

# 用于航天电子设备的 PMI 泡沫夹层结构力学性能试验验证

王东<sup>1</sup>, 方伟<sup>1</sup>, 方勇<sup>2</sup>, 卢健钊<sup>1</sup>, 毛敏梁<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第十研究所, 成都 610036;

2. 浙江中科恒泰新材料科技有限公司, 绍兴 312369)

**摘要:** 针对应用于空间站的我国首个航天综合一体化电子系统设备的减重需求, 通过试验验证了碳纤维/PMI/碳纤维、铝合金/PMI/铝合金 2 种 PMI 泡沫夹层结构的物理及力学性能, 并与航天电子设备中常用的铝合金、碳纤维结构进行对比分析。研究表明, 相比于铝合金结构, PMI 泡沫夹层结构具有显著的减重效果以及良好的阻尼和比刚度特性, 平均减重比约为 40%, 力学响应量级降低了 40%~50%, 为空间站电子设备的轻量化设计奠定了基础。

**关键词:** PMI 泡沫; 夹层结构; 航天电子设备; 轻量化设计; 试验验证

中图分类号: TB303; TQ328

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2020)01-0095-07

DOI: [10.12126/see.2020.01.015](https://doi.org/10.12126/see.2020.01.015)

## Experimental verification of mechanical properties for PMI foam sandwich structure on aerospace electronic equipment

WANG Dong<sup>1</sup>, FANG Wei<sup>1</sup>, FANG Yong<sup>2</sup>, LU Jianzhao<sup>1</sup>, MAO Minliang<sup>2</sup>

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;

2. Zhejiang Cashem Advanced Materials Hi-tech Co. Ltd., Shaoxing 312369, China)

**Abstract:** In view of the light weight requirement of the first integrated aerospace electronic equipment to be used in China's space station, the performances of two types of PMI foam sandwich structures, the TP and LP structures, are studied by tests with respect to their physical and mechanical properties. A comparative analysis is made between the performances of each sandwich structure and its corresponding basic material, i.e. the simple aluminum alloy or carbon fibers. It is concluded that the PMI foam sandwich structure has better damping and specific stiffness characteristics, with a reduction of 40% of the average weight, and a cut down of the mechanical response by 40 to 50 per cent. The results provide a foundation for the design of light weight space station electronic equipment.

**Keywords:** PMI foam; sandwich structure; aerospace electronic equipment; light weight design; test validation

收稿日期: 2019-04-18; 修回日期: 2020-01-17

基金项目: 中国电子科技集团公司第十研究所技术创新基金项目

引用格式: 王东, 方伟, 方勇, 等. 用于航天电子设备的 PMI 泡沫夹层结构力学性能试验验证[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(1): 95-101

WANG D, FANG W, FANG Y, et al. Experimental verification of mechanical properties for PMI foam sandwich structure on aerospace electronic equipment[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(1): 95-101

## 0 引言

PMI 泡沫是 100% 的闭孔硬质泡沫, 具有低密度、高比强度、高比模量、各向同性以及良好的加工性、热稳定性和耐化学腐蚀性能, 已经广泛应用于航空航天、兵器、船舶、轨道交通、医疗设备、体育器材等领域, 例如, 飞机的桨叶、尾翼、机身壁板、后压力框等, 以及运载火箭的整流罩、中间段、贮箱等<sup>[1-6]</sup>。虽然国外在多年前就将泡沫夹层结构广泛应用于航天器, 但国内航天领域对泡沫夹层结构的应用起步较晚, 目前仅仅局限于运载火箭结构中, 而在空间站、卫星等长期驻守的空间平台尤其是其中的电子设备中鲜有应用。

本文针对应用于空间站的我国首个航天综合一体化电子系统设备的减重需求, 选取 PMI 泡沫作为夹层结构的芯材, 制备了碳纤维/PMI/碳纤维结构、铝合金/PMI/铝合金结构; 并以该电子设备在发射阶段需要承受的随机振动试验量级为试验条件, 对它们的力学性能进行试验验证, 并与铝合金结构、碳纤维结构进行对比, 以探寻 PMI 泡沫夹层结构在空间站电子设备中的应用前景。

## 1 PMI 泡沫材料的性能

在世界范围内的 PMI 泡沫市场上, 德国赢创德固赛公司生产的 ROHACELL<sup>®</sup> 系列和日本积水化学公司生产的 FORMAC<sup>®</sup> 系列 PMI 泡沫占据了主导地位。在国内, 四川大学、西北工业大学、中国科学院化学研究所、中航工业复合材料技术中心、黑龙江石油化工研究院、湖南塑料研究所等高校和科研院所所在 PMI 泡沫研制方面开展了大量工作, 并与民营企业合作, 形成了具有自主知识产权的 PMI 泡沫产品。其中, 与中国科学院化学研究所合作创办的浙江中科恒泰新材料科技有限公司已经研发了 Cascell<sup>®</sup> WH、RS、HF、IH 等 4 个系列 10 余种 PMI 泡沫产品, 具有年产  $10^5 \text{ m}^3$  的规模; 中航工业复合材料技术中心与福建浩博新材料科技有限公司合作, 成功研制出了 ACCPMI<sup>®</sup> 系列 PMI 泡沫材料, 具备年产  $3000 \text{ m}^3$  的生产能力<sup>[7-8]</sup>。且 Cascell<sup>®</sup> WH 系列和 ACCPMI<sup>®</sup> 系列产品的性能均不同程度地优于 ROHACELL<sup>®</sup> WF/WF-HT 系列产品<sup>[9]</sup>。表 1 所示为 Cascell<sup>®</sup> WH 系列、ACCPMI<sup>®</sup> 系列、ROHACELL<sup>®</sup> WF/WF-HT 系列产品的基本力学性能对比。

表 1 Cascell<sup>®</sup>WH 系列、ACCPMI<sup>®</sup>系列、ROHACELL<sup>®</sup>WF/WF-HT 系列 PMI 泡沫的基本力学性能对比  
Table 1 Basic mechanical properties of Cascell<sup>®</sup>WH, ACCPMI<sup>®</sup>, ROHACELL<sup>®</sup>WF/WF-HT series PMI

型号	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	压缩强度/ MPa	拉伸强度/ MPa	弹性模量/ MPa	剪切强度/ MPa	剪切模量/ MPa
Cascell-50WH	50±10	0.88	1.65	79	0.80	30
ACCPMI-51	52±5	1.00	2.00	82	0.80	32
ROHACELL-51WF	52±12	0.40	0.90	45	0.50	14
Cascell-75WH	75±10	1.75	2.25	108	1.30	50
ACCPMI-71	75±7	1.80	2.90	122	1.20	52
ROHACELL-71WF	75±15	1.05	1.56	75	1.00	24
Cascell-110WH	110±10	3.55	3.60	185	2.40	85
ACCPMI-110	110±11	3.50	4.10	181	2.30	75
ROHACELL-110WF	110±21	2.20	2.54	135	1.75	40

本文选用 Cascell<sup>®</sup> 110WH 系列 PMI 泡沫作为空间站电子设备夹层结构的芯材。除表 1 所示的力学性能外, Cascell<sup>®</sup> 110WH 系列 PMI 泡沫在航天电子设备上应用时应予关注的其他性能如表 2 所示。

对于在真空环境中使用的电子设备, 除表 1 和表 2 所示的性能外, 材料的放气性能将直接关系到其是否符合应用要求。因为材料释放出的物质会

沉积在光学部件、热控面板、太阳能电池阵等敏感表面上, 造成表面污染, 严重时会降低观测窗和光学镜头的透明度、改变热控涂层的性能、降低太阳能电池片的光吸收率等。为了避免材料在真空环境下放气对航天器部组件造成污染, 一般对航天器用结构材料的放气性能要求为<sup>[10]</sup>: 总质量损失 < 1%; 收集的可凝挥发物 < 0.1%。

表 2 Cascell<sup>®</sup>110WH 系列 PMI 泡沫性能参数  
Table 2 Properties of Cascell<sup>®</sup>110WH series PMI

参数名称	数值	备注
断裂伸长率/%	2.4	
热膨胀系数/K <sup>-1</sup>	2.99×10 <sup>-5</sup>	130~180 °C
热导率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.038~0.041	
热变形温度/°C	≥200	
吸湿率/%	3.4	试验前经过130 °C/4 h 热处理, 环境温度25 °C, 相对湿度55%
压缩蠕变率/%	≤1.5	180 °C/0.3 MPa/2 h

按照 QJ 1558B—2016<sup>[11]</sup> 标准对 Cascell<sup>®</sup>110WH 试样及胶膜进行了真空放气试验, 试验结果见表 3, 其中 TML 为真空总质量损失, CVCM 为收集到的可凝挥发物, WVR 为水气回吸量。

表 3 Cascell<sup>®</sup>110WH 系列 PMI 泡沫及胶膜的真空放气性能

Table 3 Vacuum outgassing performances of Cascell<sup>®</sup>110WH series PMI and glues

材料牌号	TML/%	CVCM/%	WVR/%
PMI泡沫110WH	2.51	0.01	2.56
胶膜J-47	0.97	0.01	0.62
胶膜SJ-2A	0.82	0.04	0.71

由表 3 可知: PMI 泡沫的 TML > 1%, 但通过比较 WVR 发现, 其质量损失主要是泡沫内部水气蒸发的结果, 且 CVCM < 0.1%, 满足 QJ 20290—2014<sup>[12]</sup> 中关于非敏感表面附近航天器用非金属材料的评价指标; 2 种胶膜的 TML 和 CVCM 指标均满足航天器用材料要求。

## 2 PMI 泡沫夹层结构设计

根据固体力学理论, 板的弯曲刚度与其厚度的 3 次方成正比, 厚度越大, 板的刚度也就越大, 但质量也随之增大。而图 1 所示的蒙皮+PMI 泡沫的夹层结构能在保证结构整体刚度和尺寸的前提下减小结构的整体质量, 提高结构比刚度<sup>[13-16]</sup>。

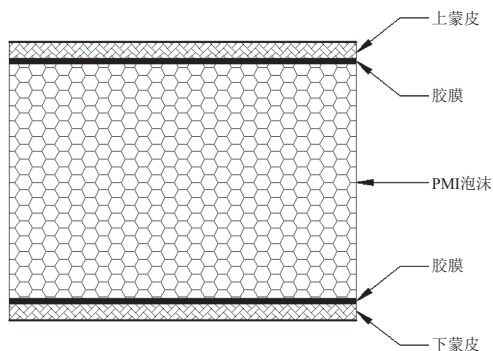


图 1 PMI 泡沫夹层结构形式示意

Fig. 1 The sandwich structure of PMI foam

本文选用 Cascell<sup>®</sup>110WH 系列 PMI 泡沫作为芯材, 3K 斜纹碳纤维布/环氧树脂作为预浸料用于上下蒙皮层制备(或用铝板作为上下蒙皮); 阻燃型纤维层压板用于预埋件和封边材料制备; J-47 胶膜用于 PMI 泡沫与预埋件的黏结; SJ-2A 结构胶膜用于 PMI 泡沫与蒙皮的黏结。PMI 泡沫芯材厚度为 4.2 mm, 3K 斜纹碳纤维布蒙皮(或铝板)的厚度为 0.3 mm, 胶膜层厚度为 0.1 mm。

## 3 实物研制

为了比较 PMI 泡沫夹层结构与目前航天电子产品中常用的碳纤维结构、铝合金结构的减重性能和动力学性能, 本文分别采用碳纤维/PMI 泡沫/碳纤维(TP)、铝/PMI 泡沫/铝(LP)、碳纤维(TX)、铝合金(AL)4 种结构形式, 设计制作了空间站某电子设备机箱的前面板、后面板、上盖板、下盖板、大侧盖板及小侧盖板共 6 种结构件(见图 2), 它们的最大外形尺寸为 588 mm(长)×382 mm(宽)×5 mm(厚)。其中, 铝合金结构和碳纤维结构采用局部加强方式, 前面板需要安装光电连接器, 故非加强区域厚度为 1.5 mm, 其他面板和盖板的非加强区域厚度为 1 mm。

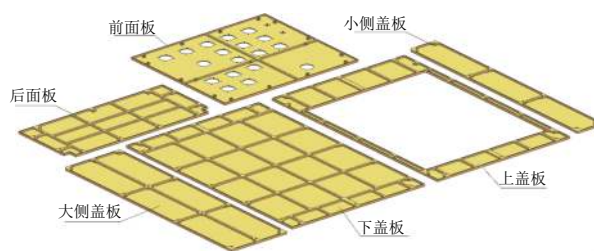


图 2 机箱结构件示意

Fig. 2 Schematic diagram of the cabinet structures

## 4 性能测试

### 4.1 减重效果测试

对制作出的机箱结构件进行质量测量, 以对比不同结构形式的减重效果。以铝合金结构形式的质量数据为基准, 其他 3 种结构形式的减重效果如表 4 所示。

由表 4 可见, 碳纤维/PMI 泡沫/碳纤维结构、铝/PMI 泡沫/铝结构、碳纤维结构均具有较好的减重性能, 平均减重比分别为 42%、37%、37%。

表4 各种结构形式的减重效果对比

Table 4 Comparison of weight reduction for four kinds of structures

结构件名称	AL结构 质量/g	TP结构		LP结构		TX结构	
		质量/g	减重比/%	质量/g	减重比/%	质量/g	减重比/%
前面板	520	323	38	341	34	339	35
后面板	308	162	47	179	42	188	39
上盖板	334	196	41	211	37	199	40
下盖板	830	434	48	463	44	430	48
大侧盖板	341	201	41	223	35	227	33
小侧盖板	163	103	37	114	30	124	24

## 4.2 动力学性能测试

为了比较各类结构件的动力学性能,本文采用随机振动试验进行力学响应分析。

### 4.2.1 试验平台搭建

试验采用苏州苏试试验公司的 DC-20000-200 系列 200 kN 电动振动系统,将各类结构件分别装夹在振动试验台上,并在结构件的适当位置布设 Dytran3224A1 系列单轴向压电式加速度传感器,测量结构件的振动响应;用美国 Data Physics 公司的 DP730 系列 16 通道便携式动态信号分析仪及其自带的信号分析处理软件进行信号采集处理。

### 4.2.2 测试方法

试验所使用的夹具依据某电子设备实际结构形式进行制备,以模拟各结构件的真实安装环境,夹具下侧的平板用于和试验台面的固定,各结构件通过 M4 不锈钢沉头螺钉固定在振动夹具上。在夹具和结构件上均布置了力学测点,测试采用多点激励、单点响应的原理进行。其中  $z$  向试验的力学响应测点布局如图 3 所示:L1 和 L2 测点位于上盖板上,L3 测点位于下盖板上,J1、J6、J7 测点位于夹具下部四角处,J2、J4、J5 位于夹具上端四角处,J3 位于夹具上端中部。

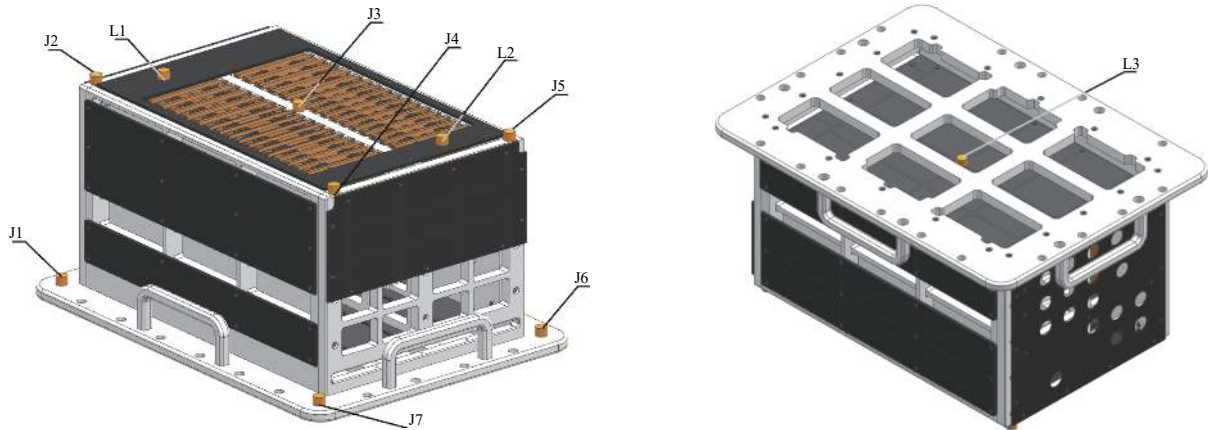


图3 力学响应测点布局示意

Fig. 3 Locations of the mechanical response measurement points

根据该电子设备需要经历的发射过程确定振动试验条件为总均方根加速度  $7.5g_{rms}$ ,持续时间 180 s,振动加载条件详见表 5。

表5 振动试验条件

Table 5 The vibration test conditions

频率范围/Hz	加速度功率谱密度
10~50	+3 dB/oct
50~300	$0.15 g^2/Hz$
300~1200	-12 dB/oct
1200~2000	$0.0006 g^2/Hz$

### 4.2.3 试验结果

各种结构形式结构件上同一测点的力学响应对比如图 4 所示,从图中给出的 L1 和 L3 测点的响应数据来看:铝/PMI 泡沫/铝结构、碳纤维/PMI 泡沫/碳纤维结构的响应量级较小,碳纤维结构和铝合金结构的响应量级较大;碳纤维结构的一阶频率最低、铝合金结构的一阶频率稍高、铝/PMI 泡沫/铝结构和碳纤维/PMI 泡沫/碳纤维结构的一阶频率较高。

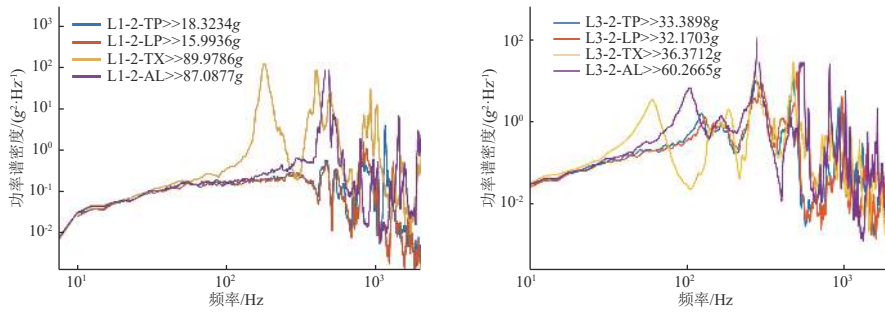


图 4 各种结构形式实物上同一测点力学响应对比

Fig. 4 Mechanical response at the same test point for four structural forms

为了对比各结构件在试验前后的响应变化,在鉴定级随机振动试验前后均进行了 10~2000 Hz 频率范围内加速度功率谱密度恒为 0.001 g<sup>2</sup>/Hz

的特征扫描,响应曲线如图 5~图 8 所示(以 L1 和 L3 两测点为代表,图中蓝色曲线为试验前的,红色曲线为试验后的)。

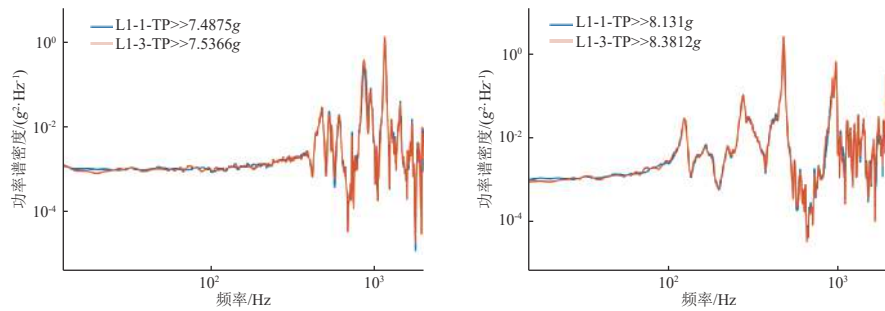


图 5 碳纤维/PMI 泡沫/碳纤维结构试验前后扫频随机振动响应数据对比

Fig. 5 Dynamic response of TP structure before and after sweep random vibration

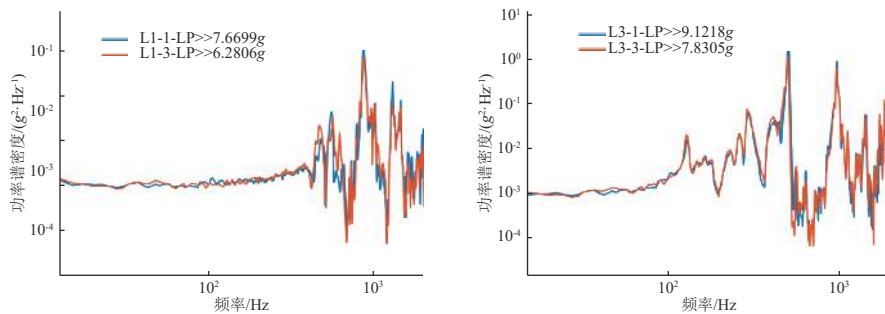


图 6 铝/PMI 泡沫/铝结构试验前后扫频随机振动响应数据对比

Fig. 6 Dynamic response of LP structure before and after sweep random vibration

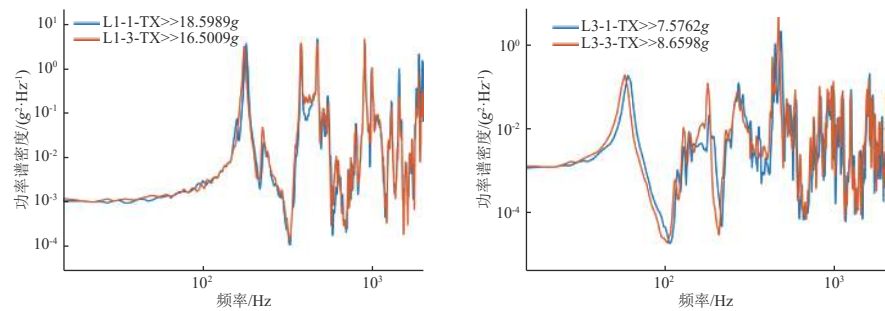


图 7 碳纤维结构试验前后扫频随机振动响应数据对比

Fig. 7 Dynamic response of carbon fiber structure before and after sweep random vibration

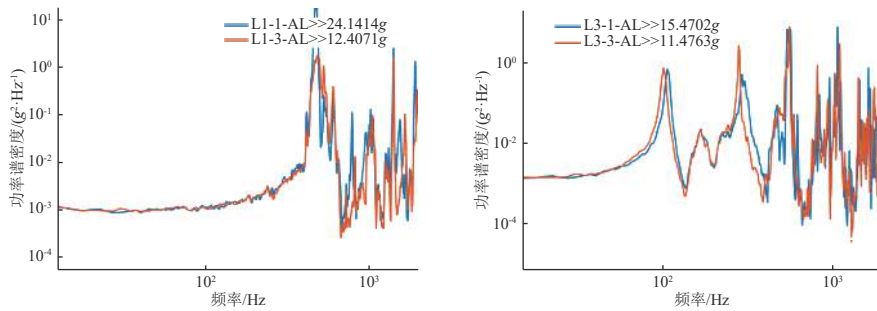


图 8 铝合金结构试验前后扫频随机振动响应数据对比

Fig. 8 Dynamic response of aluminium alloy structure before and after sweep random vibration

从 4 种结构形式结构件在试验前后的扫频随机振动响应数据来看,碳纤维/PMI 泡沫/碳纤维结构、铝/PMI 泡沫/铝结构在响应量级、各阶频率点上均十分接近,而碳纤维结构和铝合金结构的频率点发生了偏移,响应量级的变化较大。

为了测试温度冲击对 PMI 泡沫夹层结构的影响,在力学测试后,对碳纤维/PMI 泡沫/碳纤维结构、铝/PMI 泡沫/铝结构、碳纤维结构的结构件进行了温度冲击试验,试验条件见表 6。

表 6 温度冲击试验条件

Table 6 Temperature shock test condition

低温/°C	-55
高温/°C	+70
变温速率/(°C·min <sup>-1</sup> )	≥10
循环次数	25.5
极端温度持续时间/min	60

为了对比各结构件在温度冲击试验后的力学响应变化,再次进行了 10~2000 Hz 频率范围内加速度功率谱密度恒为 0.001 g<sup>2</sup>/Hz 的特征扫描,各结构件的响应曲线与图 5~图 8 中鉴定随机振动试验后的扫频振动数据几乎一致。由此可见,温度冲击对 PMI 泡沫结构件的基本力学性能没有影响。

## 5 结束语

本文以空间站某电子设备用结构件为依托,设计制备了碳纤维/PMI 泡沫/碳纤维、铝/PMI 泡沫/铝夹层结构件,并将它们与碳纤维和铝合金结构件进行对比测试,包括质量测量、力学试验测试、温度冲击试验测试,结果表明:这 2 种 PMI 泡沫夹层结构具有显著的减重效果,相比于铝合金结构件,减重约 40%;具有较高的阻尼和比刚度特性,相比于铝合金结构件,力学响应量级降低 40%~50%;具备适应高低温冲击的能力。此外,通过真空出气性能测试,验证了 PMI 泡沫夹层结构所用的 PMI 泡沫

芯材和胶膜能够满足航天器非敏感表面附近的使用要求。

本文的研究内容,为空间站电子设备的轻量化设计奠定了基础,对扩大 PMI 泡沫材料的应用范围具有指导意义。

### 参考文献 (References)

- 贾欲明, 韩全民, 李巧. 泡沫夹层结构在飞机次承力结构中的应用[J]. 航空制造技术, 2009(增刊 1): 8-12  
JIA Y M, HAN Q M, LI Q. Application of foam sandwich structure in aircraft secondary load-carrying structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(sup1): 8-12
- 胡培, 陈秀华. PMI 泡沫夹芯结构在 A380 后压力框上的应用[J]. 航空制造技术, 2009(15): 46-49  
HU P, CHEN X H. Application of PMI sandwich structure on A380 pressure bulkhead[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(15): 46-49
- 高丽红, 杨利. 某型飞机用 PMI 泡沫夹层复合材料的设计[J]. 航空工程进展, 2010, 1(4): 374-378  
GAO L H, YANG L. Design of PMI foam plastic sandwich composite for the airplane[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010, 1(4): 374-378
- 赵锐霞, 尹亮, 潘玲英. PMI 泡沫夹层结构在航天航空工业的应用[J]. 宇航材料工艺, 2011, 41(2): 13-16  
ZHAO R X, YIN L, PAN L Y. Application of polymethacrylimide(PMI) foam cored sandwich structure in aerospace industry[J]. Aerospace Material Technology, 2011, 41(2): 13-16
- 马立, 刘芃, 胡培. PMI 泡沫材料在航天器结构中应用的可行性研究[J]. 航天器环境工程, 2010(2): 164-168  
MA L, LIU P, HU P. Feasibility research of PMI foam in spacecraft structure[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010(2): 164-168

- [6] 李照谦, 南博华, 何腾锋, 等. 新一代运载火箭贮箱大温差泡沫夹层共底研制[J]. *宇航材料工艺*, 2016(4): 68-72  
LI Z Q, NAN B H, HE T F, et al. Development of large temperature difference foam sandwich co-bulkhead of cryogenic tank for new-generation launch vehicle[J]. *Aerospace Material Technology*, 2016(4): 68-72
- [7] 方勇, 李克迪, 张剑星. 聚甲基丙烯酰亚胺 (PMI) 泡沫材料的现状及发展趋势[C]//2015年第九届商用飞机复合材料应用国际论坛. 镇江, 2015: 9-10
- [8] 赵秀芬, 纪双英, 史湘宁, 等. PMI 泡沫发展现状及其在直升机上的应用[J]. *宇航材料工艺*, 2018(1): 5-9  
ZHAO X F, JI S Y, SHI X N, et al. Current situation and application of polymethacrylimide foams on helicopters[J]. *Aerospace Material Technology*, 2018(1): 5-9
- [9] 胡培. ROHACELL 技术手册[G]. 上海: 赢创德固赛特种化学(上海)有限公司, 2005: 65-74
- [10] 谭维焯, 胡金刚. 航天器系统工程[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009: 19
- [11] 真空条件下材料挥发性能测试方法: QJ 1558B—2016[S]
- [12] 航天器用非金属材料真空出气评价方法: QJ 20290—2014[S]
- [13] 刘峰. PMI 泡沫壳体夹层结构设计及力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 37-49
- [14] 张洁. 复合材料铺层设计准则的一些理解[J]. *科技创新导报*, 2013(14): 57-58  
ZHANG J. Some understanding of pavement design criterion for composite material[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2013(14): 57-58
- [15] 侯玉品. 复合材料层合板铺层设计与离散结构选型优化方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 22-32
- [16] 梁森, 张术国, 梁天锡, 等. 大阻尼比刚度复合材料仪表盘结构设计及动态特性分析[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(6): 212-217  
LIANG S, ZHANG S G, LIANG T X, et al. Structural design and dynamic characteristics of large damping and high specific stiffness composite panels[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(6): 212-217

(编辑: 张艳艳)