

文章编号: 1001-4888(2024)05-0560-11

嵌入式复合材料结构电池的弯曲和压缩性能研究*

尚余祥, 王晓晨, 毛芮, 任智猛, 雷振坤, 白瑞祥

(工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 大连理工大学 工程力学系, 辽宁大连 116024)

摘要: 复合材料结构电池作为一种新型储能方式在航空航天、交通运输等领域具有潜在的应用前景。本文采用真空辅助树脂传递成型工艺将软包电池嵌入到复合材料层压板中, 制备出复合材料结构电池, 根据 ASTM 测试标准开展了弯曲和压缩试验研究。三点弯曲测试表明, 相较于层压板而言, 复合材料结构电池的弯曲强度和杨氏模量分别下降了 57.1% 和 35.2%, 其弯曲破坏造成较大范围内的纤维断裂和分层; 压缩测试表明, 相较于层压板而言, 复合材料结构电池的弯曲强度和杨氏模量分别下降了 37.6% 和 11.0%, 其压缩破坏在电池/复合材料界面产生横向贯穿裂纹。复合材料结构电池在弯曲和压缩破坏后的充电时间都会减少, 但充电容量、放电时间、放电容量未发生明显变化。同软包电池相比, 复合材料结构电池具有稳定的电学性能和可靠的力学性能, 可以出色稳定地发挥结构承载与电能存储的作用。

关键词: 复合材料结构电池; 电学性能; 弯曲性能; 压缩性能

中图分类号: O348.1; O346.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-219

0 引言

为促进绿色能源发展, 将轻质高强度的碳纤维结构与高能量密度锂电池储能系统相结合的复合材料结构电池能显著减轻电动系统的重量, 提高结构的可设计性、功能性以及能量、空间的利用率^[1-4]。有研究表明, 通过引入结构电池减轻新能源汽车的重量后, 其续航里程将增加 70%^[5], 在未来, 复合材料结构电池作为一种新型的储能器件, 在新能源汽车、立方体卫星、无人机、智能建筑等领域具有潜在的研究价值^[6-8]。目前, 复合材料结构中集成储能装置的主流方法是将电池直接嵌入到复合材料中, 形成复合材料结构电池(Composite structural battery)。这种多功能结构将复合材料的力学性能和电池的电化学性能相结合, 不仅能降低目前新能源载具的自重, 还能扩大空间使用率、改善热控制与安全性、增强耐撞性。复合材料结构电池的嵌入式制造方法是新型混合动力、纯电动汽车潜在的能源/结构集成方法。

将电池集成到复合材料中, 形成轻量化的储能结构, 不仅需要评价其力学承载性能和电学储能性能, 而且还需要考察影响其力学性能的因素, 如制造方法、材料类型和结构设计^[9-10]。其中, 电池和复合材料之间的弱界面结合是一个重要因素, 嵌入式复合材料电池的黏合方式不允许在储能电层和周围复合材料之间进行有效的负载转移, 因此会影响储能复合结构的力学性能。THOMAS 等^[10]研究了碳纤维增强环氧层压板和含有嵌入式锂电池的聚合物泡沫芯夹板的电学和力学性能, 发现将电池集成到复合材料中可以增加弯曲刚度并降低破坏应力, 他们把弯曲刚度的增加归因于嵌入电池导致试样厚度的小幅度增加, 把失效应力的降低归因于嵌入电池造成的几何应力集中以及复合材料与电池之间的弱

* 收稿日期: 2023-10-23; 修回日期: 2023-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972106, 12272080)

通信作者: 雷振坤(1973-), 男, 博士, 教授。主要从事实验力学研究。Email: leizk@dlut.edu.cn

界面结合。ATTAR 等^[11]与 SHALOUF 等^[12]的研究表明,将电池嵌入复合材料的芯层内,会显著削弱该复合材料的压缩性能,同时其拉伸性能也呈现出一定程度的降低趋势。PATTARAKUNNAN 等^[13]研究了复合材料结构电池的冲击损伤容限,发现对于嵌入式复合材料结构电池而言,低冲击能量($<4\text{J}$)轻微影响锂离子电池的剩余储能性能,而高冲击能量($>6\text{J}$)会造成结构电池过度塑性变形和挤压,增加电池内部短路风险。

由于新能源汽车部件经常承受静态和动态载荷作用,特别是在高放电率、过热和温度分布不均匀的情况下,长周期或中断的充放电过程不可避免地会导致电力系统的严重性能退化、可靠性降低和早期故障。因此,了解外载荷对复合材料结构电池的结构承载能力、电化学性能的影响对于车辆设计与性能保证至关重要^[9,14]。复合材料结构电池受到弯曲、压缩加载后,不仅会造成结构局部损伤和界面脱黏,还会影响结构的剩余强度。由于受损电池内部锂离子被迫析出、沉积,表现为内部锂枝晶生长,刺破绝缘层会导致正负极接触而引发短路,从而增加热失控的潜在风险,因此受损电池的剩余容量和热失控现象也值得关注。目前热成像检测技术作为一种可应用于现场的快速、非接触无损检测方法,已日益成为复合材料内部结构缺陷和损伤检测的重要手段^[15-18]。基于此,本文进行了碳纤维增强环氧树脂复合材料层压板结构电池的制备与性能研究,采用真空辅助树脂传递成型(VARTM)工艺将软包电池固化到复合材料层压板中,测量了复合材料结构电池的电学特性;并通过三点弯曲测试和压缩测试,分析了复合材料结构电池的承载性能和失效机理,讨论了复合材料结构电池作为承载和储能多功能结构的潜力,所得结果可为优化复合材料结构电池的集成设计制造、界面结合、抗冲击和储能性能提供借鉴。

1 试样制备

采用 VARTM 成型工艺分别制备弯曲、压缩 2 种类型的复合材料层压板试样和复合材料结构电池试样。依据 ASTM D790 标准,本文设计了弯曲试验件,其具体尺寸为 $250\text{mm}\times 50\text{mm}\times 4.5\text{mm}$;并依据 ASTM D137 标准,设计了压缩试验件,其具体尺寸为 $150\text{mm}\times 100\text{mm}\times 4.5\text{mm}$ 。试验使用的软包电池(600mAh)尺寸为 $52\text{mm}\times 34\text{mm}\times 3.5\text{mm}$ 。试样及电池尺寸、嵌入位置如图 1 所示。选用 22 层单向碳纤维布(T700,铺层角度为 $[0/0/0/0/90/0/90/0/90/0/90]_2$),通过 VARTM 成型工艺制备复合材料层压板结构电池,在第 4~19 层碳纤维布上切割出矩形空间来容纳电池,最终制备出的结构电池如图 2 所示。

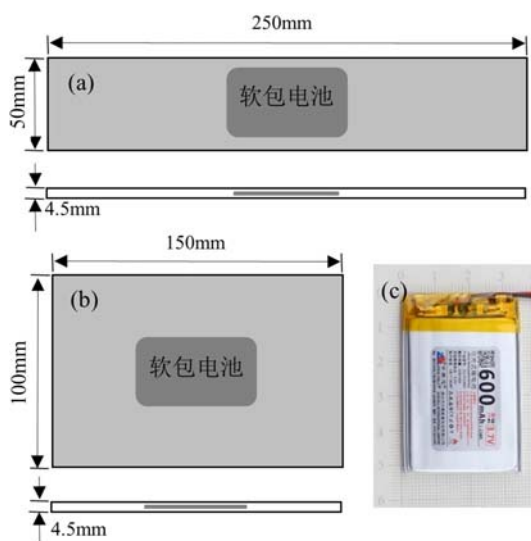


图 1 试样示意图:(a)弯曲试样;(b)压缩试样;(c)软包电池

Fig. 1 Schematic of the specimen: (a) bending specimen; (b) compression specimen; (c) soft packed battery

复合材料结构电池的基本制备流程:在刚性模具上用密封胶带围成工作区域,依次铺放纤维增强预制体、电池、脱模布、导流网,并设置注胶管和抽气管,将柔性真空袋覆盖整个工作区域并配合密封胶带

形成密闭的模腔,利用真空泵抽出纤维增强预制体和真空袋内的空气,并用气压驱动低黏度树脂流动充模、浸渍纤维增强体,最后固化成型。试验所用材料见表1。

表1 主要试验材料及仪器

Tab.1 Materials and devices used in the experiments

名称	规格	生产厂家
单向碳纤维布	T700级 12K200克	中复神鹰碳纤维股份有限公司
环氧树脂+固化剂	改性 E51+改性 D230	昆山易拓复合材料有限公司
商用软包锂电池	303450(600mAh)	深圳市中顺新能电池有限公司
新威电池检测设备	BTS-5V6A	深圳市新威尔电子有限公司
恒温恒湿试验箱	WHKH-150-20-880	东莞市伟煌试验设备有限公司
开普森 K 型热电偶	KPS-ZT-TT-K-30-2000-SMPW-G	兴化市苏玛电器仪表有限公司

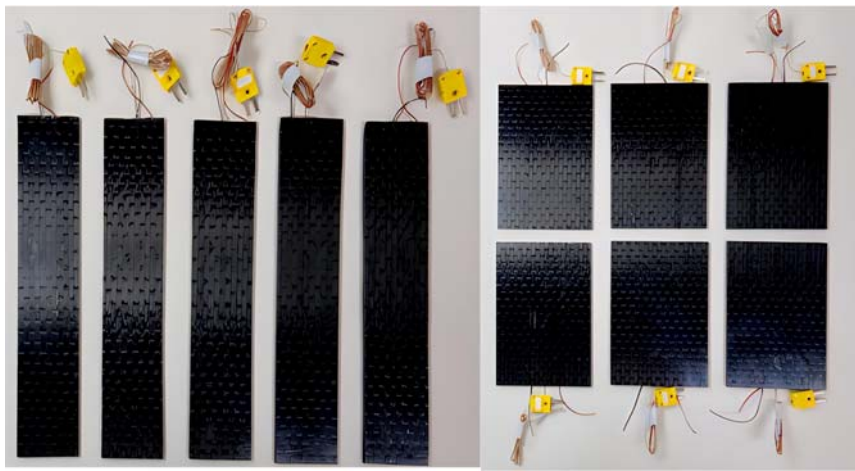


图2 复合材料结构电池试样

Fig.2 Test samples of composite structural battery

2 电学性能测试

2.1 SOC-OCV 曲线

开路电压(Open Circuit Voltage, OCV)是指电池在平衡状态下正负极之间的电位差,它与电池荷电状态(State of Charge, SOC)、温度、电流方向均有关。SOC 被用来反映电池的剩余容量状况,其定义为电池剩余容量占电池容量的比值,即

$$\text{SOC} = 1 - \frac{Q}{C_I} \quad (1)$$

式中:Q为电池释放的电量;C_I为电池以恒定电流 I 放电时所具有的容量。SOC=1 表示电池为充满电状态, SOC=0 则表示电池已处于全放电状态。本文采用小倍率充放电法测量复合材料结构电池的荷电状态-开路电压关系(SOC-OCV 曲线)。

在试验中,将恒温试验箱的环境温度分别设置为 5℃、15℃、25℃、35℃,利用高性能电池检测设备(新威,CT-4008T-5V6A-S1)研究环境温度对 SOC-OCV 曲线的影响。由图3可见,随着 SOC 的升高,OCV 逐渐增大,温度对 SOC-OCV 曲线的影响不明显。根据局部放大图观察可知,温度变化 10℃引起的开路电压波动并不明显。温度越高,电池放电所达到的截止电压越低,从而会导致不同温度下电池的充放电容量不同。

2.2 电池容量

在特定的环境温度、放电倍率与截止电压下,电池所放出的电量被定义为电池容量。本文在不同温

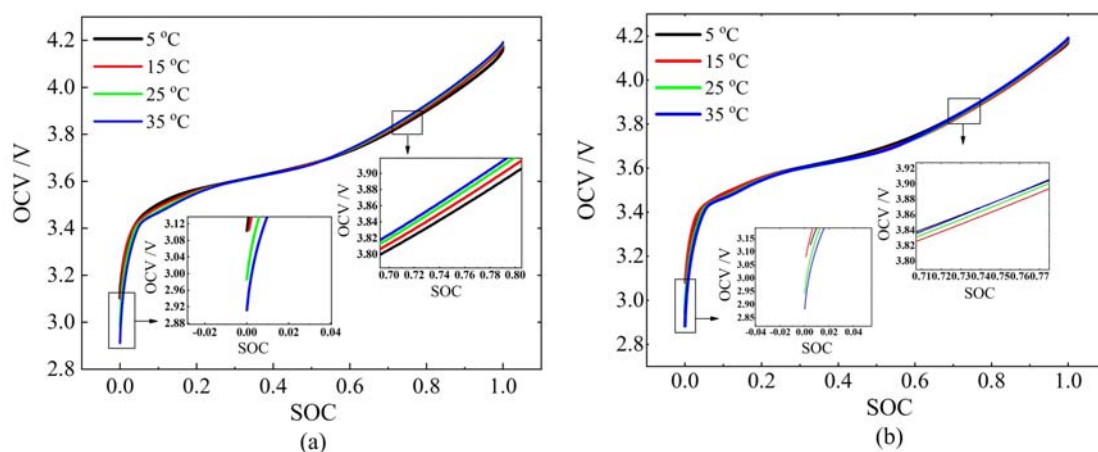


图 3 温度对开路电压的影响：(a)软包电池；(b)复合材料结构电池

Fig. 3 Influence of temperature on open-circuit voltage: (a) soft pack battery; (b) composite structural battery

度和不同充放电倍率情况下，对软包电池和复合材料结构电池的容量特性进行了研究，电池容量的计算公式为

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} I(t) dt \quad (2)$$

式中： Q 为电池充电电量； $t_0 \sim t_1$ 表示放电时间段； I 为放电电流。为研究温度对电池容量的影响，将电池依次在 5°C、15°C、25°C、35°C 温度环境中进行充放电测试。为研究放电倍率对电池容量的影响，在 25°C 的恒温箱内，以 0.2C (C 表示电池的充放电倍率，等于充放电电流与额定容量之比)、0.5C、1.0C、1.5C、2.0C 倍率进行充放电测试。从不同温度下的电池容量 (图 4(a)) 可见，在相同温度下，复合材料结构电池的容量与软包电池基本保持一致，因此可以确定复合材料制备过程中并未对软包电池造成损伤。随着温度的升高，电池容量增加，这主要是因为低温环境中电池内部材料的化学活性降低，使 SEI (Solid Electrolyte Interphase) 膜变厚从而增加了内阻并导致容量损失^[19]。

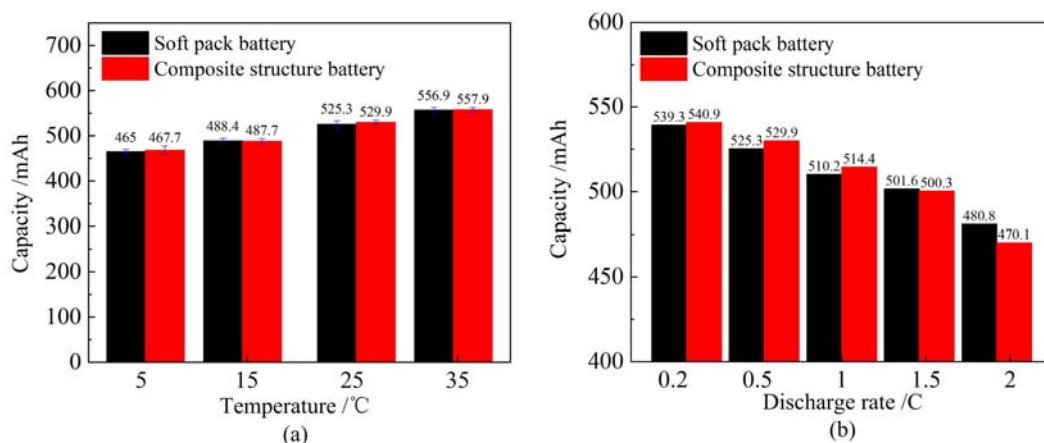


图 4 电池容量对比：(a)不同温度下的电池容量；(b)不同放电倍率下的电池容量
Fig. 4 Battery capacity comparison: (a) battery capacity at different temperatures; (b) battery capacity at various discharge rates

在环境温度为 25°C 时，软包电池和结构电池的容量与放电倍率呈负相关，由图 4(b) 可见，随着放电倍率的增加，电池容量逐渐降低。放电倍率与容量的相关性主要是由浓差极化造成的，当放电电流较大时，锂离子从负极脱嵌并集中在负极附近，与其他区域中的浓度相差较大，造成浓差极化，导致电压下降较快并到达截止电压，此时还有部分电量未释放，所以容量降低。

3 弯曲性能测试

使用万能试验机(Instron3345)开展三点弯曲测试,试验装置如图 5(a)所示,三点弯曲夹具支撑柱和加载柱的半径均为 5mm,支撑跨度为 180mm(跨厚比为 40 : 1)。采用位移加载控制方式,位移加载速率为 1mm/min。在弯曲试验中,采用红外热成像仪(TI-9100)的主动红外模式来采集温度分布,通过卤素灯(FG-1000W)进行 30s 长脉冲热激励加热试件,以 2Hz 的频率采集试样表面温度图像,检测弯曲加载后试样的破坏损伤特征,其中热像仪分辨率为 640pixel × 480pixel,灵敏度小于 40mK。碳纤维复合材料层压板作为对照组进行相同试验。

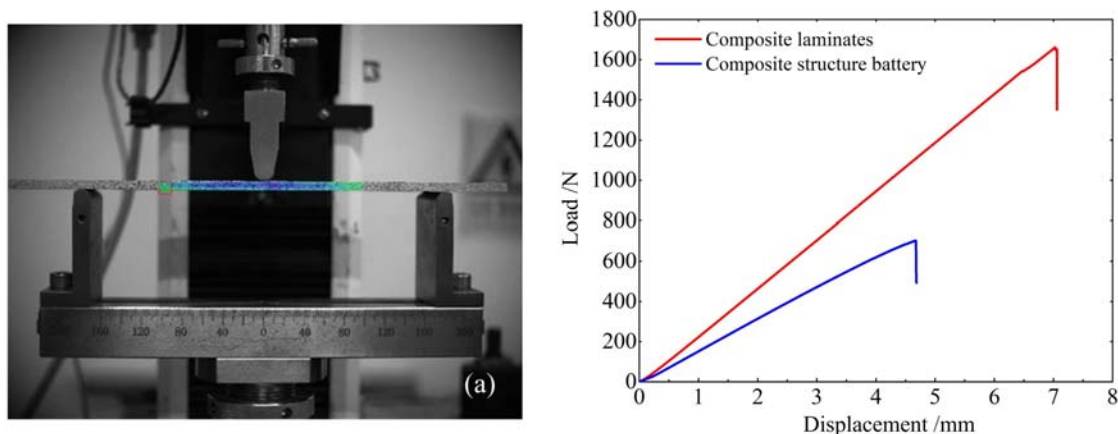


图 5 三点弯曲测试:(a)试验装置;(b)载荷-位移曲线

Fig. 5 The three-point bending test: (a) experimental setup; (b) load-displacement curves

由三点弯曲载荷-位移曲线(图 5(b))可见,复合材料层压板与结构电池承受的平均峰值载荷分别为 1619.6N 和 694.93N,复合材料结构电池弯曲承载能力相较于复合材料层压板下降较为明显。弯曲破坏强度 σ 和弯曲模量 E 可写为

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (3)$$

$$E = \frac{PL^3}{4\delta bh^3} \quad (4)$$

式中: P 为加载外力; δ 为中间跨度的挠度; L 、 b 、 h 分别为跨度、宽度和厚度。

从式(3)、式(4)计算出层压板的破坏强度和弯曲模量为 413.3MPa 和 72.4GPa,复合材料结构电池的破坏强度和弯曲模量为 177.3MPa 和 46.9GPa。与层压板相比,复合材料结构电池的破坏强度和弯曲模量分别下降了 57.1% 和 35.2%。这是因为电池的嵌入造成了纤维不连续,导致嵌入区域界面结合性能较弱,从而使复合材料结构更容易发生破坏。KESHAVARZI 等^[20]的研究表明,软包电池的纵向弯曲模量约为 2.8GPa,横向弯曲模量约为 0.7GPa,由此可见,与软包电池的力学性能相比,嵌入式复合材料结构电池可以提供更好的承载能力,表现出了更好的抗弯性能。

本文使用红外热像仪(TI-9100)对弯曲破坏后的复合材料层压板以及复合材料结构电池试样进行检测。如图 6 所示,复合材料层压板和复合材料结构电池破坏形式均在加载区域附近,与复合材料层压板相比,复合材料结构电池分层扩展区域更大,而且在整个电池嵌入区域均存在损伤。

对于复合材料结构电池试件,在三点弯曲试验过程中同步使用新威电池检测设备实时采集加载过程中电池的开路电压和温度的变化。弯曲过程中载荷、电压、温度随加载时间的变化如图 7 所示,在整个三点弯曲试验过程中电池的电压、温度只在微小范围内波动。由此可知,复合材料结构电池在抵抗弯曲的过程中不会引起内部短路以及热失控,即使在弯曲破坏的瞬间也并未产生温度、电压的大幅度突变。

为了研究弯曲加载不同阶段复合材料结构电池的电性能变化,针对未受载、30%、60%、90%失效载

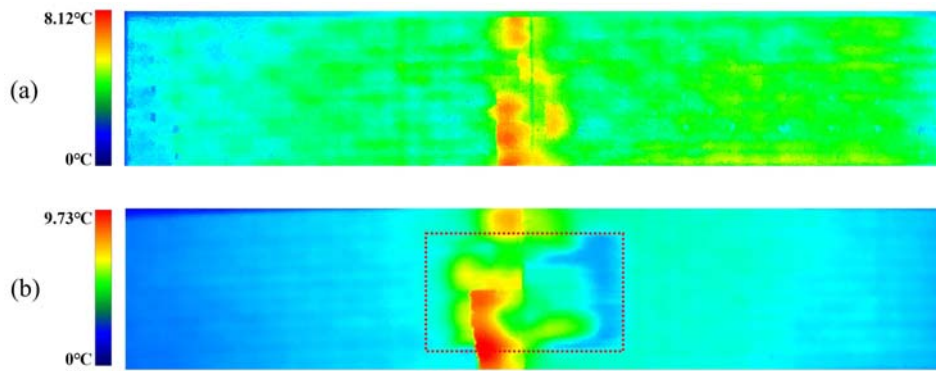


图 6 红外检测图:(a)复合材料层压板;(b)复合材料结构电池

Fig. 6 Infrared detection images:(a) composite laminates; (b) composite structure battery

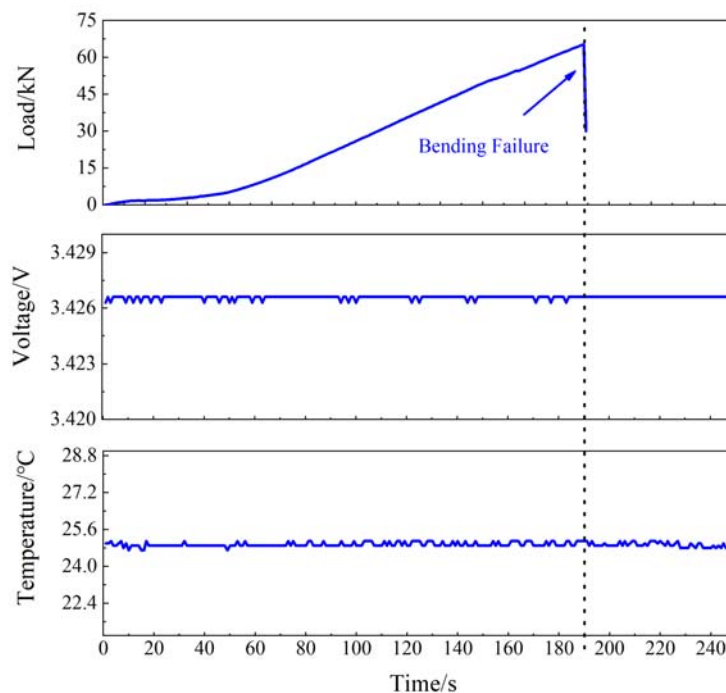


图 7 弯曲加载过程中载荷、电压、温度随时间的变化曲线

Fig. 7 Curve of load, voltage and temperature with time during bending loading

荷和失效后 5 个阶段,依次进行循环充放电测试。循环充放电测试曲线如图 8 所示。

由图 8(a)可见,在弯曲过程中,5 个阶段下的充电曲线变化趋势一致,但充电时间、容量有所变化,特别是加载失效后的充电时间比加载前的充电时间减少了 10.1%,而充电容量增加了 3.48%。由图 8(b)可见,在弯曲过程中,5 个阶段下的放电曲线变化趋势也一致,但放电时间、容量有所变化,放电时间比加载前增加了 2.18%,放电容量增加了 2.24%。复合材料结构电池在弯曲载荷作用下,电学性能得到了提升,从而缩短了充电时间,增加了放电时间,同时增加了充放电容量,其原因是适当的机械压力可以减弱充放电过程中的活性物质分层和形变,使电池具有更高的容量保持性,有利于电池的长期性能^[21]。当复合材料结构电池发生弯曲破坏失去承载能力后,其内部的电池仍保持完好的储能能力。

4 压缩性能测试

按 ASTM D7137 标准进行单向轴压测试来评估复合材料结构电池的压缩性能,压缩夹具如图 9(a)所示。试件底部固定,两侧通过夹具导向装置进行简支约束,以避免试件的平面外屈曲,并确保在考核区域内发生材料失效。压缩试验加载装置如图 9(b)所示,万能试验机(WD-P6105)以 0.5

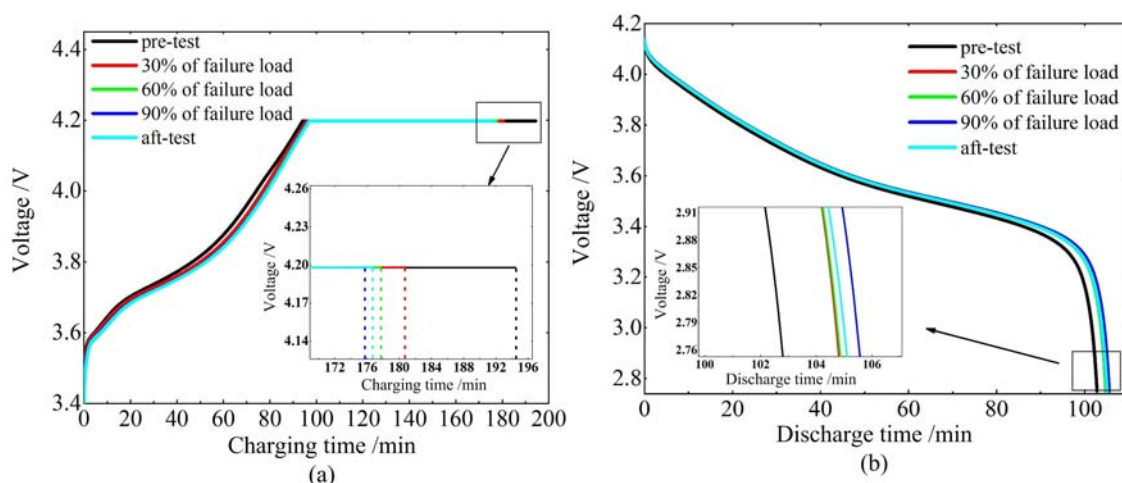


图8 不同弯曲阶段的充放电曲线:(a)充电曲线;(b)放电曲线

Fig. 8 Charging and discharging curves at different bending stages: (a) charging curve; (b) discharging curve
mm/min的压缩速率加载直至试样失效,采用力传感器和位移传感器分别记录加载过程中的载荷和位移数据。采用数字图像相关技术(PMLAB 3D-DIC)监测试样的三维变形,采集帧率为2fps。应用红外热像仪(TI-9100)的被动采集模式,使用红外成像镜头以2Hz的频率实时采集试样的红外辐射来检测结构失效情况。碳纤维复合材料层压板作为对照组进行相同试验。

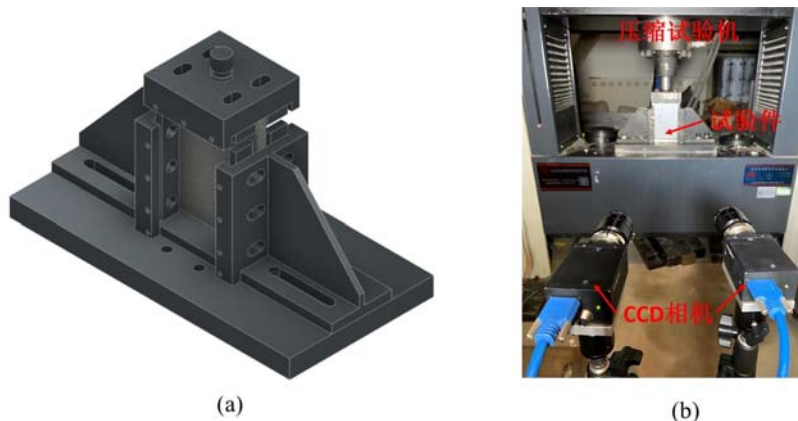


图9 (a)压缩夹具;(b)压缩试验装置

Fig. 9 (a) compression fixture; (b) compression experimental device

复合材料层压板和复合材料结构电池的压缩载荷-位移曲线如图10所示,层压板与复合材料结构电池承受的平均峰值载荷分别为104.4kN和65.2kN,可见复合材料结构电池压缩承载能力下降较为明显。进一步计算出层压板的压缩破坏强度和模量为227MPa和63.1GPa,复合材料结构电池的压缩破坏强度和模量为141.7MPa和56.1GPa。与层压板相比,复合材料结构电池的压缩破坏强度和模量分别下降了37.6%和11.0%,可见软包电池的嵌入,明显降低了复合材料层压板的压缩性能。ATTAR等^[11]给出的软包电池压缩测试曲线估算出的压缩强度约为4.2MPa,压缩模量约为92.7MPa,与之相比,本研究中复合材料结构电池提供了更好的抗压性能。

图11给出了不同加载阶段离面位移云图,由图可知,随着加载的进行,在电池所嵌入的区域离面位移逐渐显现,并呈现出凹坑递增趋势,表明电池嵌入区域产生了内凹的局部屈曲。

在加载过程中, TI-9100热像仪的被动红外采集模块捕捉到的损伤起始、扩展以及最终破坏过程中的温度场变化,如图12所示。复合材料层压板的损伤是在试件中部产生横向裂纹,随着加载的进行,裂纹不断扩展延伸,破坏区域面积也在不断扩大,最终完全失效。复合材料结构电池试件首先在软包电池与复合材料的界面处萌发细小的裂纹,且裂纹主要集中在平行于压缩加载方向的两侧界面处。随着加

载的进行,裂纹沿着试件宽度方向延伸,裂纹区域面积不断扩大,直至贯穿整个宽度方向,最终复合材料结构电池试件被压溃。

由于压缩加载过程中复合材料试样纤维间的摩擦和断裂会导致升温,因此本文试验使用热像仪的被动红外采集模式。考虑到层压板较厚(4.5mm),压缩试验破坏载荷(104kN)相对较大,所以在压缩试件过程中积累的能量很大,破坏瞬间最高温升达到了16.34℃,后续裂纹扩展过程中,温升基本在5℃至9℃之间。与之相比,复合材料结构电池压缩破坏载荷相对较小,破坏瞬间最高温升为12.28℃,后续裂纹扩展过程中温升基本在3℃至8℃之间。WU等^[18]研究表明,复合材料圆管轴向压缩加载过程中的最大温升大致为10℃,本文试验结果与之基本相符。

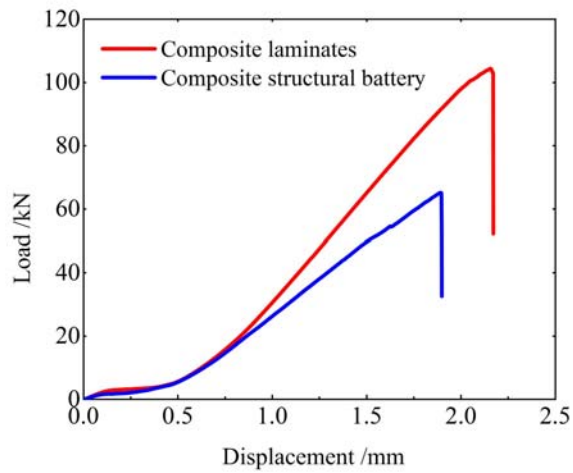


图 10 压缩载荷-位移曲线

Fig. 10 Compression load-displacement curves

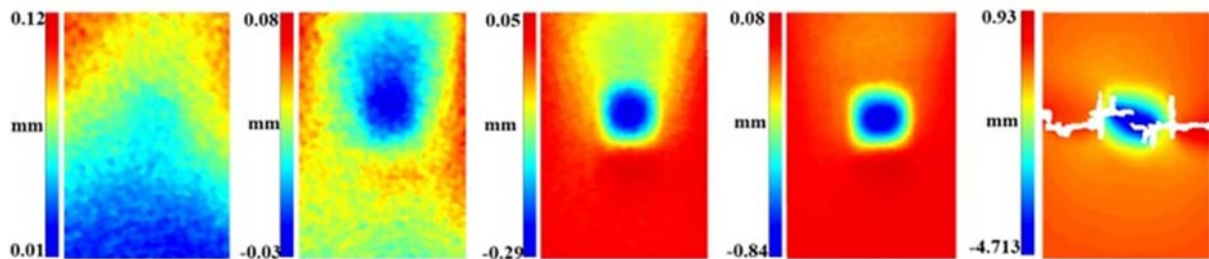


图 11 复合材料结构电池不同加载阶段的离面位移

Fig. 11 Out-of-plane displacement of composite structural cells at different loading stages

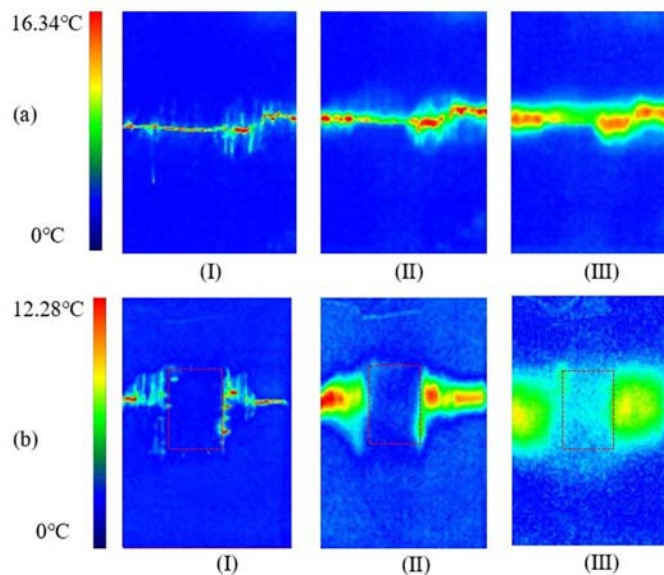


图 12 温度场演化:(a)复合材料层压板;(b)复合材料结构电池((I)损伤起始;(II)损伤扩展;(III)最终破坏)

Fig. 12 Temperature field evolution:(a) composite laminates; (b) composite structural battery

((I)initiation of damage; (II)extension of damage; (III)final destruction)

在压缩加载过程中对复合材料结构电池的电压、温度、载荷进行了实时监测,电压、温度、载荷随加

载时间的变化曲线如图 13 所示。在整个试验过程中电池的电压、内阻只在微小范围内正常波动,即使在压溃的瞬间电压从 3.4613V 下降至 3.4598V,也仅变化了 1.5mV,并且在卸载后电压迅速回升。由此可知,压缩载荷未造成电池内部发生短路,在压溃的瞬间也并未产生电压的明显突变。

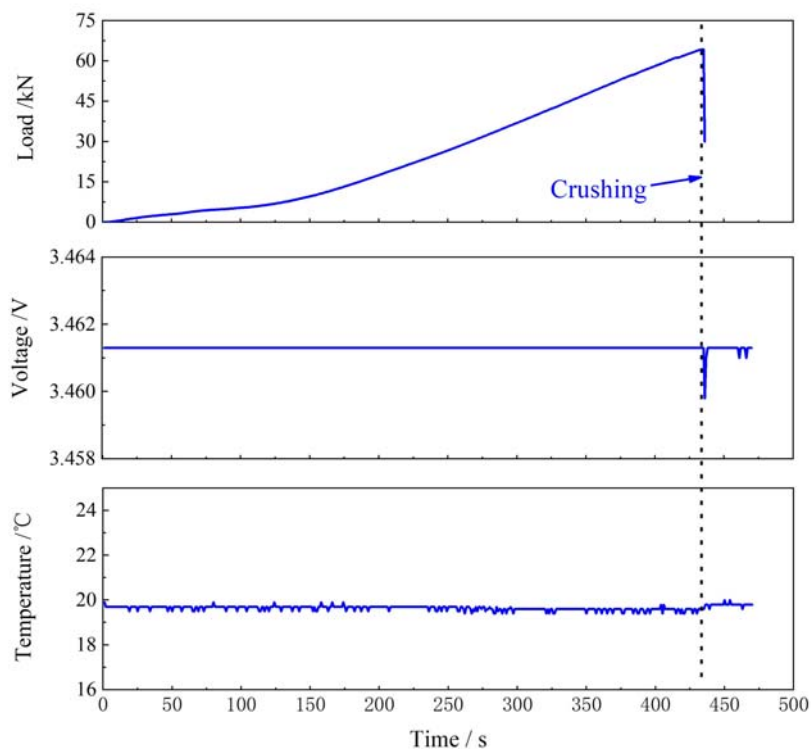


图 13 压缩加载过程中载荷、电压、温度随时间的变化曲线

Fig. 13 Curves of load, voltage and temperature during compression loading

在复合材料结构电池未受载、30%、60%、90%失效载荷和失效后 5 个压缩加载阶段,依次进行循环充放电测试,循环充放电曲线如图 14 所示。由图 14 可见,在压缩加载 5 个阶段下的充放电曲线变化趋势一致,放电时间及容量基本保持不变,但充电时间、容量有所变化,压缩加载后充电时间与加载前相比减少了 7.53%,充电容量增加了 1.0%。

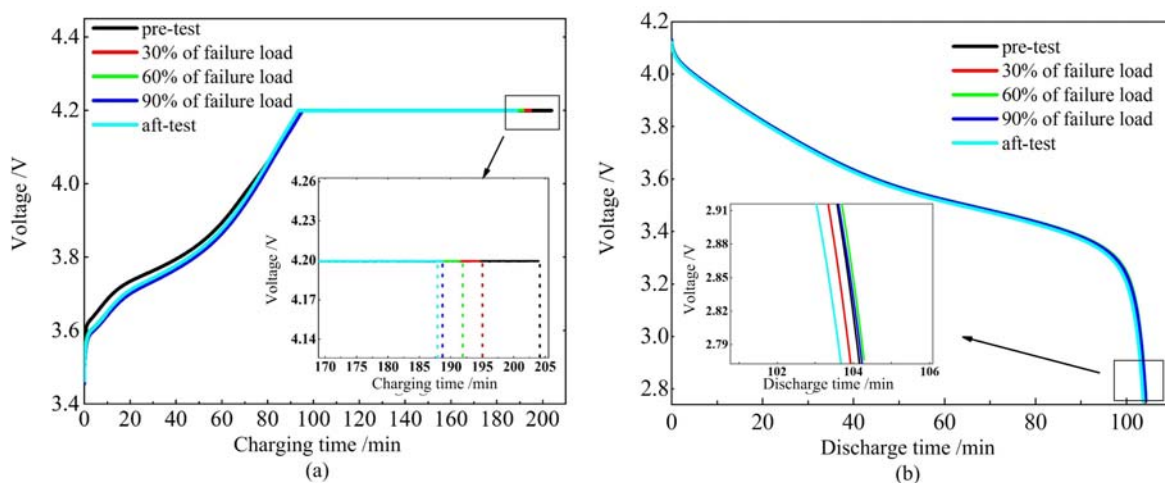


图 14 不同压缩阶段时电池的充放电曲线:(a)充电曲线;(b)放电曲线

Fig. 14 Charge-discharge curves of the battery at different compression stages:

(a) charging curves; (b) discharge curves

5 结论

本文采用真空辅助成型工艺制备了嵌入式复合材料结构电池,并根据 ASTM 测试标准对复合材料结构电池分别开展了弯曲和压缩试验研究,测试了复合材料结构电池的力、电学性能。弯曲测试结果表明,在弯曲载荷作用下,复合材料结构电池相比于层压板,其弯曲强度下降了 57.1%,杨氏模量下降了 35.2%。TI-9100 红外无损检测结果表明,复合材料结构电池弯曲破坏区域较大,在电池嵌入区域产生了较大范围内的纤维断裂和分层。在压缩载荷作用下,复合材料结构电池相比于层压板,其压缩强度下降了 37.6%,杨氏模量下降了 11.0%。TI-9100 红外无损检测发现,在电池/复合材料界面处裂纹萌发、扩展直至贯穿宽度方向。在弯曲和压缩破坏后的充电时间都减少了,但充电容量、放电时间、放电容量未发生明显变化,因此,复合材料结构电池仍旧保留一定的抗弯和抗压性能,在弯曲和压缩破坏后仍旧保留着电池优异的电学性能,可以稳定地发挥弯曲和压缩承载与储能的作用。

参考文献:

- [1] 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))
- [2] 王朝阳. 结构储能复合材料的制备与性能研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021 (WANG Zhaoyang. Preparation and performance study of structural energy storage composite materials[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021 (in Chinese))
- [3] DONG X Y, CHEN Y K. Multifunctional additive manufacturing and multiphysics numerical investigations of carbon fiber structural battery composite using a drop-on-demand method with in-situ consolidation[J]. Materials & Design, 2023, 229:111888.
- [4] HARNDEN R, CARLSTEDT D, ZENKERT D, et al. Multifunctional carbon fiber composites: a structural, energy harvesting, strain-sensing material[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(29):33871—33880.
- [5] ADAM T J, LIAO G Y, PETERSEN J, et al. Multifunctional composites for future energy storage in aerospace structures[J]. Energies, 2018, 11(2):335—347.
- [6] 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.
- [7] ASP L E, JOHANSSON M K G, LINDBERGH G, et al. Structural battery composites: a review[J]. Functional Composites and Structures, 2019, 1(4):042001.
- [8] CARLSTEDT D, ASP L E. Performance analysis framework for structural battery composites in electric vehicles [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 186:107822.
- [9] OBRADOVIC J, BORJA S, BELINGARD I G. Lightweight design and crash analysis of composite frontal impact energy absorbing structures[J]. Composite Structures, 2012, 94:423—430.
- [10] THOMAS J P, QIDWA S M, POGUE W R, et al. Multifunctional structure-battery composites for marine systems[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 47:5—26.
- [11] 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.
- [12] SHALOUF S, ZHANG J, WANG C. Effects of mechanical deformation on electric performance of rechargeable batteries embedded in load carrying composite structures[J]. Plastic Rubber Composite, 2014, 43:98—104.
- [13] PATTARAKUNNAN K, GALOS J, DAS R, et al. Impact damage tolerance of energy storage composite structures containing lithium-ion polymer batteries[J]. Composite Structures, 2021, 267:113845.
- [14] PAN Y J, XIONG Y, DAI W, et al. Crush and crash analysis of an automotive battery-pack enclosure for lightweight design[J]. International Journal of Crashworthiness, 2022, 27(2):500—509.
- [15] 程腾, 吴健雄, 张勇, 等. 囊体布热合缺陷的锁相热成像无损检测技术研究[J]. 实验力学, 2015, 30(5):577—582 (CHENG Teng, WU Jianxiong, ZHANG Yong, et al. On the lock-in thermography non-destructive testing of

- heat sealed capsule body cloth defect[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2015, 30(5): 577–582 (in Chinese))
- [16] 凡丽梅, 董方旭, 段剑, 等. 快速无损检测技术在复合材料构件中应用与发展[J]. *南昌航空大学学报(自然科学版)*, 2021, 35(4): 32–38 (FAN Limei, DONG Fangxu, DUAN Jian, et al. Application and development of faster non-destructive testing technology in composite materials[J]. *Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences)*, 2021, 35(4): 32–38 (in Chinese))
- [17] 宋振, 路广晨, 马银行, 等. 基于红外热成像的 CFRP 板振动疲劳损伤试验研究[J]. *实验力学*, 2022, 37(6): 821–828 (SONG Zhen, LU Guangchen, MA Yinhang, et al. Experimental study on vibration fatigue damage behavior of CFRP plate based on infrared thermal imaging[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(6): 821–828 (in Chinese))
- [18] WU Z Y, QIN S, ZHANG P Y, et al. Damage evolution in braided composite tubes under axial compression studied by combining infrared thermography and X-ray computed tomography[J]. *Composite Structures*, 2023, 307: 116634.
- [19] REN D, SMITH K, GUO D, et al. Investigation of lithium plating-stripping process in Li-ion batteries at low temperature using an electrochemical model[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2018, 165(10): A2167.
- [20] KESHAVARZI M M, GILAKI M, SAHRAEI E. Characterization of in-situ material properties of pouch lithium-ion batteries in tension from three-point bending tests[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 219: 107090.
- [21] CANNARELLA J, ARNOLD C B. Stress evolution and capacity fade in constrained lithium-ion pouch cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 245: 745–751.

Study on bending and compression properties of embedded composite structure batteries

SHANG Yuxiang, WANG Xiaochen, MAO Rui, REN Zhimeng, LEI Zhenkun, BAI Ruixiang

(State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Composite structural battery, as an innovative energy storage solution, has potential application prospects in aerospace, transportation and other fields. In this study, a vacuum-assisted resin transfer molding technology was used to embed soft pack batteries into composite laminates and prepare composite structured batteries. Bending and compression tests were conducted on them according to the ASTM testing standards. The three-point bending test show that the bending strength and Young's modulus of the composite structure battery decrease by 57.1% and 35.2% respectively compared to the laminated plate, resulting in a large range of fiber fracture and delamination. The compression tests show that the compressive strength and Young's modulus of composite structured batteries decrease by 37.6% and 11.0% respectively compared to laminated plates, and cracks are generated and penetrated laterally at the battery/composite interface. The charging time decrease after bending and compression damage, and there are no significant changes in charge capacity, discharge time, and discharge capacity. It shows that compared with soft pack batteries, composite structure batteries have stable electrical and reliable mechanical properties, which can effectively and stably play the role of structural load-bearing and energy storage.

Keywords: composite structure battery; electrical performance; bending performance; compression performance