

# 三维夹层结构复合材料的制备及性能

孟庆杰 徐亮 杨洁颖 郝强

(航天特种材料及工艺技术研究所,北京 100074)

**文 摘** 采用酚醛树脂、氰酸酯树脂分别与三维中空芯层结构材料进行复合,制备不同树脂基三维中空芯层结构复合材料,对不同基体复合材料的力学及介电性能进行研究。结果表明,三维中空芯层结构与树脂复合工艺性良好,压缩强度达到 5.0 和 3.5 MPa,与传统的蜂窝、泡沫材料相比,复合材料的力学性能得到较大幅度提高;介电常数为 1.5 和 1.6,且在不同频率下显示优异的稳定性。

**关键词** 三维夹层结构,复合材料,压缩性能,介电性能

中图分类号:TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.04.021

## Preparation and Properties of 3D-Sandwiched Structure Composites

MENG Qingjie XU Liang YANG Jieying HAO Qiang

(Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology, Beijing 100074)

**Abstract** Two 3D-sandwiched structure reinforced composites were separately prepared by cyanate ester/phenolic resins with fabric hollow matrix. The mechanical and dielectric properties of composites are performed. The results indicate that compressive strength of the composites is respectively 5.0 and 3.5 MPa on cyanate ester or phenolic resins. Compared with traditional core materials such as honeycomb and foam, the mechanical strength is increased significantly. The dielectric constants are 1.5 and 1.6 by different resins, besides the constants are stabilized on varied frequency.

**Key words** 3D-sandwiched structure, Composites, Compressive strength, Dielectric constants

### 0 引言

目前,夹层结构复合材料多采用纤维增强树脂基复合材料面板与 Nomex 蜂窝、聚氨酯泡沫、PMI 泡沫等低密度芯层相结合的形式<sup>[1-4]</sup>。夹层结构的力学薄弱点在于芯层内部及蒙皮与芯层粘接层,外力作用下,芯层内部发生断裂;面板之间以及面板和芯层易产生分层,导致结构破坏。同时,夹层结构对吸湿具有敏感性,面板与芯层对环境响应差异等都可能造成界面脱胶分离。

三维机织夹层复合材料增强体是由地经纱、纬纱和绒经构成三维机织整体结构,面板之间留有一定高度空间,形成类似于芯层的结构<sup>[5-6]</sup>。这种结构具有整体性、高比刚度、高比强度、耐腐蚀、抗疲劳等优点,呈现良好的力学性能,层间强度高。

近年来,国外对三维夹层结构复合材料开展了广

泛的研究,研究方向集中在不同混杂纤维面板的三维夹层复合材料的抗冲击性能研究<sup>[7]</sup>;芯层填充三维夹层结构复合材料的刚度和整体强度模拟及试验<sup>[8]</sup>;三维夹层结构复合材料的弯曲疲劳性能、测压载荷失效模式等<sup>[9]</sup>。

本文采用酚醛树脂、氰酸酯树脂分别与三维夹层结构增强体进行复合,制备不同树脂基三维夹层结构复合材料,对不同基体复合材料的力学及介电性能进行对比研究。

### 1 结构形式

#### 1.1 织物形式及参数

实验采用三维夹层结构增强体面板为平纹组织结构,芯层采用 X 型形式的组织循环,经、纬纱参数为  $R_j = 8, R_w = 16$ , 三维夹层织物结构形式见图 1。

收稿日期:2015-04-26

作者简介:孟庆杰,1980 年出生,博士,从事透波复合材料研制与性能研究。E-mail:mqjwendy@eyou.com

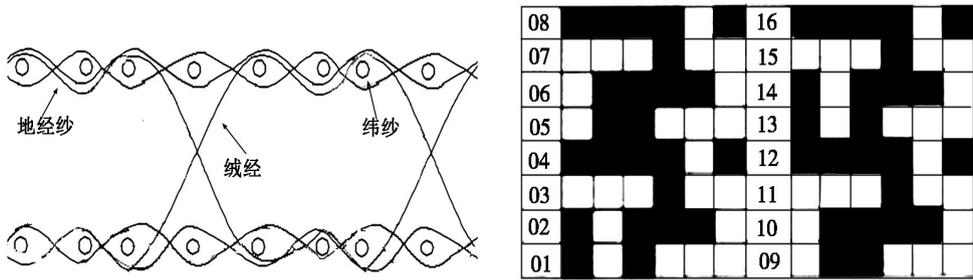


图1 三维夹层织物结构形式示意图

Fig.1 Sketch of 3D sandwich fabric structure

## 1.2 复合材料制件

### 1.2.1 材料

三维夹层结构:南京中材科技股份有限公司;氰酸酯树脂及酚醛树脂:自制。

### 1.2.2 复合材料制件制备

三维夹层结构复合材料制件的制备过程如下:

(1)分别根据酚醛树脂和氰酸酯树脂体系的流变性能与凝胶时间,确定树脂基体的聚合度;

(2)对织物进行浸润剂去除;

(3)模具清理及涂覆脱模剂;

(4)根据三维夹层结构纤维含量计算树脂含量,纤维含量:树脂含量=1:1;

(5)将树脂基体总量的65%均匀涂覆于模具表面,把三维夹层结构材料平整铺覆模具表面,辊压使得织物紧密贴合,去除气泡;

(6)树脂总量35%均匀涂覆于夹层结构增强体织物表面;

(7)分别依照树脂固化制度对复合材料进行固化。在单模下自由态固化成型,复合制件见图3,总体高度 $H_z=5.1\text{ mm}$ ,平板高度 $H_p=0.5\text{ mm}$ ,芯层高度 $H_x=5\text{ mm}$ 。制备的三维夹层结构复合材料平板见图2。

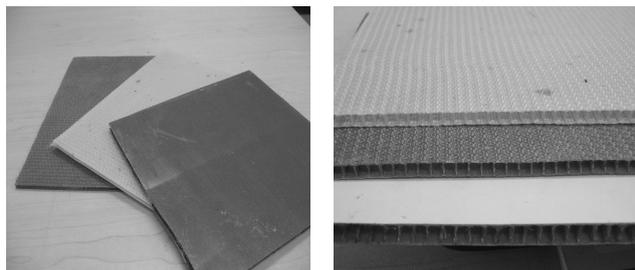


图2 三维夹层结构复合材料制件

Fig.2 Composites of 3D sandwich structure

## 2 测试

### 2.1 压缩性能

按照 GB/T1453—2005 执行标准,采用微机控制电子万能试验机(CMT5504/ZX—YQ—002)测试三宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第4期

维夹层结构复合材料的平压强度,实验室试验温度为 $25^\circ\text{C}$ ,湿度52%。

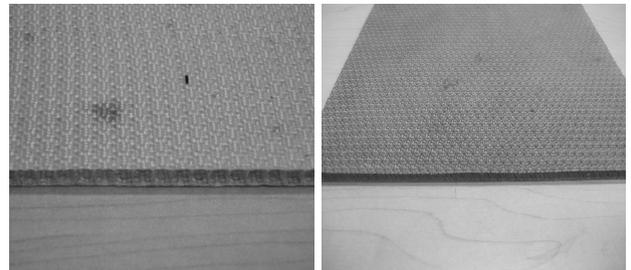
### 2.2 介电性能

采用宽频谱高温介电性能测试系统高Q谐振腔法测试三维夹层结构复合材料的介电性能。

## 3 性能分析

### 3.1 外形及内部结构

三维夹层结构增强复合材料制件、织物平面及侧面结构见图3。



(a) 氰酸酯基

(b) 酚醛基

图3 三维夹层结构增强复合材料制件

Fig.3 3D sandwich resin composite

### 3.2 平压强度

对三维夹层结构增强氰酸酯基/酚醛基复合材料进行平压强度测试,载荷与位移存在线性关系,直至材料发生破坏,破坏均发生在芯层位置,开始出现芯层树脂断裂,失稳破坏。三维夹层结构增强氰酸酯/酚醛基复合材料平压强度性能见表1。可看出,三维芯层结构增强氰酸酯基复合材料压缩强度平均值为 $5.01\text{ MPa}$ ,酚醛基复合材料压缩强度为 $3.51\text{ MPa}$ ,传统采用的Nomex蜂窝的平压强度为 $0.5\sim 1.1\text{ MPa}$ ,采用密度为 $75\text{ kg/m}^3$ 的Nomex蜂窝,相同结构的蜂窝夹层复合材料的压缩强度在 $1.6\text{ MPa}$ ;71XT型号的PMI泡沫的平压强度为 $1.65\text{ MPa}$ ,相同结构的泡沫夹层复合材料的平压强度为 $2.1\text{ MPa}$ ;PU泡沫的平压强度仅为 $0.2\sim 1.0\text{ MPa}$ 。在平压强度性能方面,三维夹层结构增强复合材料较以往的芯层结构具有较大的优势。

表1 三维夹层结构增强复合材料的平压强度

Tab.1 Flatwise compressive strength of 3D sandwich fabric composite

材料	试样	试样长度 /mm	试样宽度 /mm	破坏载荷 /N	平压强度 /MPa
氰酸酯基复合材料	I	29.97	29.63	3358.65	3.78
	II	29.62	26.08	4181.48	5.41
	III	29.78	29.51	4270.18	4.86
	IV	29.99	26.11	4302.40	5.49
	V	29.83	25.95	4472.59	5.78
	VI	29.80	29.71	4193.02	4.74
	平均值			4129.72	5.01
标准偏差			392.01	0.72	
离散系数/%			9.49	14.37	
酚醛基复合材料	I	29.37	29.61	2908.17	3.34
	II	25.88	29.87	2727.16	3.53
	III	25.90	29.75	3005.28	3.90
	IV	29.71	29.66	2273.79	2.58
	V	25.86	29.73	3220.43	4.19
	VI	26.01	29.77	2744.46	3.54
	平均值			2813.22	3.51
标准偏差			320.89	0.55	
离散系数/%			11.41	15.64	

3.3 介电性能

不同频率下对三维夹层结构增强氰酸酯基/酚醛基复合材料进行介电常数测试,测试结果见表2。

表2 三维夹层结构增强氰酸酯基复合材料介电性能

Tab.2 Dielectric properties of 3D sandwich fabric cyanate resin composite

材料	序号	测试频率 /MHz	介电常数	损耗角正切 /10 <sup>-3</sup>	测试温度 /°C
氰酸酯基复合材料	1	7314.2	1.518	6.01	27
	2	8112	1.518	6.68	27
	3	9281.1	1.518	6.66	27
	4	10695.1	1.497	6.34	27
	5	12208.3	1.635	6.54	27
	6	14158.9	1.501	3.42	27
	7	16057.5	1.566	6.61	27
	8	17471.2	1.528	5.92	27
酚醛基复合材料	1	7311.7	1.648	9.67	27
	2	8101.1	1.648	10.7	27
	3	9255.4	1.648	10.5	27
	4	10650.5	1.62	9.39	27
	5	12201.8	1.597	10.7	27
	6	13906	1.501	8.57	27
	7	16123.6	1.6	9.67	27
	8	17458	1.525	8.75	27

可见,三维夹层结构增强氰酸酯基复合材料的介电常数为1.5,介电损耗为(3.42~6.7)×10<sup>-3</sup>,介电常

数与介电损耗随频率的变化呈现一定的稳定性。三维夹层结构增强酚醛基复合材料的介电常数为1.6,介电损耗为1.0×10<sup>-2</sup>,酚醛基复合材料的介电常数与介电损耗同样在不同频率条件下变化较小,但均高于氰酸酯基复合材料,这与树脂基体本身的介电性能有关。通常 PMI 泡沫与 Nomex 蜂窝的介电常数为1.08,介电损耗为5.0×10<sup>-3</sup>,三维夹层结构复合材料的介电常数及介电损耗高于传统的蜂窝及泡沫材料,这是由于三维夹层结构材料芯层不同于以往的芯层结构,芯层与面板为整体结构,并非均质材料,应考虑对相同结构的平板电性能透波率等性能进行对比测试。

4 结论

(1)三维夹层结构增强氰酸酯基复合材料的平压强度为5.01 MPa,酚醛基复合材料压缩强度为3.51 MPa。三维夹层结构增强复合材料的平压强度显著高于 Nomex 蜂窝、PMI 泡沫等芯层材料。

(2)三维夹层结构增强氰酸酯基复合材料的介电常数为1.5,介电损耗为(3.42~6.7)×10<sup>-3</sup>,三维夹层结构增强酚醛基复合材料的介电常数为1.6,介电损耗为1.0×10<sup>-2</sup>,均显示出良好的频率稳定性,在未来透波等领域具有较好的应用前景。

参考文献

[1] 张广成,赵景利.蜂窝夹层结构复合材料的力学性能研究[J].机械科学与技术,2003,22(2):280-282

[2] 石晓朋,李曙林,常飞,等. Nomex 蜂窝复合材料冲击损伤及剩余压缩强度试验[J].航空材料学报,2013,33(6):70-75

[3] 李晓宇,王佩艳,李祚军,等.碳纤维/PMI 泡沫夹芯复合材料的弯曲特性分析[J].科学技术与工程,2013,13(5):1671-1851

[4] 邱军,李娜.有机多孔泡沫材料应用的研究进展[J].材料导报,2012,26(2):91-95

[5] 匡宁,张立泉,张建钟,等.三维机织中空层连织物[P].CN 1807731,2006:1-9

[6] 杨朝坤,朱建勋,匡宁,等.一种三维机织中空双夹层层连织物[P].CN 1974899,2007:1-8

[7] Judawisastra H, Ivens J, Verpoest I. The fatigue behavior and damage development of 3D woven sandwich composites [J]. Composite Structures, 1998,43(1):35-45

[8] Alberto Corigliano, Egidio Rizzi. Experimental characterization and numerical simulations of a synactic-foam/glass-fibre composite sandwich [J]. Composites Science and Technology, 2000,60(11):2169-2180

[9] Hosur M V, Abdullah M, Jeelani S. Manufacturing and low-velocity impact characterization of hollow integrated core sandwich composites with hybrid face sheets [J]. Composite Structures, 2004,65(1):103-115

(编辑 任涛)