展比较缓慢。随着 CF 性能的不不断提升，利用 T800 CF 作为电极制备 SB 的研究引起了国内外学者的广泛关注，相关的基础研究也得到了快速发展^[19-29]。本文主要总结了近几年碳纤维复合材料结构锂离子电池的研究进展，综述了嵌入集成式 (Embedded integrated structural batteries, EISB) 和多功能复合材料 (Multifunctional composite structure batteries, MCSB) 两类 SB 的研究现状，例举了现阶段 SB 的代表性应用，分析了其存在的问题，在此基础上提出了全碳纤维固态结构电池的概念及其设计原型。

1 碳纤维复合材料结构锂离子电池

碳纤维复合材料结构锂离子电池的应用意义在于能同时实现结构效率 (Ω_S) 和能量效率 (Ω_E) 的最大化^[13]。本文定义碳纤维复合材料结构锂离子电池正常工作条件下的许用应变与构成该系统本身的复合材料应变的比值为其 Ω_S ；其能量密度与常规锂离子电池能量密度的比值为其 Ω_E 。其设计目标是在一定空间域内使 $\Omega_S=\Omega_E=1$ ，如图 1 所示。

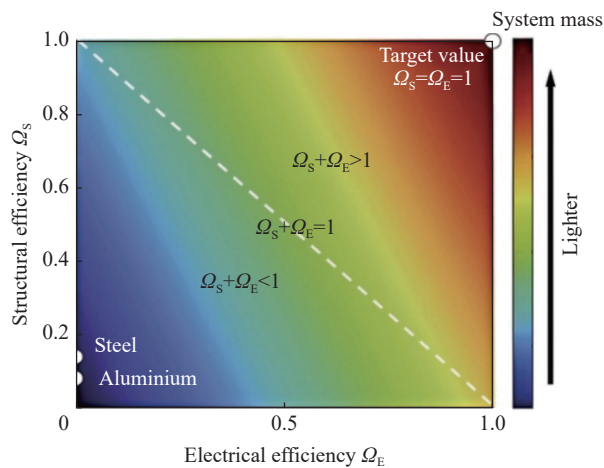


图 1 结构效率和能量效率概念图

Fig. 1 Conceptual diagram of structural efficiency and energy efficiency

1.1 嵌入集成式结构电池

嵌入集成式结构电池由结构组件与动力电池

组件两部分构成，其本质是在 CFRP 的结构设计域内寻找电池的最优分布方式，从而实现 CFRP 的结构-功能一体化^[30-34]。典型的代表是以 CFRP 蒙皮为结构组件，电池位于芯部构成三明治结构动力组件^[35-39]。与传统的电池箱结构相比，EISB 的优点在于：(1) 结构-功能一体化设计免去了箱体等结构部分的冗余提高了空间利用率；(2) 分布式布置电池有助于解决热失控带来的安全问题；(3) 在电池性能相同的条件下，结构系统的能量密度大幅度提高。

早期 EISB 储能器件被提出时，许多学者没有明确该器件的研究价值。因此，为了探究 EISB 带来的增益效果，Thomas 等^[40]以微型飞行器为研究对象，探究了 EISB 对飞行器续航时间的影响，如图 2 所示。将能量密度为 161 W·h/kg 的电池集成到了机翼部分，将其与使用能量密度为 185 W·h/kg 的常规动力电池组的微型飞行器对比。采用 EISB 飞行器的 Ω_S 约为 0.6； Ω_E 约为 0.5；续航时间提升了约 10%。经计算分析，当 SB 的能量密度与常规动力电池组能量密度相同时， Ω_S 约为 0.7； Ω_E 约为 0.8；续航时间可增加 26%。由此证实了 EISB 的应用可以提高 Ω_S 和 Ω_E 实现双优设计，该研究结果为后期对 EISB 研究工作的开展奠定了基础。

EISB 主要可分为 3 种结构形式，分别是层压板结构形式、格栅结构形式、三明治结构形式。为了探究三者的力学性能，Thomas 等^[41]以碳纤维为蒙皮，电池为芯部一体成型制成了层压板结构形式，如图 3(a) 所示；在第一种的基础上在蒙皮和电池中间引入加强肋制成格栅结构形式，如图 3(b) 所示；把电池集成在夹心泡沫复合材料芯部的泡沫中制成三明治结构形式，如图 3(c) 所示。通过静水压力负载测试探究了 EISB 在实际应用时外部的负载对其内部电芯性能的影响。其研究表明，在弹性范围内，力学性能和充放电性能之间的影响很小，变化范围仅在 1% 以下；当静水压力达到 2 MPa(相当于水深 200 m) 时，电池的容量仅下降 6%~8%。如图 4 所示，由此证实，EISB 具有出色的力学性能，且在较大压力下仍能保持较高的电容量。

针对格栅结构形式的 EISB，Ladpli 等^[42]做了结构优化设计。将聚烯烃隔膜的镍钴锰酸锂电池封装在碳纤维复合材料层压板中，并引入聚合物

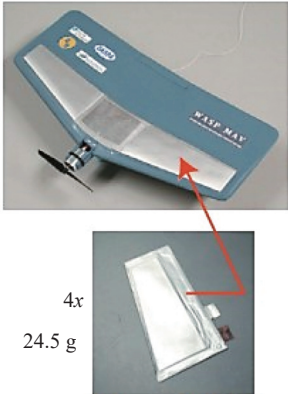
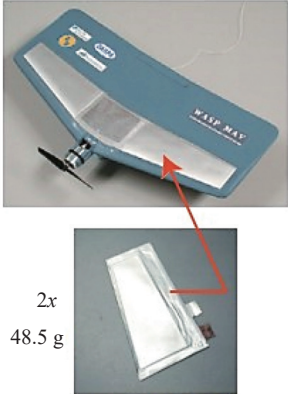
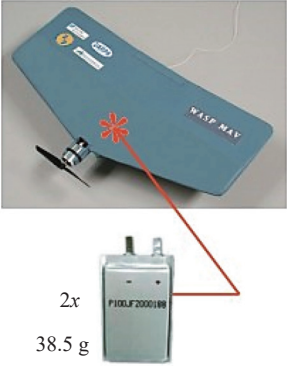
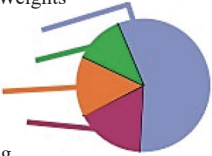
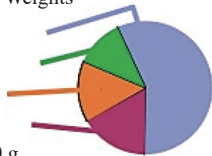
Multifunctional designs		Conventional designs
PLI wasp (Flown)	PLI wasp (Notional)	Kokam wasp (Notional)
 4x 24.5 g 3-layer PLI cell	 2x 48.5 g 6-layer PLI cell	 2x 38.5 g Kokam cell
107 min endurance electrical	126 min endurance electrical	115 min endurance electrical
*Cruise power: 6.5 W *SB Sp. energy: 136 W·h/kg *SB Sp. power: 68 W·h/kg Weights *SB: 98 g *Structure: 20 g *Motor: 25 g *Avionics: 28 g *Total mass: 171 g 	*Cruise power: 6.5 W *SB Sp. energy: 161 W·h/kg *SB Sp. power: 67 W·h/kg Weights *SB: 97 g *Structure: 20 g *Motor: 25 g *Avionics: 28 g *Total mass: 170 g 	*Cruise power: 6.5 W *SB Sp. energy: 185 W·h/kg *SB Sp. power: 86 W·h/kg Weights *SB: 44 g *Structure: 10 g *Motor: 25 g *Avionics: 28 g *Total mass: 170 g 
PLI—Plastic-lithium-ion		

图 2 嵌入集成式结构电池 (EISB) 的应用为无人机续航带来的增益效果^[40]

Fig. 2 Embedded integrated structural batteries (EISB) provides a gain effect for the endurance of the drone^[40]

铆钉结构固定电池层，在温度 100℃ 压强 0.5 MPa 下热压成型，其结构如图 5 所示。铆钉互锁结构抑制了电极层之间的相对滑动，对其抗弯刚度的增益有显著提升，在弯曲疲劳测试 1 000 次循环后采用铆钉结构的容量减少了约 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%。经估算，SB 结构 Ω_s 约为 0.8， Ω_E 约为 0.6。

针对三明治结构形式的 EISB，Pattarakunnan 等^[43] 和 Galos 等^[44] 做了结构优化设计。将锂离子电池 (LiPo 电池) 嵌入碳纤维三明治夹芯结构芯部的泡沫中做三点弯曲测试并以 1 C 倍率恒流充电/放电测试，在整个充电/放电过程中聚合物锂离子电池的内阻、容量、充电/放电特性变化范围仅在 5% 左右，如图 6(a) 所示，经估算，该结构的 Ω_s 约为 0.7， Ω_E 约为 0.6。其内部的泡沫芯材容易沿着电池的方向开裂，如图 6(b) 所示。结

果表明，聚合物锂离子电池在不同的负载条件下都具有较高的电性能保持率。相比于传统的锂离子电池，封装聚合物锂离子电池能有效提高 SB 的力学性能。

由上述研究可以看出，EISB 通过引入增强材料^[21]、优化集成材料^[24]、改善制造工艺^[22] 等方式取得了一定进展，但仍存在以下一些值得探讨的问题：(1) 如何设计格栅结构或点阵拓扑结构来提高其结构效率；(2) 如何通过改善电池的力学性能和储能性能提高其能量效率；(3) 如何优化复合材料与电池之间的界面实现从结构到电池元件的连续性，从而获得最大的能量效率。

1.2 多功能复合材料结构电池

MCSB 结构电池的本质是基于锂离子电池的充放电机制，从复合材料结构设计角度出发，通过构成氧化还原反应体系来赋予复合材料储能性能。相比于 EISB，其内部的结构更加均匀连续，

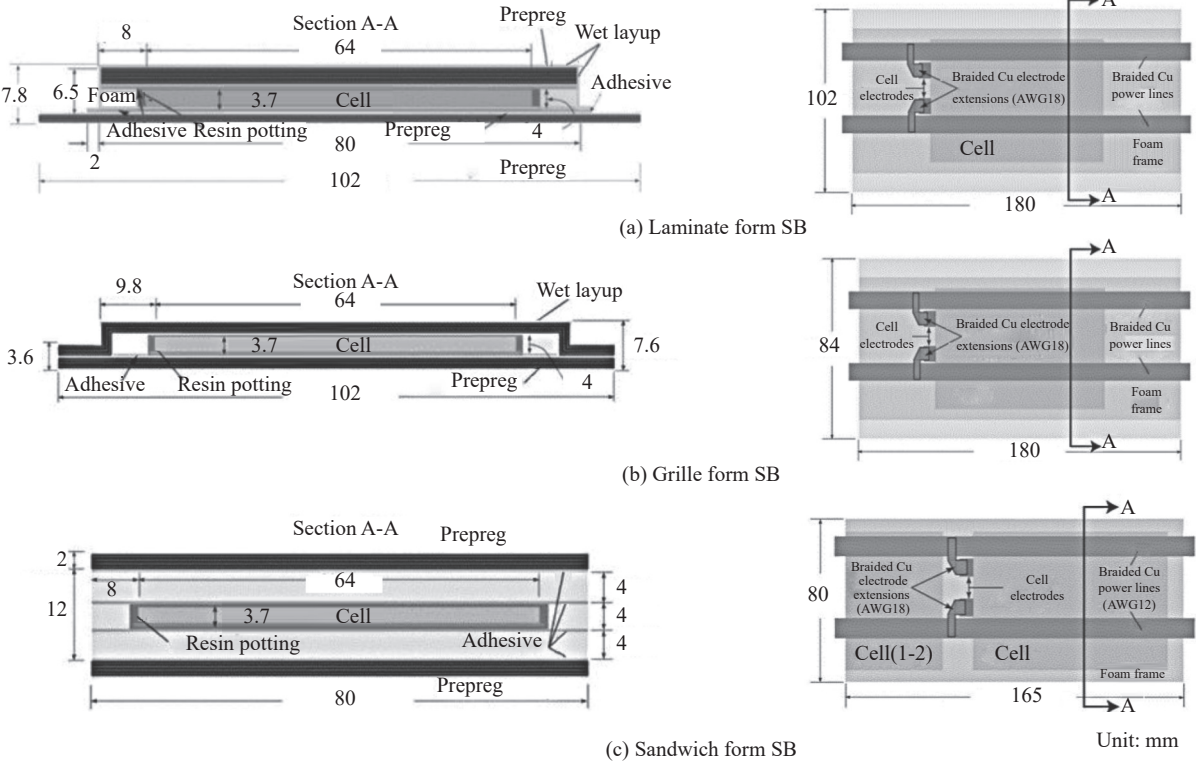


图 3 基于海洋运输工具设计的三种 EISBs^[41]
Fig. 3 Three EISBs based on marine transport designs^[41]

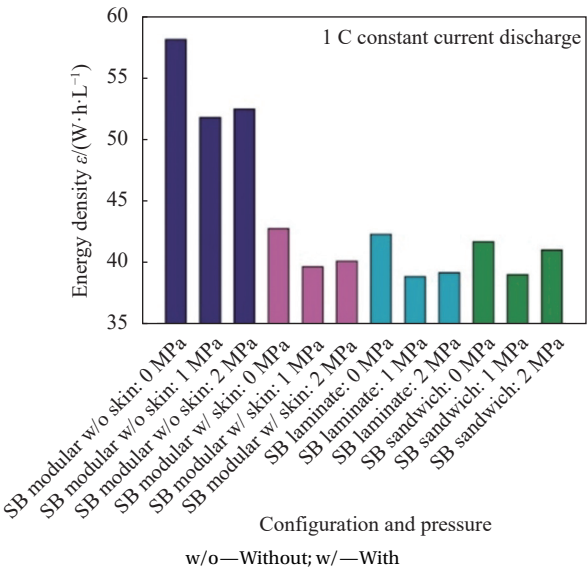


图 4 以 1C 倍率充放电时 SB 外部的静水压力对芯部电池能量密度的影响^[41]
Fig. 4 Effect of hydrostatic pressure outside SB on the energy density of the core battery when charging and discharging at 1C magnification^[41]

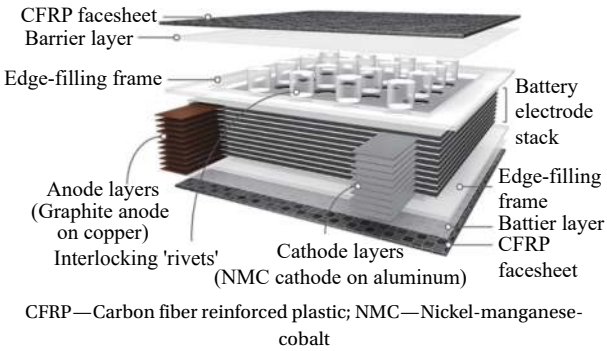


图 5 引入聚合物铆钉结构的 EISB^[42]
Fig. 5 Introduction of EISB with polymer rivet structure^[42]

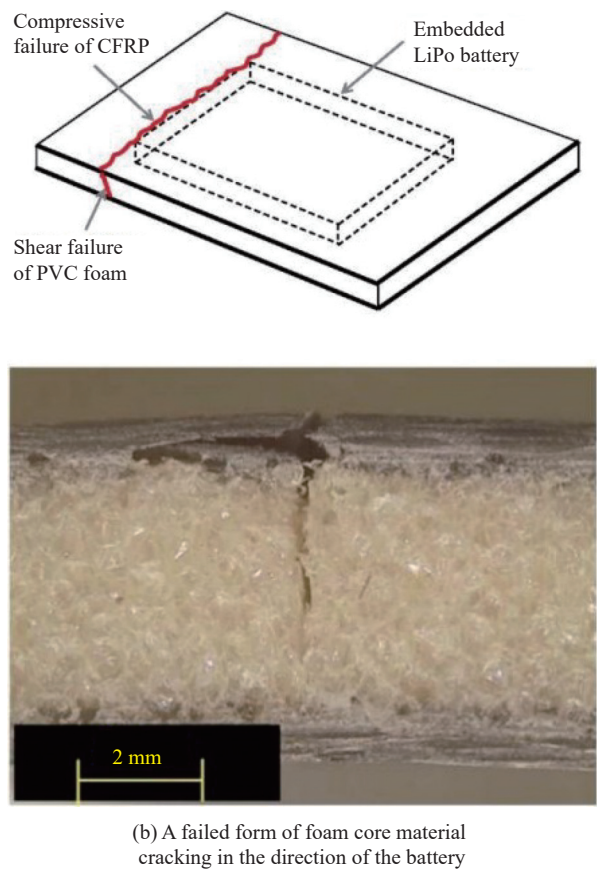
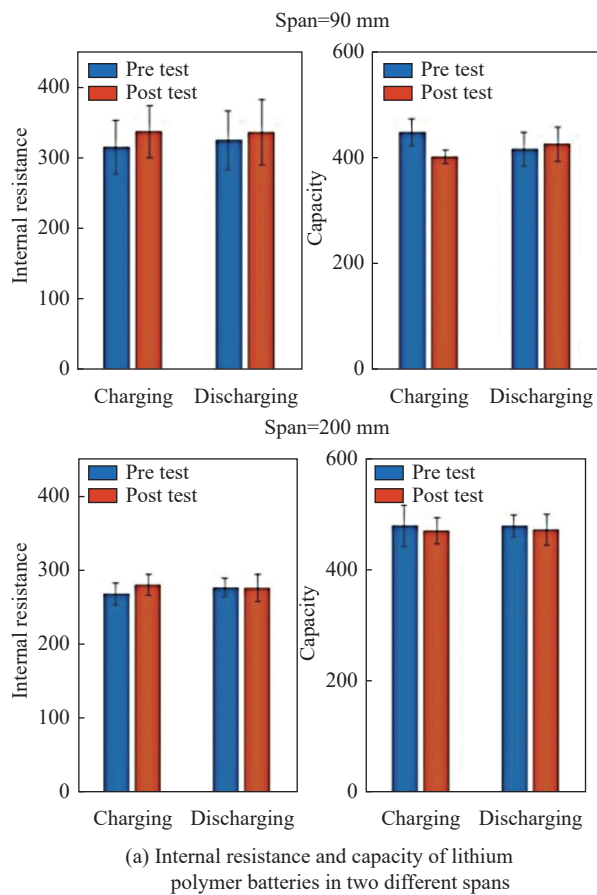
3D 结构^[45]，如图 7(a) 所示。另一种是碳纤维做结构阳极，涂有活性材料的碳纤维织物做结构阴极，采用全固态结构电解质粘结而成的层状结构^[46-47]，如图 7(b) 所示。

在充电的过程中，结构阳极发生氧化反应 Li^+ 离子脱嵌，再通过结构电解质扩散到结构阴极发生还原反应完成嵌锂的过程^[48-49]。MCSB 的性能主要取决于纤维电极和结构电解质。

在纤维负极的研究中，碳纤维的电容量对纤维负极的性能影响至关重要，选用更高电容量的纤维电极也就意味着能实现更高能量密度的 MCSB。

相界面处的结合更加紧密，有利于提高力的传递效率，有望实现更高的 Ω_s 和 Ω_E 。

MCSB 主要有两种设计思路。一种是以单根纤维做电极，聚合物基体作结构电解质构成的



LiPo—Lithium-polymer battery; PVC—Poly vinyl chloride

图6 集成聚合物锂离子电池的SB弯曲测试^[44]

Fig. 6 SB bending test for integrated polymer lithium-ion batteries^[44]

Kjell 等^[50] 实验研究了碳纤维模量对其容量的影响。结果发现在 100 mA/g 的锂化速率下, 经过 10 个循环后未上浆的中模量碳纤维 IMS65(290 GPa) 的容量高达 177 mA·h/g, 而高模量碳纤维 UTS50(480 GPa) 容量低于 30 mA·h/g, 具有相似模量的碳纤维具有相似的电化学性能, 且中模量碳纤维 (270~315 GPa) 循环后的容量最高。Fredri 等^[51] 探究了其本质原因, 模量高, 锂离子嵌入机制更加接近于结晶石墨, 容易造成湍流紊乱现象, 导致容量降低; 模量低, 锂离子插入机制更接近于无定形碳的插入机制, 容量较高。基于该研究结果, 可以通过改性碳纤维的微观结构获得更高电性能的纤维电极。除了碳纤维的微观结构外, 锂化速率对容量的影响也较为明显, 对比 IMS65 碳纤维在 18 mA/g、35 mA/g、88 mA/g、177 mA/g 不同锂化速率下的容量 (对应充电速率为 0.1 C、0.2 C、0.5 C 和 1.0 C), 如图 8 所示, 可以发现降低锂化速率可以提高电池的可逆容量。

Hagberg 等^[52] 和 Leijonmarck 等^[53] 采用了电泳

显示 (EPD) 技术将活性物质沉积在碳纤维丝束上, 研究发现采用 EPD 技术的涂层与纤维结合较致密, 制成复合材料薄板的力学性能较好弯曲强度达到 2.4 GPa。与锂组装成半电池做电化学表征, 在 0.1 C 倍率下充放电测试电池的电容容量可达 260 mA·h/g; 库伦效率高达 99.8%。

Moyer 等^[47] 把掺有碳纳米管和导电添加剂的磷酸铁锂、石墨涂覆在碳纤维编织材料上制备电池的正极和负极, 用浸润过液态电解质的隔膜隔开夹入碳纤维层压板中固化, 如图 9 所示。制成的 MCSB 内部结构更加连续, 提高了力的传递效率。经估算, 该结构的 Ω_s 约为 0.9, Ω_E 约为 0.25。多功能复合材料薄板的能量密度达到 35 W·h/kg, 拉伸强度达到 213 MPa。该实验结果表明, 用该方法制成的 MCSB 力学性能较好但能量密度较差, 其原因可能是树脂在浸润固化的过程中影响了液态电解质的离子传递效率造成能量密度的显著下降。

在结构电解质的研究中, 由于现阶段常用的液态电解质不具备结构承载的性能, Wan 等^[54] 提

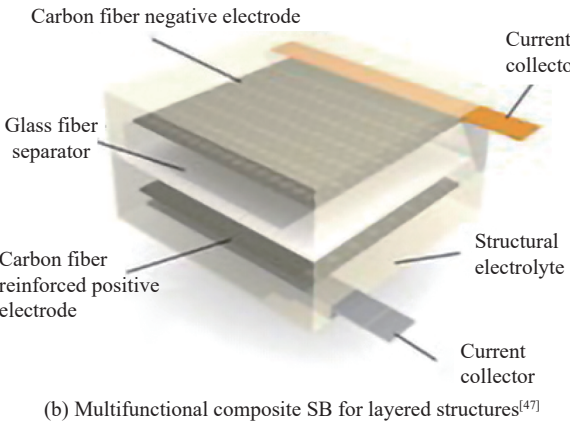
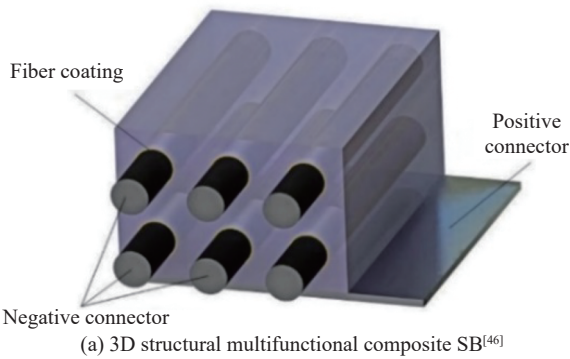


图 7 MCSB 的两种形式
Fig. 7 Two forms of MCSB

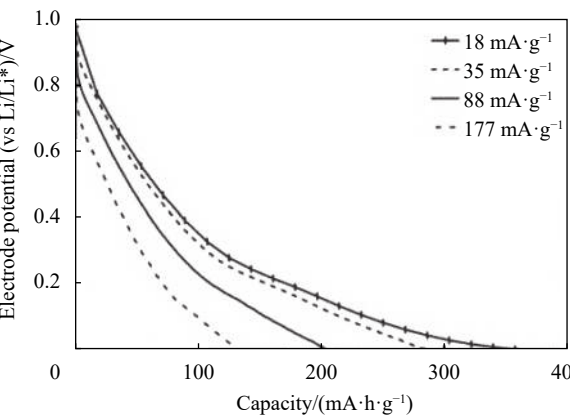


图 8 IMS65 碳纤维在不同速率下的锂化曲线[50]
Fig. 8 Lithification curves of IMS65 carbon fiber at different rates[50]

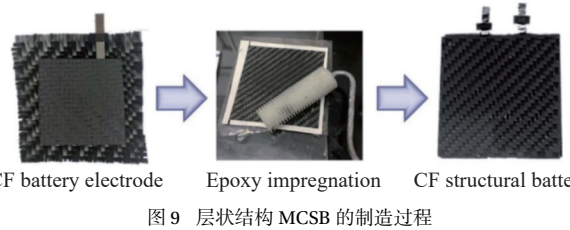


Fig. 9 Manufacturing process of MCSB with layered structure

出了具有较高离子电导率，且良好承载能力的固态电解质制备方法。在厚度为 8.6 μm 具有垂向纳

米通道的聚酰亚胺 (PI) 薄膜中填充了聚环氧乙烷/双三氟甲基磺酰亚胺锂 (PEO/LiTFSI)，制成的固态电解质离子电导率达到 $2.3\times10^{-4}\text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，满足了常规锂离子电池的应用要求；将 PI/PEO/LiTFSI 固体电解质制成全固态锂离子电池在 60℃、0.5 C 倍率下的循环寿命超过 200 次；在 0.1 C 倍率下电池容量高达 176 mA·h/g；固体电解质的拉伸强度达到 850 MPa，相较于常规的 PEO/LiTFSI 电解质薄膜的拉伸强度 (0.1 MPa) 高出 5 个数量级。该固态电解质的应用可大幅度提高 MCSB 的力学性能。

现阶段 MCSB 的研究仍有较长的路要走，纤维电极的电容量和固体电解质的离子传输效率、结构承载能力都无法满足使用需求。在纤维电极的研究中多采用增大其比表面积来提高电容量的方法，但应合理把握以下影响因素：(1) 纤维丝束尽可能小；(2) 纤维宽展的尽可能薄；(3) 合适的纤维表面形貌。在固体电解质的研究中要合理控制其孔隙率的大小在保证离子传输效率的同时提高力学性能。此外，制备过程也存在一些问题，例如封装形式多采用铝塑膜等材料封装制成软包电池，而铝塑膜不能与碳纤维外壳紧密结合，导致受力时无法均匀分散载荷；内部多采用液态电解质不能起到结构承载的作用 [55-59]。

因而结合上述研究过程中总结的问题，为了制成具有较高电性能和较好力学性能的 MCSB，应保证纤维电极具有较高的比表面积容纳更多的活性物质，电解质最佳的形式是固态多孔结构能提供可移动的离子，同时控制多孔结构的孔隙率可使其实现隔膜功能。外层封装材料也要使用碳纤维材料保证材料的一致性，提高力的传递效率。如图 10 所示，实现载荷由外壳到碳纤维结构电极再到固态电解质的连续传递，从而提高 MCSB 的能量效率和结构效率。

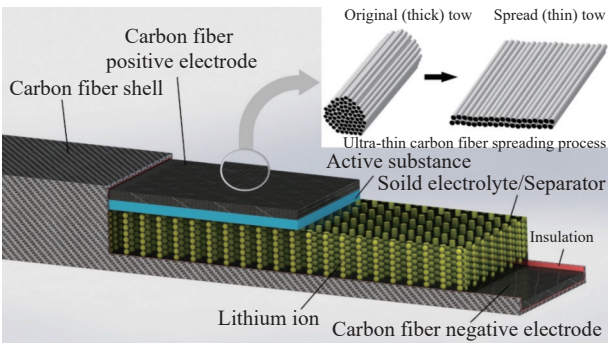


图 10 全碳纤维固态 SB 模型
Fig. 10 All-carbon solid structure batteries model

2 结构电池的应用

2014 年欧盟启动了“清洁天空”计划第二阶段 (CleanSky2, CS2)^[60-67]。该项目开发了复合材料作为电动飞机的机身结构并储存电能，实现轻量化，为结构-功能一体化机身提供了新的设计方案^[68]。把 SB 应用到空客 A380 飞机的客舱舱门框的 C-形梁 (尺寸为 400 mm×230 mm×140 mm，4.2 kg) 结构上，构成 EISB。经估算，该设计的 Ω_s 约为 0.7， Ω_E 约为 0.4，实现了 $\Omega_s+\Omega_E>1$ 。该结构可在紧急情况下以 130 W 功率提供 800~900 N·m 的扭矩打开舱门，如图 11 所示。

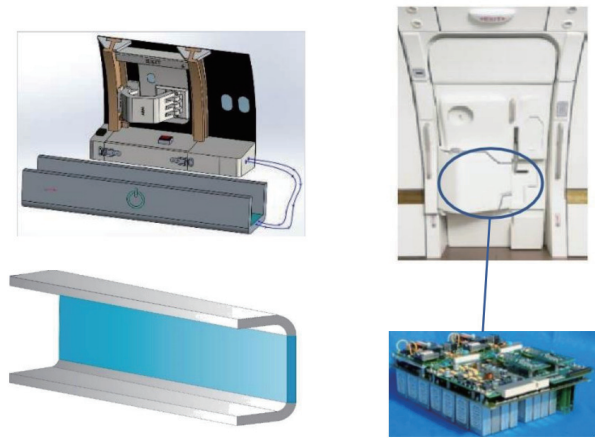


图 11 C 字梁客舱门框模型 (左); 驱动舱门的电子元器件 (右)^[68]
Fig. 11 Model of C-beam cabin door frame (left); The electronic components that drive the hatch (right)^[68]

Nguyen 等^[69] 基于空客 A220-100 型号飞机进行了相关研究。将飞机客舱的地板结构替换为结构储能器件 (EISB)，减重 324 kg， Ω_s 提高到了 0.9， Ω_E 提高到了 0.8，每年可节省约 10 万美元的成本，减少 343 吨 CO₂ 排放，减少 1.4 吨氮氧化物排放。

碳纤维复合材料结构锂离子电池的应用也可减轻新能源汽车的车身质量，提高车辆的整体性能。欧洲发起的 STORAGE 项目以沃尔沃车型为对象用 EISB 制作了电动行李箱盖板^[70]。经估算 Ω_s 约为 0.8， Ω_E 约为 0.6，实现了行李箱减重 60%，如图 12 所示。

Johannisson 等^[46] 进行了相关验证性实验。用质量为 9.6 kg 的 SB 取代质量 18.7 kg 的钢结构车顶加质量 6.3 kg 的锂离子电池组，测试结果表明 SB 的力学性能与原始钢结构相同，储能性能与锂离子电池组相同，减重 62%。经估算，SB 结构 Ω_s 约为 0.6， Ω_E 约为 0.9。Carlstedt 等^[71] 基于特斯拉 Model S 和 BMW i3 两款新能源车型，使用 SB 替

换了车辆的部分结构，如图 13 所示，经估算 Ω_s 约为 0.9， Ω_E 约为 0.7，可使续航里程提高约 70%。



图 12 STORAGE 项目针对沃尔沃车型研发的电动行李箱盖板^[70]
Fig. 12 STORAGE project developed an electric luggage cover for Volvo models^[70]

Tesla model S		Rated range (NEDC): 500 km (85 kW·h)	BMW i3		Rated range (NEDC): 300 km (33 kW·h)
Component	Mass/kg		Component	Mass/kg	
Battery	540		Battery	230	
Al space frame	365		Life module	140	
Drivetrain	465		Drivetrain	480	
Electrical	100		Electrical	80	
Interior	300		Interior	188	
Exterior	90		Exterior	57	
Miscellaneous	180		Miscellaneous	140	
Total	2 040		Total	1 300	

NEDC—New european drive cycle
图 13 Tesla Model S 和 BMW i3 新能源汽车重量分解 (以粗体字表示采用 SB 替代的部分)^[71]
Fig. 13 Tesla Model S and BMW i3 new energy vehicle weight decomposition (Components highlighted with bold text corresponds to parts that potentially can be replaced with SB)^[71]

3 总结

综上所述，碳纤维复合材料结构锂离子电池作为一种新型的储能器件，实现了碳纤维复合材料的结构-功能一体化，能有效地简化结构，提高能量效率和结构效率。结构电池 (SB) 致力于航空航天、交通运输、便携电子设备等领域，旨在实现产品的轻质、高效、环保、安全等目标。现阶段，碳纤维复合材料结构锂离子电池在能量密度、制造工艺、结构设计等方面有了很大进展，但仍然存在一些问题亟待解决。

对于 EISB 目前研究工作的中心是在通过结构设计实现电池的最优排布方式达到结构效率 (Ω_s) 和能量效率 (Ω_E) 的最大化。有以下问题：(1) 面对内部电芯与外部封装结构的不连续结构限制其力学性能。解决路径：通过设计格栅或点阵拓扑结构对界面处做增强结构设计。(2) 在复合材料固

化成型的过程中对电池性能的影响较大。解决路径：改善成型工艺引入能低温固化的环氧树脂避免温度对电芯的影响。

对于 MCSB 目前研究工作的中心是通过对材料的合理选择、优化制备工艺和改良内部结构实现 Ω_s 和 Ω_E 的最大化。有以下问题：(1) 纤维电极的电性能较差。解决路径：通过对纤维改性的方式提高电容量或增大编织结构的比表面积提高活性物质的附着量；(2) 固态电解质离子传输效率差。解决路径：设计多孔结构的固态电解质，通过孔道结构提高离子传输效率；(3) 封装材料和封装工艺仍有较大缺陷。解决路径：根据全碳纤维 SB 的概念模型设计结构、改善封装工艺。

随着锂离子电池的不断发展，电池-电池包 (CTP)、电池-底盘 (CTC) 等技术不断涌现，也促使碳纤维复合材料结构锂离子电池与锂离子电池技术结合，实现多技术融合、多技术发展。相信随着研究工作的不断推进，未来碳纤维复合材料结构锂离子电池会在各领域得到更多的发展和应用。

参考文献：

- [1] 曹金亮, 陈修强, 张春光, 等. 锂电池最新研究进展[J]. *电源技术*, 2013, 37(8): 1460-1463.
CAO Jinliang, CHEN Xiuqiang, ZHANG Chunguang, et al. Latest research progress of lithium batteries[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2013, 37(8): 1460-1463(in Chinese).
- [2] 张文泉, 左杏薇, 曲丽君, 等. 基于导电纤维的柔性电子器件研究进展[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(2): 688-709.
ZHANG Wenxiao, ZUO Xingwei, QU Lijun, et al. Research progress of flexible electronic devices based on conductive fibers [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(2): 688-709(in Chinese).
- [3] YU Y, ZHANG B, FENG M, et al. Multifunctional structural lithium ion batteries based on carbon fiber reinforced plastic composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 147: 62-70.
- [4] REDDY M V, MAUGER A, JULIEN C M, et al. Brief history of early lithium-battery development[J]. *Materials*, 2020, 13(8): 1884.
- [5] PERVEZ S A, CAMBAZ M A, THANGADURAI V, et al. Interface in solid-state lithium battery: Challenges, progress, and outlook[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(25): 22029-22050.
- [6] HU Y S. Batteries: Getting solid[J]. *Nature Energy*, 2016, 1(4): 1-2.
- [7] 曹连胜, 赵超, 金欣, 等. 基于离子选择性迁移策略的动力/储能电池隔膜的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(7): 2025-2037.
CAO Liansheng, ZHAO Chao, JIN Xin, et al. Research progress of power/energy storage battery separator based on selective ion migration strategy[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(7): 2025-2037(in Chinese).
- [8] 张红涛, 胡昊, 顾波, 等. 聚偏氟乙烯-沸石复合锂电隔膜的制备及性能[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(3): 625-631.
ZHANG Hongtao, HU Hao, GU Bo, et al. Preparation and performances of PVDF-zeolite composite separator for lithium-ion batteries[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(3): 625-631(in Chinese).
- [9] FERREIRA A D B L, NÓVOA P R O, MARQUES A T. Multifunctional material systems: A state-of-the-art review[J]. *Composite Structures*, 2016, 151: 3-35.
- [10] DANZI F, SALGADO R M, OLIVEIRA J E, et al. Structural batteries: A review[J]. *Molecules*, 2021, 26(8): 2203.
- [11] YANG H. A review of structural batteries implementations and applications[C]//2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). Chicago: IEEE, 2020: 223-228.
- [12] ASP L E, GREENHALGH E S. Structural power composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 101: 41-61.
- [13] ASP L E. Multifunctional composite materials for energy storage in structural load paths[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2013, 42(4): 144-149.
- [14] ROBERTS S C, AGLIETTI G S. Structural performance of a multifunctional spacecraft structure based on plastic lithium-ion batteries[J]. *Acta Astronautica*, 2010, 67(3-4): 424-439.
- [15] EKSTEDT S, WYSOCKI M, ASP L E. Structural batteries made from fibre reinforced composites[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2010, 39(3-5): 148-150.
- [16] CHUNG D D L, WANG S. 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.
- [17] LUO X, CHUNG D D L. Carbon-fiber/polymer-matrix composites as capacitors[J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(6): 885-888.
- [18] WETZEL E D, O'BRIEN D J, SNYDER J F, et al. Multifunctional structural power and energy composites for US army applications[R]. Army Research Lab Aberdeen Proving Ground Md Weapons and Materials Research Directorate,

- 2006.
- [19] 王朝阳, 杨向涛, 徐祥博, 等. 结构储能碳纤维复合材料设计及其在无人机上的应用[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(18): 84-90, 101.
- WANG Chaoyang, YANG Xiangtao, XU Xiangbo, et al. Structural energy storage carbon fiber composite design and application in drone[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(18): 84-90, 101(in Chinese).
- [20] 杨向涛, 王朝阳, 张金纳, 等. 超薄碳纤维复合材料结构电池制备及其性能评价[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(7): 39-47.
- YANG Xiangtao, WANG Chaoyang, ZHANG Jinna, et al. Preparation and performance evaluation of ultra-thin carbon fiber composite structure battery[J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(7): 39-47(in Chinese).
- [21] 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.
- [22] GALOS J, FREDRIKSSON C, DAS R. Multifunctional sandwich panel design with lithium-ion polymer batteries[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2021, 23(8): 3794-3813.
- [23] QU S, DAI Y, ZHANG D, et al. Carbon nanotube film based multifunctional composite materials: An overview[J]. *Functional Composites and Structures*, 2020, 2(2): 022002.
- [24] 丁颖慧, 祁国成, 张博明. 结构储电碳纤维复合材料研究进展[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(1): 16-24.
- DING Yinghui, QI Guocheng, ZHANG Boming. Recent progress in carbon fiber reinforced composites for electricity storage[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(1): 16-24(in Chinese).
- [25] POPE M A, AKSAY I A. Structural design of cathodes for Li-S batteries[J]. *Advanced Energy Materials*, 2015, 5(16): 1500124.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] SAKAI M. A reaction model for Li deposition at the positive electrode of the braga-goodenough Li-S battery[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2020, 167(16): 160540.
- [29] TU V, ASP L E, SHIRSHOVA N, et al. Performance of bicontinuous structural electrolytes[J]. *Multifunctional Materials*, 2020, 3(2): 025001.
- [30] QIN F, PENG H X. Ferromagnetic microwires enabled multifunctional composite materials[J]. *Progress in Materials Science*, 2013, 58(2): 183-259.
- [31] ROBERTS S C, AGLIETTI G S. Multifunctional power structures for spacecraft applications[C]//57th International Astronautical Congress. Valencia, 2006.
- [32] PEREIRA T, GUO Z, NIEH S, et al. Embedding thin-film lithium energy cells in structural composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(7-8): 1935-1941.
- [33] HAHN H T. Energy storage structural composites: A review[J]. *Journal of Composite Materials*, 2009, 43(5): 549.
- [34] ASTM. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials: ASTM D790-07[S]. West Conshohocken: ASTM, 2007.
- [35] ASTM. Standard test method for compressive residual strength properties of damaged polymer matrix composite plates: ASTM D7137/D7137 M[S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2007.
- [36] ASTM. Standard test method for shear strength of plastics by punch tool: ASTM D732-10[S]. West Conshohocken: ASTM, 2010.
- [37] SHUART M J. Failure of compression-loaded multidirectional composite laminates[J]. *AIJA Journal*, 1989, 27(9): 1274-1279.
- [38] THOMAS J P, QIDWAI M A. Mechanical design and performance of composite multifunctional materials[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(8): 2155-2164.
- [39] GALOS J, KHATIBI A A, MOURITZ A P. Vibration and acoustic properties of composites with embedded lithium-ion polymer batteries[J]. *Composite Structures*, 2019, 220: 677-686.
- [40] THOMAS J P, QIDWAI M A. The design and application of multifunctional structure-battery materials systems[J]. *Journal of Composite Materials*, 2005, 57(3): 2863-2874.
- [41] THOMAS J P, POGUE III W R, 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] CARLSON T. Multifunctional composite materials: Design, manufacture and experimental characterisation[D]. Luleå: Luleå Tekniska Universitet, 2013.
- [46] 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.
- [47] MOYER K, MENG C, 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.
- [48] XU J, VARNA J. Matrix and interface cracking in cross-ply composite structural battery under combined electrochemical and mechanical loading[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 186: 107891.
- [49] 李仲明, 李斌, 冯东, 等. 锂离子电池正极材料研究进展[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(2): 513-527.
- LI Zhongming, LI Bin, FENG Dong, et al. Research progress of cathode materials for lithium-ion battery[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(2): 513-527(in Chinese).
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] LEIJONMARCK S, CARLSON T, LINDBERGH G, et al. Solid polymer electrolyte-coated carbon fibres for structural and novel micro batteries[J]. *Composites Science and Technology*, 2013, 89: 149-157.
- [54] WAN J, XIE J, KONG X, et al. Ultrathin, flexible, solid polymer composite electrolyte enabled with aligned nanoporous host for lithium batteries[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(7): 705-711.
- [55] ZHAO Y, ZHAO D, ZHANG T, et al. Preparation and multifunctional performance of carbon fiber-reinforced plastic composites for laminated structural batteries[J]. *Polymer Composites*, 2020, 41(8): 3023-3033.
- [56] TORQUATO S, HYUN S, DONEVA. Optimal design of manufacturable three-dimensional composites with multifunctional characteristics[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(9): 5748-5755.
- [57] GIENGER E B, NGUYEN P A T, CHIN W, et al. Microstructure and multifunctional properties of liquid+polymer bicomponent structural electrolytes: Epoxy gels and porous monoliths[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(42): 20-29.
- [58] RHAZAOUI K, CAI Q, ADJIMAN C S, et al. Towards the 3D modeling of the effective conductivity of solid oxide fuel cell electrodes: I — Model development[J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 99: 161-170.
- [59] BERINGER I R, WALTER M, SNYDER J F, et al. Multifunctional structural polymer electrolytes via interpenetrating truss structures[J]. *Multifunctional Materials*, 2018, 1(1): 015005.
- [60] 曹邵文, 周国庆, 蔡琦琳, 等. 太阳能电池综述: 材料、政策驱动机制及应用前景[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(5): 1847-1858.
- CAO Shaowen, ZHOU Guoqing, CAI Qilin, et al. A review of solar cells: Materials, policy-driven mechanisms and application prospects[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(5): 1847-1858(in Chinese).
- [61] 陶积柏, 朱大雷, 董丰路, 等. 航天器用支架复合材料轻量化研究[J]. *复合材料学报*, 2016, 33(5): 1020-1025.
- TAO Jibo, ZHU Dalei, DONG Fenglu, et al. Research on lightweight composites of stent for spacecrafts[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(5): 1020-1025(in Chinese).
- [62] ACERO M C, ESCALERA F, ESSA Y. Morphing technology for advanced future commercial aircrafts-Science-Direct[M]//Morphing Wing Technologies. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018: 585-618.
- [63] BRUNET M, AUBRY S, LAFAGE R. The clean sky programme: Environmental benefits at aircraft level[C]//15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Dallas, 2015: 2390.
- [64] AMEDURI S, CONCILIO A, DIMINO I, et al. AIRGREEN2-Clean Sky 2 Programme: Adaptive wing technology maturation, challenges and perspectives[C]//Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems. American Society of Mechanical Engineers. Philadelphia, 2018.
- [65] LERRO A, BATTIPEDE M, GILI P, et al. The clean sky 2 midas project-an innovative modular, digital and integrated air data system for fly-by-wire applications[C]//2019 IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace

(MetroAeroSpace). Rome: IEEE, 2019: 714-719.

[66] LAFAGE R, AUBRY S. The Clean Sky technology evaluator: Review and results of the environmental impact assessment at mission level[C]//16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Washington, 2016: 3745.

[67] BLACHA M, FINK A, EGLIN P, et al. Clean Sky 2: Exploring new rotorcraft high speed configurations[C]//43rd European Rotorcraft Forum. Milan, 2017.

[68] GREENHALGH E S, SHAFFER M S P, KUCERNAK A R, et al. Future challenges and industrial adoption strategies for structural supercapacitors[C]//Proceedings of the ICCM22. Melbourne, 2019: 11-16.

[69] NGUYEN S N, MILLEREUX A, POUYAT A, et al. Structural power performance requirements for future aircraft integration[C]//Proceedings of the 22nd International Conference on Composite Materials. Melbourne, 2019: 3902-3913.

[70] GREENHALGH E. Structural power composites for hybrid vehicles (STORAGE)[C]//ECCM15-15th European Conference on Composite Materials. Venice, 2012: 24-28.

[71] CARLSTEDT D, ASP L E. Performance analysis framework for structural battery composites in electric vehicles[J]. [Composites Part B: Engineering](#), 2020, 186: 107822.