

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005585

堆叠式微型数据采集系统抗高冲击结构设计^{*}

王红亮 董力纲 刘涛

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室 太原 030051)

摘要: 堆叠式微型数据采集系统广泛应用于航空航天试验分析、汽车安全测试、生物力学研究、车载黑匣子等,这些应用场景要求采集系统具有抗高冲击、质量轻等特点。针对该需求设计了一种新型的堆叠式抗高冲击结构。首先通过有限元建模对铝合金、炮钢、碳纤维新型复合材料下的抗高冲击结构进行了对比分析,然后针对不同壁厚下由碳纤维新型复合材料构成的结构的抗冲击能力进行了仿真,最终通过冲击实验证明了其抗冲击能力不低于4 000 G,实验结果表明该结构具备质量轻、可随意增减堆叠数量、易安装等优点。

关键词: 数据采集;抗高冲击;碳纤维;结构设计;有限元仿真

中图分类号: TH7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4015

High-impact structure design of stacked micro data acquisition system

Wang Hongliang Dong Ligang Liu Tao

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Stacked micro data acquisition systems are widely used in aerospace test analysis, automotive safety testing, biomechanics research, automotive black boxes, etc. These applications require high impact resistance and light weight. A new type of stacked high-impact resistant structure is designed in response to this requirement. First, through finite element modeling, a comparative analysis of the high-impact structure under the new composite material of aluminum alloy, gun steel, and carbon fiber was carried out. Second, the impact resistance of the structure composed of the new carbon fiber composite material under different wall thicknesses was simulated. Finally, the impact test proves that its impact resistance is not less than 4 000 G. The experimental results show that the structure has the advantages of light weight, random increase or decrease of stacking quantity, and easy installation.

Keywords: data acquisition; high impact resistance; carbon fiber; structural design; finite element simulation

0 引言

近年来,由于军事技术水平的提高,作战环境、方法及手段发生了极大的改变,因此对数据采集系统的设计有了更高的要求^[1-2]。文献[3]分别提出了圆形和方形两种抗高冲击防护结构用于保护弹载数据存储芯片,其实验表明,两种结构均具有较好的防护效果,但因其外形设计简单,内部填充缓冲材料较多,导致其无法实现较小的体积和较轻的质量。

堆叠式微型数据采集系统相比于传统的数据采集系统拥有更大的灵活性,且具备体积小、质量轻、功耗低、抗冲击能力强等优点,因此其被广泛地应用在航空航天试验分析、无人机飞行测试、汽车安全测试、爆炸测试等冲击试验^[4]。本文设计了十分灵活的堆叠式数据采集系统的结构,提高

了采集系统的抗冲击能力,减轻了系统质量,缩小了系统的体积。提出了使用新型碳纤维复合材料作为堆叠式微型数据采集系统的结构,建立了三维有限元模型,首先仿真并对比了不同材料受到相同冲击时的应力云图,其次仿真并分析了数据采集系统在不同壁厚受到不同强度的冲击下采集系统的应力云图及形变,再次对碳纤维结构做冲击试验并分析其抗冲击能力。最后搭建测试平台,对数据采集系统的碳纤维结构分别进行了非工作和工作状态下的信号测试。

1 堆叠式抗冲击结构方案设计

1.1 结构的设计

微型数据采集系统采用堆叠式结构可以提升数据采集系统的易扩展性,其结构设计难点在于要同时具有较高的

收稿日期:2020-12-22

^{*} 基金项目:山西省“1331工程”重点学科建设计划(1331KSC)资助

抗冲击能力和较轻的质量。

经过阅读大量文献和综合分析比对后,提出了如图 1 所示的新型结构。

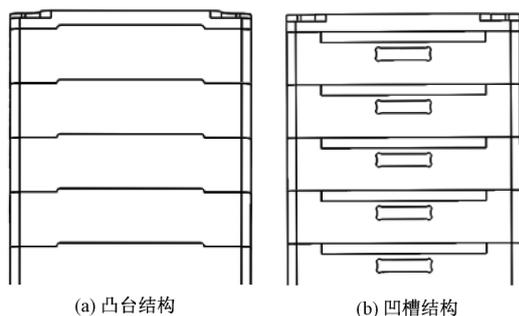


图 1 堆叠式结构

整体结构由顶盖、层间模块、底层模块组成。顶盖用于防护最高层的模块内部的电路。层间模块之间使用凸台结构和凹槽结构共同组成啮合方式,此种啮合方式不仅可以保证层间模块能够按照正确的方向安装,还可以提高整体结构的抗冲击能力。使用时,根据实际需要可随意增减层间模块的数量。

整体结构使用螺栓将此结构贯穿后旋紧在将要固定的机壳表面。当壳体受到外界的横向冲击时,贯穿螺栓会受到很大的剪切力,为了避免贯穿螺栓受到大的冲击后损坏甚至断裂,在层与层之间设计了互相啮合的结构。该结构将受到的外界冲击分散到结构的每一层,从而减小了单点受到的集中应力,增加了堆叠式数据采集器的横向抗冲击能力。

考虑到每一层中的电路板之间需要使用接插件进行数据通信,所以壳体每一层侧面安装一排接插件。安装接插件槽孔的 4 个角均设有凹槽,在凹槽内用聚氨酯结构胶填充。当壳体受到强冲击时,聚氨酯结构胶会缓冲掉大部分冲击力^[5],保证了各层的接插件不易脱落,提高了接插件的抗冲击能力。

1.2 材料的选取

使用过程中要求系统总质量低于 1 300 g,其中电路板质量为 360 g,壳体结构质量就要低于 940 g。传统的微型数据采集系统的抗冲击结构大多采用 PCrNi3MoV 炮钢、铝合金等材料。铝合金因具有易于加工、密度小、耐腐蚀等优点,被广泛应用在航空、航海、工业等领域。PCrNi3MoV 炮钢具有强度高、韧性高、抗冲击能力强的优点^[6]。

碳纤维复合材料因其具有密度小、强度高、耐高温、耐腐蚀、耐疲劳^[7]、结构尺寸稳定性好以及设计性好、可大面积整体成型等优良特点而普遍应用于航空航天器材、体育竞技产品、汽车产业、桥梁建筑产业等相关领域^[8]。碳纤维是一种含碳量在 92% 以上的高强度、高模量纤维的新型纤维材料^[9-10],它是由片状石墨微晶等有机纤维沿纤维轴向方向堆砌而成,经碳化及石墨化处理而得到的微晶石墨材

料^[11]。碳纤维的力学性能非常优异,表 1 所示为 3 种材料的常用力学属性。

表 1 3 种材料基本参数对比

参数	T700	铝合金	PCrNi3MoV
	碳纤维板		炮钢
密度	1.6	2.72	7.85
泊松比	0.3	0.33	0.29
拉伸强度/MPa	1 800	370	755
弯曲强度/MPa	1 870	113	210
剪切强度/MPa	85	210	826
压缩强度/MPa	970	305	1 140
层间剪切强度/MPa	67	无	无

由表 1 中的基本参数可以看到碳纤维的密度仅为铝合金的 2/3,炮钢的 1/5。碳纤维复合材料不仅在密度上要低于铝合金和炮钢,而且它的拉伸强度、弯曲强度等力学性能明显优于以上两种材料。

2 有限元仿真分析验证

为了获知堆叠式采集模块在实际应用中受到强冲击时的应力状态,本文使用有限元仿真的方法,观察在任意时刻结构的应力变化及其在应力极限下的形貌,为后续的分析与论证提供详细的数据。

本文首先使用 ANSYS 对设计的新型结构进行三维建模,然后对模型进行网格划分,最后对 3 种材料进行抗冲击能力仿真。三维模型和网格划分结果如图 2 所示。

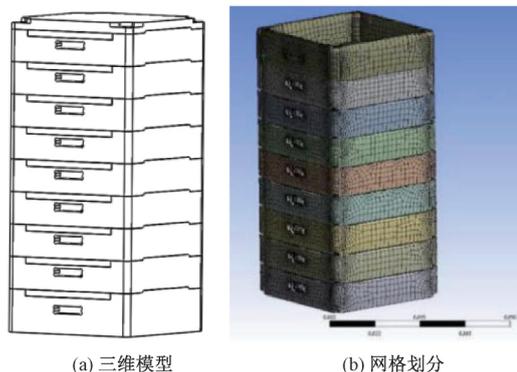


图 2 堆叠式结构三维建模

2.1 不同材料抗冲击能力仿真与分析

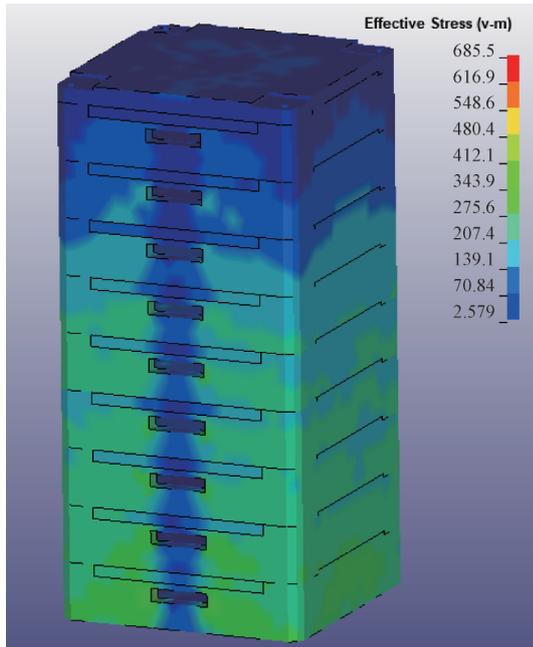
本文在壁厚为 4 mm 的条件下,分别对铝合金、炮钢、碳纤维 3 种材料进行了新型结构的抗冲击仿真与分析。3 种不同材料的相同结构应力云图如图 3 所示。

当给予壳体底面 1 000 G 冲击时,3 种壳体外观发生明显变形。通过仿真结果可知,铝合金结构受到的最大应力为 68.52 MPa,碳纤维与炮钢结构受到的最大应力分别为 53.56、124.5 MPa。由不同材料的应力云图分析可知,当

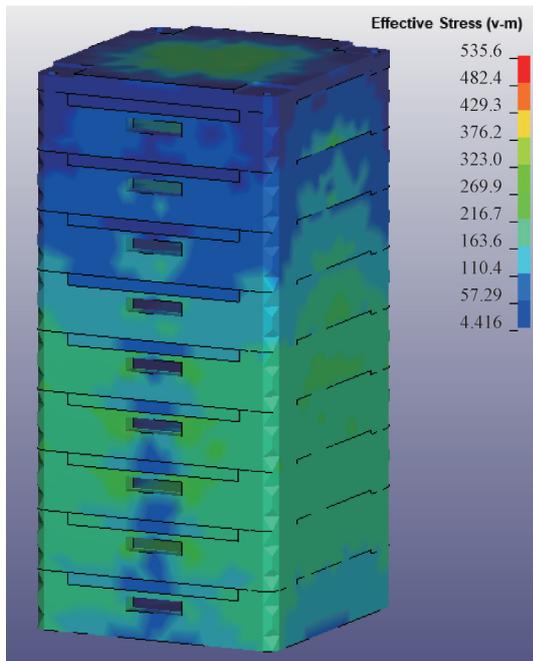
受到底部冲击时,该结构在靠近底部的位置受到的应力更大,更容易发生变形和损坏。3种材料中 T700 碳纤维复合材料的抗冲击能力最强,其最大应力为 53.56 MPa。综上所述,本文选用 T700 碳纤维作为堆叠式数据采集系统的结构材料。

2.2 不同壁厚的碳纤维结构抗冲击能力仿真与分析

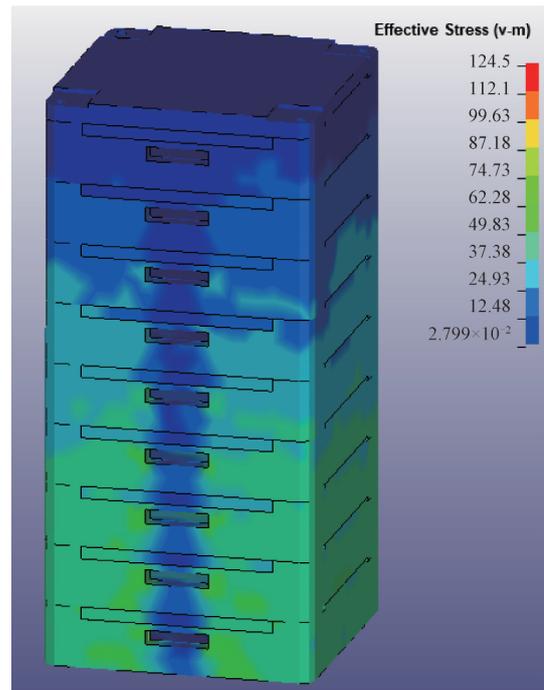
结构的壁厚是影响系统抗冲击能力的关键因素之一,壁越厚其抗冲击能力越强,但同时也会增加结构的质量。因此,需要通过分析选择壁厚,以保证在能承受最大冲击的前提下减小其重量。



(a) 铝合金



(b) 碳纤维

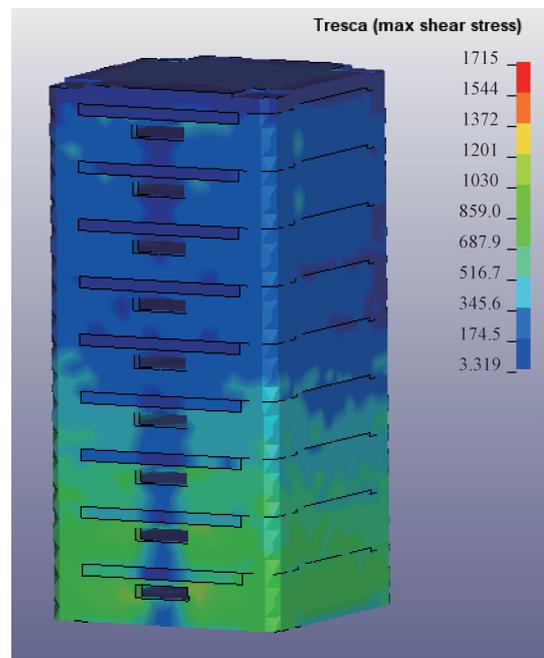


(c) 炮钢

图3 不同材料在 1 000 G 冲击下的应力云图

查阅大量资料后,得知碳纤维复合材料属性,在 ANSYS 中建立薄壁壳体的三维模型和材料库,确定了碳纤维结构壁厚分别为 4、3、2 mm 作为仿真分析的变量。设置仿真条件为对结构底部施加 1 000 G 冲击。不同壁厚下的仿真剪切应力云图如图 4 所示。

通过仿真得知,堆叠结构在壁厚为 4 mm 时的高应力区域间剪切力为 17.15 MPa,3.91 倍安全系数;在壁厚为



(a) 4 mm 壁厚

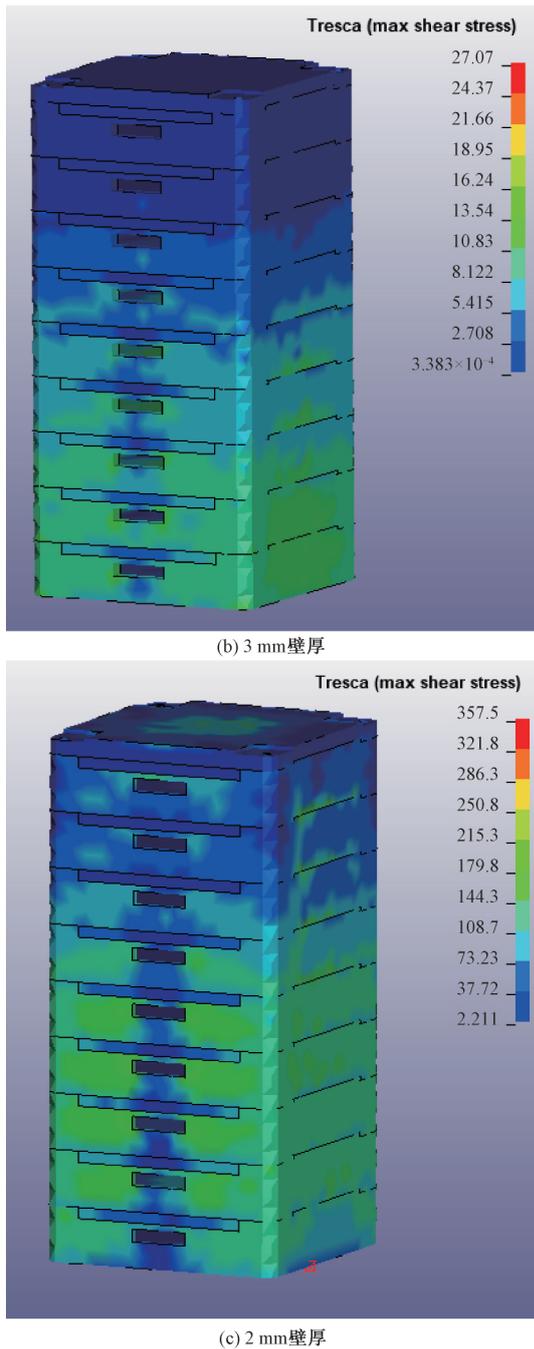


图 4 不同壁厚在 1 000 G 冲击下的剪切应力云图

3 mm 时,层间剪切力为 27.07 MPa,2.48 倍安全系数;在壁厚为 2 mm 时,高应力区层间剪切力为 35.73 MPa,1.87 倍安全系数。

考虑到随着使用周期的增长碳纤维结构会有一些的性能下降,以及其他特殊情况。为了确保在实际应用中堆叠模块的正常工作,最终选择壁厚 4 mm 的结构。

综上所述,对不同壁厚堆叠模块的碳纤维结构分别进行了 1 000 G 的冲击仿真。当壁厚设为 4 mm,受到 1 000 G 冲击时,抗冲击结构安全系数最高。

3 堆叠式碳纤维结构加工工艺

3.1 碳纤维工艺简介

目前,碳纤维复合材料成型主要的工艺有层压成型、缠绕成型、拉挤成型、真空热压罐成型、真空导入成型、高温模压成型等^[12]。以上列出的成型工艺都有其各自的优缺点。

层压成型工艺是复合材料的一种开口模压成型方法,这种工艺发展比较早,也较成熟,其特点是制品质量高,工艺过程稳定,模具投资少,其缺点是只能生产平板、曲板等^[13]。缠绕成型工艺具有高强度、高模量、低密度的特点,此种工艺因其具有缠绕的特点而大被用于制造圆柱体、球体及某些正曲率回转体或筒形碳纤维制品等^[14]。拉挤成型工艺适合制作各种形状规则的产品。例如工业生产过程中常用的工字型、角型、槽型以及通过上述形状构成的各种型材等。真空热压罐成型工艺是一种利用热压罐设备在高压下成型复合材料的一种工艺方法^[15]。此种工艺具有强度高、精度高、质量轻、受环境影响小、利于批量化等优点,适用于批量化、标准化的制件生产。

3.2 模压成型工艺

由于堆叠式抗冲击结构体积较小,且内部结构细小复杂,所以选择可以高精度的模压成型工艺。其工艺流程如图 5 所示。

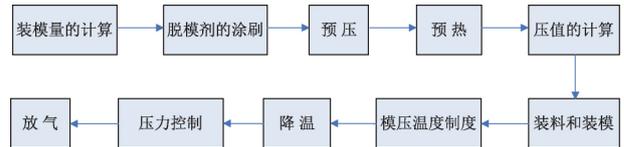


图 5 模压成型工艺流程

碳纤维模压成型时将经预混或预浸的碳纤维模压料投入到模具中,在一定的温度和压力下成型碳纤维复合材料制品^[16]。碳纤维复合材料采用的树脂一般为热固性树脂,其中热固性树脂在模压成型加工中呈现流变行为,并伴随着化学反应。在加热一段时间后,物料会具有一定的粘度,同时具备了一定的流动能力,随着物料中的官能团的一系列反应的进行,官能团中的一部分发生交联,此时,物料流动性渐渐变差,此时的物料具有一定程度的弹性,这会使得物料变得具有胶体的性状。继续加热,交联反应不断发生,交联度增大,转化为玻璃态并固化,产品成型。

模压成型过程中需要控制的主要因素有 3 个^[17]:温度、压力及时间。

温度对需要成型物料的融化、流动、填充等性质具有决定性作用。温度是决定成型质量的最主要因素。模压成型过程中的腔内压力决定了物料成型后的整体密度,但是压力要控制在一定范围内,过小会导致成型后产品密度变小,强度变差,反之会使产品内部应力变大,遇冷或遇热导致产品变形或者变脆。时间是决定物料是否完全填充或者冷却过程是否合理的决定性因素。时间过短,物料来不及流动

就开始降温,导致成型不完全。

4 试验结果及分析

本文设计的结构选用 T700 碳纤维复合材料制造,采用模压成型工艺加工而成。根据应用场景要求,一个完整的堆叠结构,包括数据采集电路部分总重量为 720 g,其中碳纤维结构仅重 340 g。实验过程中使用下落式冲击台来验证结构的抗冲击能力,并分别在非工作状态和工作状态进行测试。

实验过程中,使用冲击台产生相应的冲击。冲击台由滑动导轨、活塞拉杆、工作台、气缸、底座、气囊、阻尼器、波形发生器等组成。实验时,对气缸充一定量的气体,气缸内的活塞伸出,通过活塞拉杆将工作台提升至一定的高度,然后由计算机控制对气缸放气,工作台顺着滑轨掉落,完成一次冲击试验。冲击台的减震装置由底座、气囊和阻尼器组成,用于减小实验时试验台作用在地基上的冲击力,以防冲击过大损坏地基。

本文设计抗高冲击结构的最终目的是保护采集系统的电路板及其他组件。微型数据采集系统的电路部分使用中北大学仪器与电子学院研制的一款军用某型号分布式微型数据采集系统。将电路板等组件合理地安装在此结构内部,电路板与结构外壳之间采用螺钉进行固定。

分布式微型数据采集系统将相同接口的传感器通过数据采集模块进行采集,单模块通道数为 3~6 个通道,可以根据需要选择不同的模块进行扩展。使用控制模块实现对采集模块的控制和管理,该数据采集系统具备数据存储和传输功能。通过 USB 或网口与计算机通信,模块之间通过板间连接器实现基于 LVDS 电平的数据总线通信。分布式微型数据采集系统总体结构如图 6 所示。

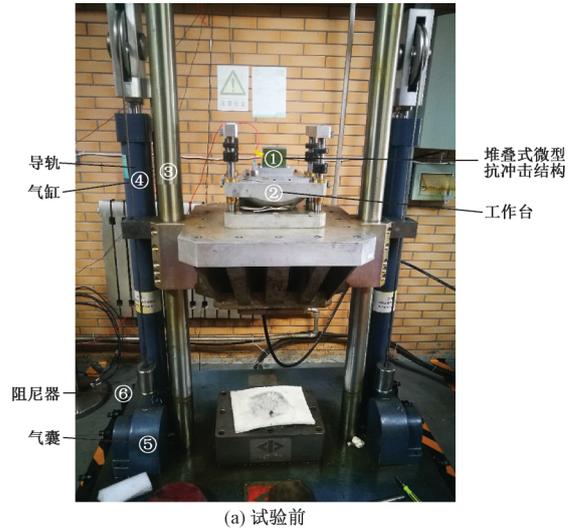


图 6 堆叠式数据采集系统组成结构

4.1 非工作状态下的试验结果

实验前,选用 3 个数采模块和 1 个控制模块组合的采集系统进行非工作状态下的冲击试验。根据冲击需求设定合适的冲击高度,将测试件以及传感器安装在冲击设备的工作台上。实验时,计算机控制气缸充气,活塞拉杆伸出,

工作台提升,当提升到设定高度时,计算机控制气缸快速放气,工作台由计算机设定的高度顺着滑轨自由跌落,工作台底面撞击冲击台底部的波形发生器,完成一次冲击过程。非工作状态下的测试平台如图 7 所示。



(a) 试验前



(b) 试验后

图 7 非工作状态下的测试平台

从以上的冲击过程可以看出,通过调节工作台的跌落高度,可以得到不同的冲击初始速度,从而得到不同的冲击过载值。而改变波形发生器的高度,可以得到不同的脉冲宽度值,两者协调配合,可以得到满足设计指标要求的各种冲击试验波形。

分别对安装好的堆叠模块进行 1 000 和 4 000 G 的冲击试验。首先进行参数设置,设置采样频率为 192 K,试验波形采用半正弦波,标准脉冲宽度为 0.1 ms。当冲击高度为 450 mm 时,对应碳纤维结构受到 1 000 G 冲击,工作台第一次接触到减震装置时冲击达到波峰值 1 200 G,随后逐渐衰减的波形代表着工作台对减震装置的不断作用。1 000 G 冲击实验时,冲击台测得的冲击信号时域谱如图 8 所示。

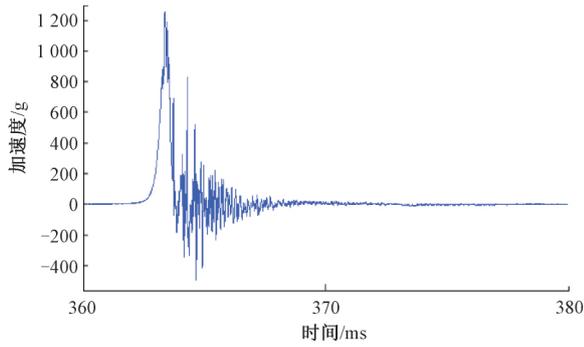


图 8 1 000 G 冲击信号时域谱图

当冲击高度调至 700 mm,进行 4 000 G 试验,采集系统受到 4 000 G 冲击。4 000 G 冲击实验时,冲击台测得的冲击信号时域谱如图 9 所示。

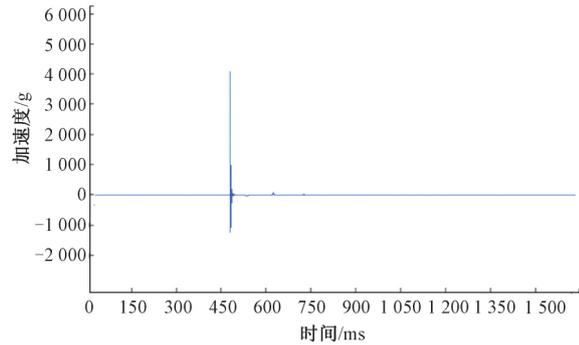


图 9 4 000 G 冲击信号时域谱图

多次重复试验后,给采集系统上电并通过上位机控制采集系统采集正弦波信号。单通道采集的典型正弦信号如图 10 所示。经全面测试,碳纤维结构无形变及裂痕,内部电路板无损坏,结构完整,工作正常,性能稳定。

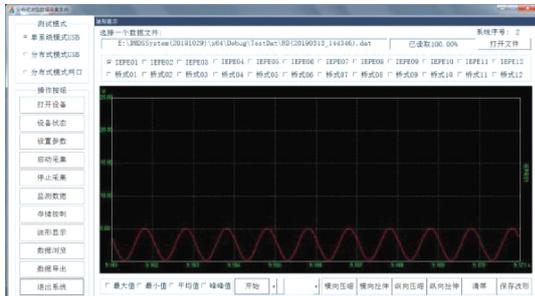


图 10 非工作状态下单通道信号

4.2 工作状态下的试验结果

工作状态下的测试平台由堆叠式微型数据采集与记录系统结构、信号源、电源、示波器、计算机、冲击台等搭建。工作状态下的测试平台如图 11 所示。

信号源用于给各采集模块产生指定波形的待采信号,示波器用于显示信号源的原始波形信息,用于与采集系统采集到的的信号做对比,电源用于给整个系统供电,计算机用于控制采集系统工作状态。系统中,各采集模块具备外



图 11 工作状态下的测试平台

部接口,用于连接传感器和信号源,传输控制模块外部接口中包含电源接口(控制传输模块有电源输出口,给各采集模块提供电源)、USB3.0 信号接口以及硬件触发信号接口。本系统共有 24 个通道,图 12 为工作状态前 3 个通道测试结果,显示性能稳定。

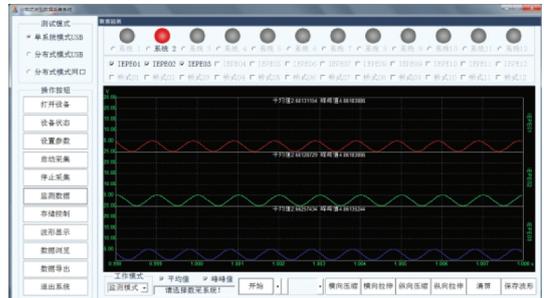


图 12 工作状态前三通道信号

除使用标准信号源作为采集系统的输入信号外,还使用了 IEPe 类型加速度传感器作为输入信号用以验证此堆叠系统的抗冲击特性。测试过程中,使用了同一型号下的 3 种不同量程的加速度传感器分别连接到此系统的前 3 个通道,再将这 3 个传感器固定到同一物体上,然后施加外部冲击达到激励传感器的目的。图 13 所示为 3 个通道的测试结果,表明测试过程中,采集系统能够正常运行,性能稳定。



图 13 工作状态 3 个通道采集到的数据

5 结 论

本文设计了易扩展的堆叠式微型数据采集系统抗高冲击结构。通过理论分析、有限元仿真,确定了碳纤维在抗冲击能力、质量大小等方面明显优于铝合金和炮钢。设计了4 mm 壁厚的碳纤维新型结构。此结构可以承受4 000 G 的冲击而不损坏,且堆叠质量仅为340 g。通过冲击试验验证了数据采集系统在非工作状态下电路板结构完整,工作状态下可以正常采集信号,系统工作正常,性能稳定。

参考文献

- [1] 胡晓峰. 堆叠式微型数据采集系统关键技术研究[D]. 太原:中北大学,2017.
- [2] 田罗文,王鹏. 高冲击空气炮试验中弹丸速度数据融合研究[J]. 国外电子测量技术,2018,37(10):47-50.
- [3] 王艳. 抗高过载记录仪防护结构的设计及优化[D]. 太原:中北大学,2020.
- [4] 卢振国,王红亮,胡晓峰. 一种通道可扩展的堆叠式数据采集系统设计[J]. 中国测试,2018,44(3):91-96.
- [5] 于波涛,管雪元,姜博文. 炮膛内高过载环境力测量系统设计[J]. 电子测量技术,2019,42(1):59-62.
- [6] 胡士廉,韦航标,胡俊,等. 高强韧炮钢热塑性变形应力-应变本构模型及锻造仿真研究[J]. 兵器材料科学与工程,2019,42(1):87-89.
- [7] 葛继文,陈旭,崔健,等. 碳纤维复合材料机箱及其核电磁脉冲防护性能[J]. 中国设备工程,2020(24):98-101.
- [8] 赵晓青. 碳纤维复合材料回收再利用的现状分析[J]. 化工设计通讯,2020,46(10):30-31.
- [9] 徐樛华. 高性能 PAN 基碳纤维国产化进展及发展趋势[J]. 中国材料进展,2012,31(10):7-13,20.
- [10] 罗益锋,罗晰旻. 低成本聚丙烯腈基碳纤维的创新展[J]. 新材料产业,2017(8):33-37.
- [11] 罗益锋. 主要高性能纤维及其复合材料的创新发展与研发方向[J]. 高科技纤维与应用,2020,45(6):1-16.
- [12] 花银群,肖淘,薛青,等. 激光切割碳纤维复合材料的实验研究[J]. 激光技术,2013,37(5):565-570.
- [13] 周春华,刘威,李学闵,等. PA 纤维/环氧树脂超混杂复合材料的层压成型工艺[J]. 玻璃钢/复合材料,1998(3):3-5.
- [14] 孙波. 复材成型工艺用热压罐的压力真空测量系统分析[J]. 计量与测试技术,2019,46(4):87-90.
- [15] 王召召,潘利剑,庄恒飞,等. 热压罐/真空辅助组合工艺成型复合材料及其质量评价[J]. 航空制造技术,2016(Z2):78-81.
- [16] 谢久明,周学均,武晋,等. 碳纤维增强复合材料模压成型质量预测综述[J]. 机械设计,2020,37(S1):112-114.
- [17] 刘宾宾. 碳纤维汽车零部件快速模压成型工艺及其结构与性能研究[J]. 合成纤维工业,2020,43(4):7-10.

作者简介

王红亮,教授,博士生导师,主要研究方向为测试系统集成、微纳器件与系统、超声换能器及超声系统等。

E-mail:928628316@qq.com

董力纲,硕士研究生,主要研究方向为高速数据采集与处理、测试系统集成等。

E-mail:dlg_small_bulb@163.com

刘涛,博士研究生,主要研究方向为传感器设计与制造。

E-mail:775168227@qq.com