

结构储能碳纤维复合材料设计及其在无人机上的应用

王朝阳¹, 杨向涛¹, 徐祥博¹, 张金纳¹, 朱世杰¹, 吴海宏^{1,2}, 仝立勇³

(1. 河南工业大学碳纤维复合材料国际合作试验室, 郑州 450001;

2. 郑州仿弦新材料科技有限公司, 郑州 450001;

3. 悉尼大学航空机电学院, 悉尼 2006)

[摘要] 随着航空航天领域的迅速发展以及世界各国低空领域不断开放, 各种无人机应用显著增多, 空中环境污染问题也随之而来, 各国清洁天空计划不断推进。与此同时人们对无人机本身的属性要求也越来越高, 对复合材料应用提出了新的挑战。将储能电芯和超薄碳纤维复合材料相复合, 制备了储能、承载一体化的结构储能碳纤维复合材料(Structural energy storage carbon fiber composite, SESCFC), 对其空载和受载条件下的电化学性能进行了测试; 并将其集成在自主设计的无人机机翼上, 对集成后无人机的重量和续航里程进行了分析比较。结果表明: 当充放电电流为 0.1A 时, SESCFC 能量密度达到了 $13.2\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$, 功率密度达到了 $119.6\text{W}/\text{kg}$; 在 1200N 的载荷作用下, 由于电芯正负极片间距变小, SESCFC 的能量密度提高到了 $14.5\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 。集成 SESCFC 后的无人机较锂电池无人机的自重减少 37.5%, 续航里程增加了 20%; 较集成太阳能电池板的无人机自重减少近 20%。研究结果对于碳纤维复合材料结构-功能一体化设计及其在无人机设计中的应用具有指导意义和应用价值。

关键词: 碳纤维复合材料; 结构储能; 充放电测试; 储能机翼; 无人机

Structural Energy Storage Carbon Fiber Composite Design and Application in Drone

WANG Chaoyang¹, YANG Xiangtao¹, XU Xiangbo¹, ZHANG Jinna¹, ZHU Shijie¹,
WU Haihong^{1,2}, TONG Liyong³

(1. Carbon Fiber Composites International Joint Research Lab in Henan, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;

2. Zhengzhou Fangstring Advanced Material Science and Technology Company Limited, Zhengzhou 450001, China;

3. School of Aerospace, Mechanical & Mechatronic Engineer, The University of Sydney, Sydney 2006, Australia)

[ABSTRACT] With the rapid development of aerospace field and the continuous opening of low altitude areas in the world, the application of various drones has increased significantly, which results in sky environmental pollution problems, and drives many countries starting clean sky projects. Meanwhile, higher property requirements of drones pose new challenges for composites applications. In this paper, a structural energy storage carbon fiber composite (SESCFC) is fabricated by integrating energy storage core to the ultra-thin carbon fiber composite package, and its electrochemical performance is tested with and without loading. Furthermore, SESCFC is integrated into the wing of self-designed drone, and the improvement on the weight and flight endurance of the drone is evaluated. The results show that the energy density of SESCFC approaches $13.2\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$, and that the power density approaches $119.6\text{W}/\text{kg}$. Under loading of 1200N, the energy density of SESCFC increased to $14.5\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ due to space compressed between the electrodes. Compared with drones driven by Li-battery, the flight endurance of the drone with SESCFC increases 20%, and the self-weight decreases 37.5%. Compared with solar panel-driven drones, about 20% lightweight effect has been achieved. The results are helpful for structure-function integrated design of carbon fiber composites and their application in drone design.

Keywords: Carbon fiber composite; Structural energy storage; Charge and discharge test; Energy storage wing; Drone

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.18.084

碳纤维复合材料具有轻质、高强、高比模量、耐疲劳、耐腐蚀等一系列优异性能特点,目前已广泛用于航空航天领域。随着世界各国低空领域不断开放,无人机的应用领域不断扩大,同时由其引发的环境污染,特别是天空污染问题也越来越严峻。为此,世界各国先后启动了清洁天空项目,以通过对新材料、新工艺、新技术方面的合作研究,减少燃油消耗和碳排放。在这个大的背景下,以锂电池为动力的无人机得到了迅猛发展。然而,自重较大的锂电池动力系统也制约了无人机的续航里程以及有效承载能力。近年来,以碳纤维为载体的结构储能复合材料引起了许多学者的兴趣^[1-2]。利用碳纤维优异的力学性能,将结构件和储能系统合二为一,可有效节约载荷空间,减轻系统重量,提高电池能量密度,成为了国内外新兴起的一个研究热点^[3-6]。Swerea^[7]采用铆钉互锁的方法将锂电池垂直集成在碳纤维复合材料中制备的结构电池,与传统的锂电池包相比,结构电池的机械性能(在重复机械负载下机械弯曲刚度和容量衰减阻力)提高了15倍以上^[8]。Zhang等^[9]制备了碳纤维电极结构动力复合材料,并探究了机械负载对其电化学性能的影响。Thomas等^[10]课题组将薄膜电池嵌入复合材料中制备出了船用多功能结构电池复合材料,结果表明在不降低结构性能和浮力的情况下,将锂电池集成到结构复合材料中提供储能的方法是可行的,其能量密度为 $50\text{W}\cdot\text{h/L}$,稍低于计划能量密度,目前正在研究其在静水压力下的抗弯强度和拉格朗日行为。此外,Thomas等^[11-14]对结构电池在无人机上(Black widow, MAV)的应用进行了较为系统的研究,探索显著延长其飞行时间的设计方法。胡芸等^[15]课题组采用硅橡胶热膨胀模塑成型法,在 130℃ 条件下,制备得到的异型聚合物锂离子电池可满足微型无人机的力学要求,但是在

电池性能上有所下降。

目前,结构储能复合材料的研究还处于起步阶段。针对结构储能复合材料的能量密度、安全性、可靠性以及在无人系统上的集成设计、应用还有大量的工作要做。为了提高无人机的续航能力和有效承载能力,本文设计、制备了SESCFC,采用RST5200电化学工作站对SESCFC在空载、加载条件下的恒流充放电性能进行了测试。在此基础上,对其在自行设计的垂直起降无人机上的应用效果进行了初步评价。

1 SESCFC 的制作

1.1 试验材料

表1为制备SESCFC用到的主要材料及其型号、生产厂商。

1.2 电极制备

采用湿法电极制备工艺^[16-18]制备SESCFC电极片。(1)按照质量比为 $9:0.5:0.5$ 的比例,分别称取活性炭、导电炭黑、黏结剂(PVDF);(2)向混合均匀的粉末中加入适量有机溶剂NMP,置于搅拌器中真空搅拌30min,最终获得涂覆用的电极浆料;(3)用涂布工艺将电极浆料涂覆在 0.01mm 厚的铝箔集流体上,涂布前调整刮刀和集流体之间的间隙,将涂覆厚度设定为 $200\mu\text{m}$;(4)将涂覆后的电极片在 1MPa 的压力下进行辊压;(5)将辊压后的电极片放入真空干燥箱,在 120℃ 条件下真空干燥10h,然后裁剪成宽度为 30mm 的电极片。为了增加电极浆料和集流体的粘接强度,在 25℃ 下,将铝箔放入浓度为 4mol/L H_2SO_4 中刻蚀30min,然后用去离子水对表面冲洗直至 $\text{pH}=7$,在真空干燥箱中烘干后密封保存备用。具体制备工艺流程如图1所示。

表1 试验材料

Table 1 Experimental materials

材料名称	材料型号	生产厂商
活性炭	YP50F	Kuraray Chemical (日本)
导电炭黑	超导电 T100	天津天一世纪化工产品科技发展有限公司
聚偏氟乙烯	HSV900	法国阿科玛公司
纤维素隔膜	TF40-30	日本高度纸工业株式会社
硫酸 $(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	4	阿拉丁试剂有限公司
铝箔 /mm	0.01	佛山市中技烯米新材料有限公司
有机电解液	DLC301	日本大金
N-甲基吡咯烷酮	M100588	阿拉丁试剂有限公司
超薄碳纤维预浸料 (快固型环氧树脂)	T7001220	郑州仿弦新材料科技有限公司

1.3 碳纤维复合材料结构

为了保证力学性能的前提下减轻储能结构自身的重量,本文采用自制的超薄碳纤维预浸料来封装储能电芯。碳纤维为威海拓展纤维提供的 T800S,基体为快固型环氧树脂,碳纤维的体积分数 50%。碳纤维预浸料采用 0°、±45° 和 90° 的铺层方式,利用碳纤维复合材料突出的力学性能,使得该储能结构满足承载的要求。复合材料总体结构如图 2 所示。

1.4 储能结构成型

将储能电芯和碳纤维复合材料结合在一起主要通

过固化成型工艺,成型过程如下:(1)在电极片正、负极片上铆接引脚,采取 Z 型叠片工艺,分别将正、负极片放置在纤维素隔膜两侧,叠成尺寸为 30mm × 30mm 电芯,如图 3 (a) 所示;(2)将折叠好的电芯放置在铺层好的碳纤维预浸料中,组装成如图 3 (b) 所示的结构;(3)将组装好的三明治结构储能预浸料放置在模压机上固化成型。固化工艺条件:0.5MPa 下,先在 90℃ 保温 10min,然后升温至 120℃ 保温 15min。固化成型后样品如图 3 (c) 所示,然后在真空条件下通过注液孔向里注入 1mol/L 的有机电解液 DLC301(Et₄ NBF₄/AN),使正、

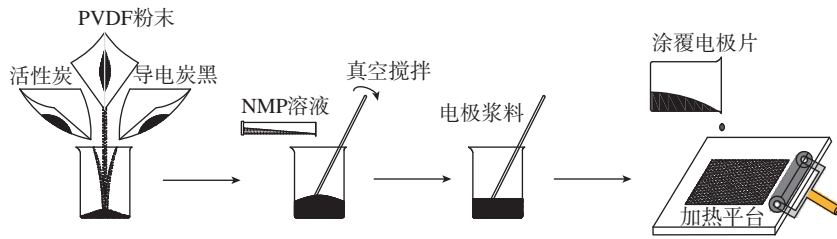


图1 电极片制备流程图

Fig.1 Flow chart of electrode sheet preparation

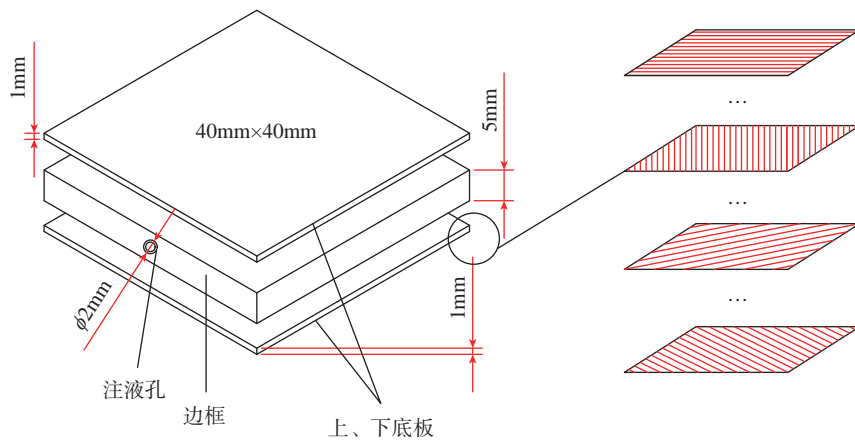


图2 SESCFC承载结构图

Fig.2 Bearing structure drawing of SESCFC

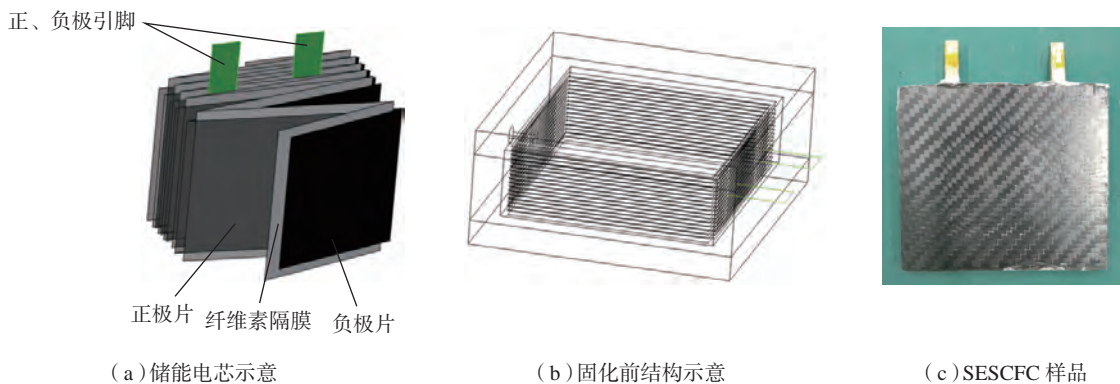


图3 SESCFC固化成型

Fig.3 SESCFC curing

负极片充分浸润电解液,密封后进行测试。

1.5 电化学性能测试

采用电化学工作站 RST5200 对 SESCFC 加载前后的电化学性能进行测试。通过万能实验机对其进行加载测试,加载载荷以 200N 为阶梯递增,加载时间为 30min,在加载同时对其电化学性能进行测试。循环伏安测试的电压窗位为 0~2.5V,扫描速率分别为 $0.01\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.02\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.05\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$ 。恒流充放电测试的电压窗位为 0.5~2.5V,充放电速率分别为 $0.05\text{A}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.1\text{A}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.5\text{A}\cdot\text{s}^{-1}$ 。交流阻抗测试所采用的交流信号振幅为 0.005V,频率范围 0.01~1000Hz^[19-21]。

2 储能复合材料无人机

将上述 SESCFC 在自行设计的垂直起降无人机机翼中做了集成设计和模拟分析,通过电化学性能测试可得单片 SESCFC 的参数如表 2 所示,SESCFC 在机翼中的设计布局如图 4 所示。SESCFC 的连接方式定为:10 块串联为一组,再将这样的 4 组并联,可形成一个电压为 25V,放电电流可达 10A 的放电系统。

如图 4 所示,此无人机翼型为三角翼型,翼展 1.5m,机翼面积为 0.5m^2 。前缘与副翼部分由于工艺复杂不适合布置 SESCFC,在无人机的左、右两侧机翼的上、下面各布置有 10 个 SESCFC 单片,并将 10 个单片串联成一个电池小组,再将 4 个电池小组并联在一起构成一个供电系统。连接后的储能系统电压为 25V,工作电流 10A,输出功率可达 250W。集成 SESCFC 后垂直起降无人机自重约为 2.5kg,集成结构电池后无人机自重有明显减少,所需起飞功率减小。无人机选用 40A 电子

调速器, TYI-5008KV400 电机,1655 寸碳纤桨。经测试垂直起降无人机在起飞阶所需放电功率为 200W,此时整机所需输入功率约为 220W,集成在无人机机翼内的 SESCFC 能够满足需求。

3 结果与讨论

3.1 循环伏安测试

循环伏安测试(Cyclic voltammetry, CV)主要用来表征电容器充放电的可逆性行为及电容特性^[21]。如图 5 所示,在循环伏安测试下,随着扫描速率的增大,SESCFC 电极的响应电流以及扫描曲线围成的面积也在相应增大,说明 SESCFC 具有良好的超电容储能特性。受粘结剂、接触电阻以及隔膜厚度、孔径等因素的影响,在 $0.01\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.02\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.05\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描速率下,循环伏安曲线呈现出近似矩形的特征,与理想双电层电容器循环伏安曲线存在一定偏差。扫描速率从 $0.01\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$ 依次增大到 $0.05\text{V}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,循环伏安曲线没有发生明显的扭曲,仍保持近似矩形的特征,表明 SESCFC 内阻较小,随着扫描速率的增大,响应电流同步增大,说明 SESCFC 具有良好的充放电可逆性。

3.2 恒流充放电测试

恒流充放电测试(Galvanostatic Charge/Discharge, CD)是在恒定电流下,对工作电极进行充电和放电试验^[22]。图 6(a)和(b)分别为 SESCFC 理想情况和实际情况下恒流充放电曲线图。如图 6 所示,随着充电电流的增大,充电时间同步缩短,充放电时间基本保持相等。在不同充放电电流下,充放电曲线均保持了良好的线性和对称性,表明所制备的 SESCFC 具有很高的充放电可

表2 单片SESCFC基本参数

Table 2 Basic parameters of single SESCFC

参考重量/kg	转化效率/%	工作电压/V	工作电流/A	输出功率/W	尺寸/mm	串联电阻/ Ω
0.02	80%	2.5	2.5	6.25	40×40	1

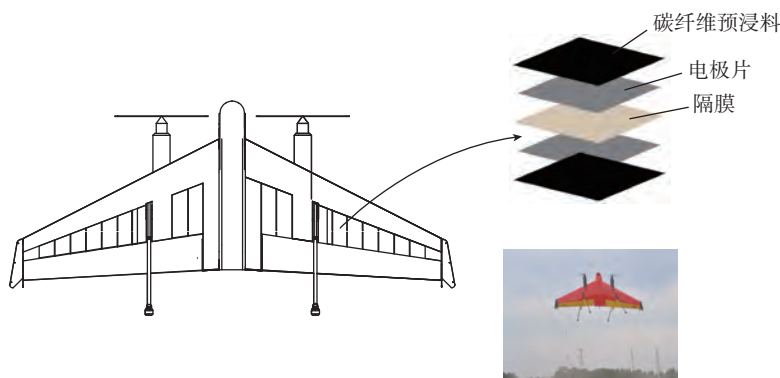


图4 SESCFC在机翼上的集成分布

Fig.4 SESCFC integrated distribution on wings

逆性,且充放电效率较高。

3.2.1 电压特性

通过比较理想情况下和实际情况下 SESCFC 的恒流充放电曲线,可以看出实际情况下在充放电开始的瞬间,总存在一段电压滞后的现象,学术上称这部分电压变化为称为内阻电压降 ΔU ,将这一部分压差除以电流值即可得到 SESCFC 的等效串联电阻(Equivalent Series Resistance, ESR)。

$$ESR = \frac{\Delta U}{2I} \quad (1)$$

式中, ΔU 表示内阻电压降(V); I 表示恒流充放电电流值(A)。

通过公式(1)计算可得本试验方案所制备的 SESCFC 内阻($ESR=0.93\Omega$),表明电极材料导电性良好,使用该固化成型工艺可以使得电极和电解液之间充

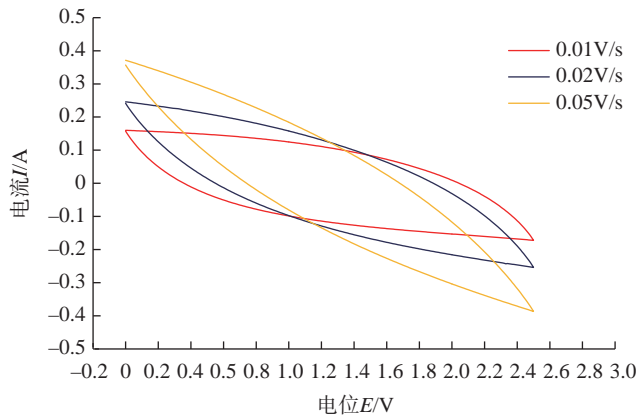
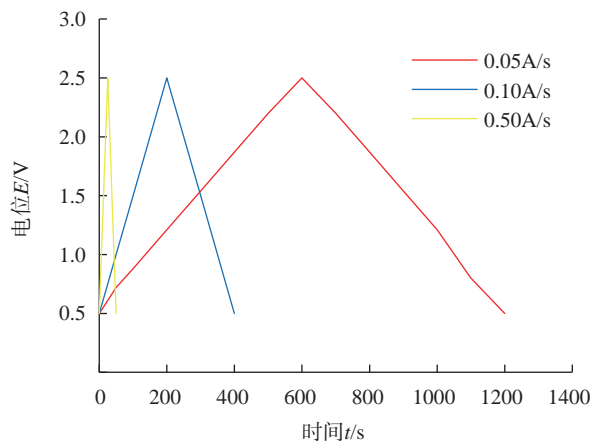


图5 不同扫描速率下循环伏安曲线
Fig.5 CV curves at different scanning rates



(a)理想情况下充放电曲线

分接触。

3.2.2 电容量

电容量是 SESCFC 的一个重要属性,表示 SESCFC 容纳电荷的能力,主要受电解液离子和电子传递速率间扩散差异的影响^[23]。在不同的充放电电流下,同一个 SESCFC 测试出的电容量大小有差异。根据公式(2)和公式(3)可计算出不同充放电电流下 SESCFC 的电容量和比电容:

$$C = \frac{I}{dU/dt} \text{ 或 } C = I \left(\frac{t_2 - t_1}{U_2 - U_1} \right) \quad (2)$$

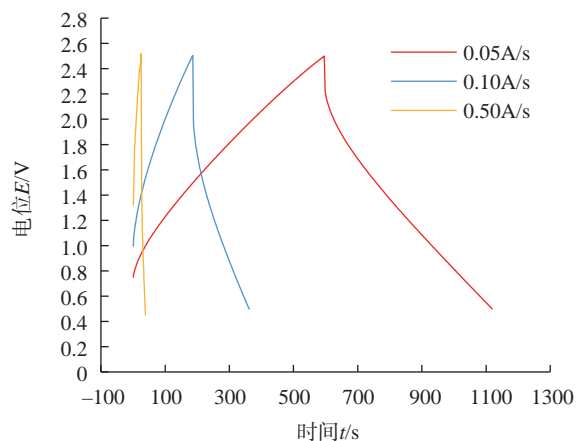
$$C_m = \frac{C}{m} \quad (3)$$

式中, C 表示电容量(F); C_m 是比电容(F/g); I 表示充放电电流值(A); m 是电极活性物质质量(g,电极片与集流体的质量差值); dU/dt 表示放电曲线斜率; t_1 、 t_2 和 U_1 、 U_2 分别为两个不同的时间点(s)和该时间点对应的电压值(V)。表3为不同充放电电流下 SESCFC 的电容量和比电容。

3.2.3 能量密度和功率密度

通常情况下,储能器件的能量密度和功率密度会采用 Ragone 图的方式给出,能量密度是在特定的功率密度条件下表现出来的,功率密度是指单位质量或单位体积内 SESCFC 所能给出的功率,主要用来表征 SESCFC 所能承受电流的大小。根据恒流充放电曲线,其能量密度和功率密度可通过公式(4)和(5)计算出:

$$E_m = \frac{CU^2}{7200m} \quad (4)$$



(b)实际情况下充放电曲线

图6 SESCFC恒流充放电曲线图

Fig.6 SESCFC constant current charge and discharge curves

$$P = \frac{E_m}{\Delta t} \quad (5)$$

式中, E_m 为质量能量密度 ($W \cdot h/kg$); P 为功率密度 (W/kg); Δt 为放电时间 (s)。表 4 为不同电流下的功率密度和能量密度。

3.3 交流阻抗测试

交流阻抗测试 (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) 是研究电极过程动力学和界面反应的一种重要手段。EIS 是以不同的小幅值正弦波扰动信号作用于电极体系, 由电极系统的响应信号与扰动信号之间的关系得到电极阻抗, 从而推测电极过程的等效电路, 进而分析电极系统所包含的动力学过程^[24]。如图 7 所示, Nyquist 曲线主要由高频区、中频区和低频区 3 部分组成, 其中左侧高频区 Nyquist 半圆曲线与 X 轴的截距反映了 SESCFC 内阻的大小。可知, SESCFC 的内阻约为 1.0Ω , 和恒流充放电曲线计算出来的等效串联电阻基本相等; 中频区具有相对较短的 Warburg 扩散线且与 X 轴成 45° 夹角, 表明电解质离子在电极孔隙内能很好的传输和扩散; 右侧低频区倾斜于 Y 轴的直线代表 Warburg 阻抗, 理想情况下是与 Y 轴平行, 实际因离子扩散作用而出现偏离现象^[25]。

3.4 受载时电性能

对于 SESCFC 力学性能而言, 拉伸和压缩性能是其结构表征的重要因素。在实际应用中, 压缩和拉伸等机械因素不仅会对 SESCFC 的电性能造成影响, 还会影响到 SESCFC 的安全性, 因此, 探究机械应力对 SESCFC 的影响具有重要意义。Nishijima 和 Hara^[26] 在室温和低温条件下的压缩和拉伸试验对结构介质电容器电化性能的影响。Carlson^[27] 等研究了机械负载对聚酯薄膜

介质电容器电容的影响。

图 8 为 SESCFC 在充放电电流为 $0.1A$ 时不同载荷下的能量密度曲线。在空载情况下, SESCFC 能量密度为 $13.2W \cdot h/kg$, 随着载荷的增加, SESCFC 能量密度先呈现缓慢上升的趋势, 在载荷为 $1200N$ 左右时 SESCFC 能量密度达到最大值。通过对平板电容器容量计算公式 (6) 分析可得:

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi kd} \quad (6)$$

式中, C 为电容量, ϵ 为相对介电常数, S 为电极片有效面积, k 为静电力常量, d 为两电极片之间距离。在受载条件下, SESCFC 电芯中正、负电极片之间距离缩小, 使得正负电极片之间电容量增大, 电芯能量密度随之提高, 在 $1200N$ 时, SESCFC 能量密度达到最大值 $14.5W \cdot h/kg$ 。当载荷超过 $1200N$ 时, 随着载荷的增加 SESCFC 能量密度开始出现严重下降趋势, 并且 SESCFC 表面伴随有开裂现象。分析所得, 在大载荷下, SESCFC 电芯中电极片以及纤维素隔膜遭到破坏, 其储能性受到影响。

3.5 储能无人机对比分析结果

由于字数问题, 这里对 SESCFC 无人机的气动性能不做过多描述。采用上述集成方案将 SESCFC 集成在无人机机翼上为其提供能量, 一方面避免了燃油燃烧带来的污染; 另一方面 SESCFC 在 $1200N$ 载荷下仍能安全进行充放电, 具有更可靠的安全性, 并且集成后的 SESCFC 供电系统可以适应各种恶劣的天气条件。通过试验对比发现, 集成 SESCFC 的无人机续航里程可比锂电池供电无人机续航里程增加了 20% 左右, 自重减少了 37.5% 。针对现有的大多数太阳能无人机而言, 集

表3 不同电流下电容量和比电容

Table 3 Capacitance and specific capacitance under different current

充放电电流 I/A	电容量 C/F	比电容 $C_m/(F \cdot g^{-1})$
0.05	31.25	15.63
0.10	30.3	15.15
0.50	14	7

表4 不同电流下的功率密度和能量密度

Table 4 Power density and energy density under different current

充放电电流 I/A	功率密度 $P/(W \cdot kg^{-1})$	能量密度 $E_m/(W \cdot h \cdot kg^{-1})$
0.05	43.7	13.6
0.10	119.6	13.2
0.50	907.5	6.1

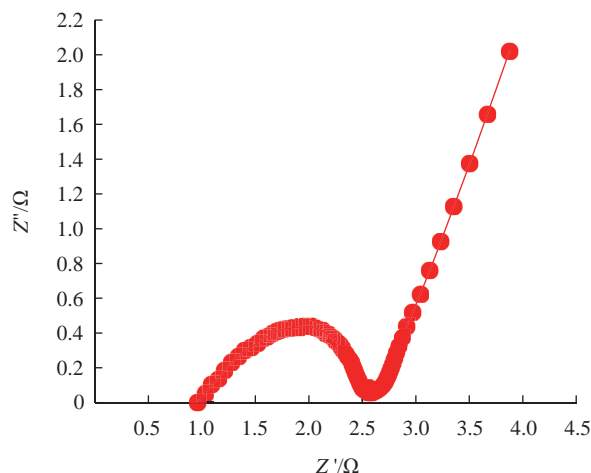


图7 SESCFC交流阻抗谱曲线

Fig.7 EIS of SESCFC

表5 集成前后无人机性能参数

Table 5 Comparison of UAV performance parameters before and after integration

无人机性能	翼载荷 $/(g \cdot dm^{-2})$	展弦比	自重	续航里程 /km	环境适应力
常规无人机参数	40	4.8	4	80~100	一般
集成太阳能电池后参数	40	4.8	3	100~120	良好
集成 SESCFC 后参数	40	4.8	2.5	100~120	较强

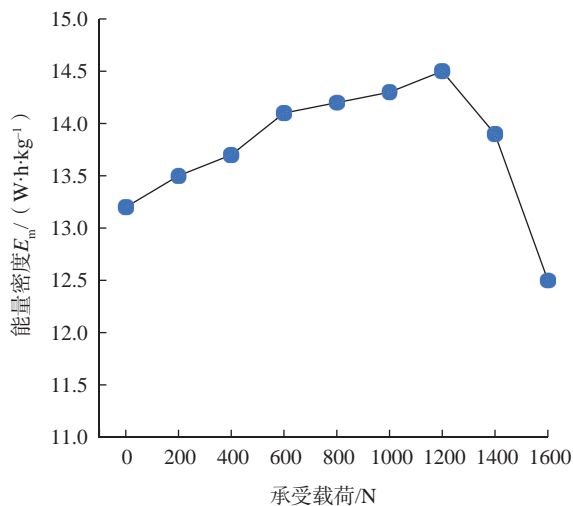


图8 不同载荷下能量密度曲线

Fig.8 Energy density curve under different loads

成储能复合材料的无人机可比集成太阳能电池板的无人机质量减少约 20%^[28]。集成后无人机对比参数如表 5 所示。

4 结论

(1) 采用本试验方法制备出的结构储能碳纤维复合材料,可以和无人机集成在一起,是一种无人机多功能轻量化结构设计的有效途径。

(2) 本试验方法制备出的结构储能碳纤维复合材料,在充放电电流为 0.1A 时,空载情况下能量密度达到了 13.2W·h/kg,功率密度达到了 119.6W/kg;在 1200N 的载荷下,储能系统能量密度达到了 14.5W·h/kg。

(3) 将本试验制备的结构储能碳纤维复合材料集成在无人机机翼上,相比锂电池无人机,无人机自重减少 37.5%,可使航程增加 20%;相比集成太阳能电池无人机,可使重量减少约 20%。

参考文献

[1] 刘永泽. 锂离子动力电池发展现状及应用前景[J]. 黑龙江

科技信息, 2016, 1(9): 132.

LIU Yongze. Development status and application prospect of lithium ion power battery[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016, 1(9): 132.

[2] 胡芸, 谢凯, 盘毅, 等. 结构电池的研究现状[J]. 电源技术, 2008, 20(12): 889-891.

HU Yun, XIE Kai, PAN Yi, et al. The current research of structural battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2008, 20(12): 889-891.

[3] MUHAMMADA Q. Structure battery multifunctional composite design[J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2002, 48(98): 180.

[4] LIU P, SHERMAN E, JACOBSEN A J. Design and fabrication of multifunctional structural batteries[J]. Journal of Power Sources, 2009, 189(1): 646-650.

[5] EKSTEDT S, WYSOCKI M, ASP L. Structural batteries made from fibre reinforced composites[J]. Plastics Rubber and Composites, 2010, 39: 148-150.

[6] CARLSON T. Multifunctional composite materials: design, manufacture and experimental characterizations[D]. Lulea: Lulea Tekniska University, 2013.

[7] SWEREA A B. Battery half cell, a battery and their manufacture: US201514634932[P]. 2015-06-25.

[8] 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.

[9] ZHANG L, TU S, WANG H, et al. Composites science and technology[J]. Composites Science and Technology, 2018, 154(18): 1-7.

[10] THOMAS J P, QIDWAI S M, POGUE W R, et al. Multifunctional structure-battery composites for marine systems[J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(1): 5-26.

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

[12] QIDWAI M A, THOMAS J P, MATIC P. Structure-battery multifunctional composite design[C]// Proceeding of SPIE conference on smart structures and materials systems Industrial and commercial applications of smart structure technologies. Washington: 2002, 4698: 180-191.

[13] SENOKOS E, OU Y F, TORRES J J, et al. Energy storage in structural composites by introducing CNT fiber/polymer electrolyte interleaves[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 3407.

(下转第101页)

pitch shaped solder joint layout for flexible sheet assembly[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2016, 22(8): 1857–1866.

[12] SUNDARARAMAN K A, GUHARAJA S, PADMANABAN K P, et al. Design and optimization of machining fixture layout for end-milling operation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(5–8): 669–679.

[13] LU C, ZHAO H W. Fixture layout optimization for deformable sheet metal workpiece[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(1–4): 85–98.

[14] WANG Z Q, YANG B, KANG Y G, YANG Y. Development of a prediction model based on RBF neural network for sheet metal fixture locating layout design and optimization[J/OL]. Computational Intelligence and Neuroscience, [2016-02-23]. <http://doi.org/10.1155/2016/7620438>.

[15] 杨元, 王仲奇, 李诚, 等. 基于 SVR 的航空薄壁件夹具布局优化预测模型[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(6): 1302–1309.

YANG Yuan, WANG Zhongqi, LI Cheng, et al. Prediction model for aeronautical thin-walled part fixture layout optimization based on SVR[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(6): 1302–1309.

[16] SACKS J, WELCH W J, MITCHELL T J, et al. Design and analysis of computer experiments[J]. Statistical Science, 1989, 4(4): 409–423.

[17] NIELSEN H B, LOPHAVEN S N, SONDERGAARD J. DACE: A MATLAB Kriging toolbox. Version 2.0[M]. Denmark: Technical University of Denmark, 2002.

[18] YANG X S. Flower pollination algorithm for global optimization[C]// Unconventional Computation and Natural Computation, Lecture Notes in Computer Science, 2012.

通讯作者: 李诚, 工程师、硕士研究生, 主要研究方向为飞机数字化装配与连接、计算机辅助夹具设计, E-mail: licheng2014@nwpu.edu.cn.

(责编 大漠)

(上接第90页)

[14] THOMAS J P, QIDWAI M A. Structural power multifunctional materials for UAVs[C]// Proceeding of SPIE Conference on Smart Structures and Materials Systems. Industrial and Commercial Applications of Smart Structure technologies. Washington, 2002.

[15] 胡芸, 余威, 谢凯, 等. 多功能结构电池的制备研究[J]. 电源技术, 2010, 34(5): 439–441, 482.

HU Yun, YU Wei, XIE Kai, et al. Synthesis of multifunctional structural battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2010, 34(5): 439–441, 482.

[16] 农谷珍. 超级电容器电极材料的制备及电化学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

NING Guzhen. Preparation and electrochemical properties study of electrode materials for supercapacitors[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.

[17] 曹小卫, 吴明霞, 安仲勋, 等. 一步法腐蚀铝箔对超级电

容器性能影响[J]. 电池工业, 2012, 17(3): 143–146, 160.

CAO Xiaowei, WU Mingxia, AN Zhongxun, et al. Influence of one-step pretreatment of Al current collector in different corrosive medium on the performance of ultracapacitor[J]. Chinese Battery Industry, 2012, 17(3): 143–146, 160.

[18] 周海生. 双电层电容器电极材料及其制备工艺与性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.

ZHOU Haisheng. Electric double layer capacitor: Electrode material, preparation process and performance[D]. Changsha: Central South University, 2013.

[19] 鲁群. 超级电容器电极材料的制备及其电化学性能研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2018.

LU Qun. Preparation and electrochemical performance of electrode material for supercapacitors[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2018.

[20] 陈辉. 生物质基炭材料的设计、制备及其电化学性能研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.

CHEN Hui. Design, preparation and electrochemical properties study of bio-base carbon material[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.

[21] 张君贤. 碳纤维基复合电极材料的制备及其电化学性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2018.

ZHANG Junxian. Fabrication and electrochemical properties of carbon fiber based composite electrodes[D]. Shanghai: Donghua University, 2018.

[22] 禹兴海, 罗齐良, 潘剑, 等. 一种生物炭基柔性固态超级电容器的制备及性能研究[J]. 化工学报, 2019, 70(9): 3590–3600.

YU Xinghai, LUO Qiliang, PAN Jian, et al. Preparation and properties of flexible supercapacitor based on biochar and solid gel-electrolyte[J]. CIESC Journal, 2019, 70(9): 3590–3600.

[23] CHEN S, ZHU J W, WU X D, et al. Graphene oxide-MnO₂ nanocomposites for supercapacitors[J]. ACS Nano, 2010, 4(5): 2822–2830.

[24] TIRUYE G A, MUÑOZ-TORRERO D, BERTHOLD T, et al. Functional porous carbon nanospheres from sustainable precursors for high performance supercapacitors[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(31): 16263–16272.

[25] MA H Y, LI C, ZHANG M, et al. Graphene oxide induced hydrothermal carbonization of egg proteins for high-performance supercapacitors[J]. Journal of Materials Chemistry, 2017, 5(32): 17040–17047.

[26] NISHIJIMA S, HARA M. Mechanical influence on long-term dielectric performance of insulants[J]. Cryogenics, 1998, 38(11): 1105–1113.

[27] CARLSON T, ASP L E. An experimental study into the effect of damage on the capacitance of structural composite capacitors[J]. Journal of Multifunctional Composites, 2013, 1(2): 1–7.

[28] 闫俊岭, 户振锋. 一种固定翼太阳能飞机设计[J]. 现代信息技术, 2019(3): 160–163, 167.

YAN Junling, HU Zhenfeng. A design of fixed-wing aircraft with solar energy power source[J]. Modern Information Technology, 2019(3): 160–163, 167.

通讯作者: 吴海宏, 教授、博士, 主要从事超轻薄热塑性碳纤维复合材料及其结构-功能一体化研究, E-mail: hhwu@haut.edu.cn.

(责编 大漠)