

# 新型三维织物夹芯复合材料的制备及其力学性能

王梦远<sup>1,2</sup> 曹海建<sup>1</sup> 钱坤<sup>1</sup> 张建民<sup>1</sup>

(1 江南大学生态纺织教育部重点实验室,无锡 214122)

(2 江苏出入境检验检疫局工业产品检测中心,南京 210001)

**文 摘** 以玻璃纤维为原料,采用特殊的三维织造工艺,织制经向剖面为矩形的新型三维夹芯织物。以环氧树脂 E-51/9055 型固化剂组成树脂基体体系,采用手糊成型工艺将上述机织物复合制成三维织物夹芯复合材料。对高度为 10、20 及 30 mm 的三维织物夹芯复合材料的力学性能进行研究,重点分析夹芯层高度对材料压缩与弯曲性能的影响。结果表明:随着夹芯层高度的增加,材料的压缩强度与模量逐渐下降,弯曲强度逐渐上升,弯曲模量逐渐下降,其中纬向弯曲强度明显大于经向。

**关键词** 三维织物夹芯复合材料,玻璃纤维,夹芯层高度,压缩性能,弯曲性能

中图分类号:TB3

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.02.013

## Preparation and Mechanical Properties of New 3D Fabric Sandwich Composites

WANG Mengyuan<sup>1,2</sup> CAO Haijian<sup>1</sup> QIAN Kun<sup>1</sup> ZHANG Jianmin<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Eco-Textiles Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122)

(2 Jiangsu Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau Industrial Products Testing Center, Nanjing 210001)

**Abstract** Glass fibers were used as raw material, and the special 3D weaving process was used to weave the new 3D sandwich fabric whose warp cross section was a rectangle. The resin matrix was consisted of epoxy resin E-51 and curing agent 9055. The 3D sandwich fabric was made into 3D fabric sandwich composite through the hand lay-up process. The mechanical properties of 3D fabric sandwich composites with core height of 10 mm, 20 mm and 30 mm were studied. And the effect of core height on the compression properties and flexure properties of the composites were mainly analyzed. The results show that the compressive strength and compressive elasticity modulus of the composites decrease with the increase of core height. The flexural strength of the composites increase with the increase of core height, while the flexural elasticity modulus decrease. And the flexural strength in weft direction is better than that in warp one.

**Key words** 3D fabric sandwich composites, Glass fibers, Core height, Compression properties, Flexure property

### 0 引言

三维整体中空复合材料,具有高强耐压、隔热耐磨、抗冲击性好、整体性优异的特点,近年来在航空航天、船舶汽车以及建筑行业中的应用越来越广泛<sup>[1-3]</sup>。Hosur 等<sup>[4]</sup>研究了三维整体中空复合材料的成型工艺,并对不同面板的材料进行了低速冲击实验研究;Shyr 等<sup>[5]</sup>对三种类型的整体中空复合材料进行了低速冲击实验,研究其吸能效果及冲击破坏形式;Corigliano 等<sup>[6]</sup>研究了填充聚酯泡沫的三维整体

中空复合材料的力学性能,并进行了三点弯曲与四点弯曲的实验研究;姚秀东等<sup>[7]</sup>利用有限元软件 ANSYS,对增强型复合材料建立物理模型,研究树脂柱分布和材料特性对芯层与面层间的应力分布以及板竖向位移的影响。目前,有关三维整体中空复合材料的芯材设计的研究较少,本文针对这方面设计并成功制备了一种新型的三维织物夹芯复合材料。其预制件是在两个平行的织物平面结构之间由一组垂向机织物相连接的三维机织物,夹芯层不再是以往的垂纱

收稿日期:2014-09-11

基金项目:国家自然科学基金(51302110);江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2013015-31)

作者简介:王梦远,1989 年出生,硕士,研究方向为纺织复合材料。E-mail: xwmy1103x@126.com

通讯作者:曹海建,1979 年出生,副研究员,研究方向为复合材料的制备及性能研究。E-mail: caohaijian@jiangnan.edu.cn

纤维,而是一层机织物,结构示意图如图1所示。

本文设计了3种高度的经向剖面为矩形的三维夹芯织物,以玻璃纤维为原料,在SGA598型全自动剑杆织样机上进行织造,并以环氧树脂基体体系与织物复合制成三维织物夹芯复合材料。同时对高度为10、20及30 mm的三维织物夹芯复合材料的压缩性能与弯曲性能进行测试,对比并分析测试结果。

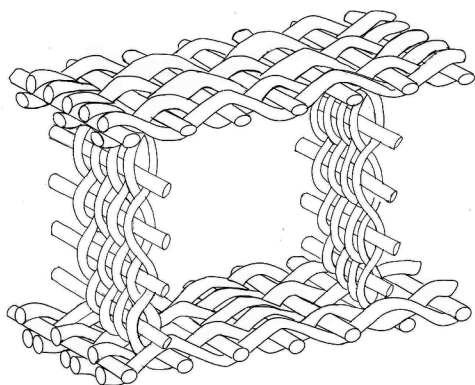


图1 三维织物夹芯复合材料的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D fabric sandwich composites

## 1 实验

### 1.1 材料与仪器

无碱玻璃纤维,线密度为2 400 Tex,南京中材科技股份有限公司;环氧树脂E-51,南通星辰合成材料有限公司;9055型固化剂,蓝星化工无锡树脂厂;洁模剂CX-500,脱模剂XTEND 807,北京科拉斯科技有限公司常州分公司。

SGA598型全自动剑杆织样机,江阴市通源纺机有限公司;101A-4S型电热鼓风干燥箱,南京沃环科技实业有限公司;Instron 3385H型电子万能试验机,美国英斯特朗公司;S212型恒速搅拌器,上海申顺生物科技有限公司;JA2003型电子精密天平,上海菁海仪器有限公司。

### 1.2 三维织物夹芯复合材料的制备

#### 1.2.1 三维夹芯织物的设计

根据三维织物夹芯复合材料的结构,画出三维夹芯织物的经向剖面图(图2)。

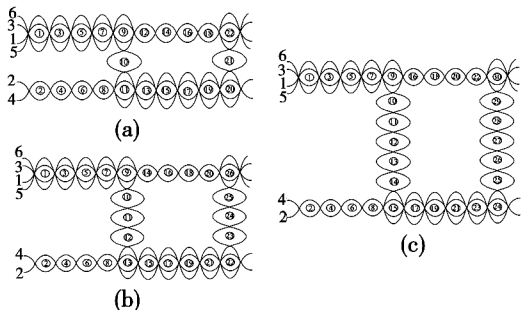


图2 三维夹芯织物的经向剖面图

Fig. 2 Warp cross section of the 3D sandwich fabric

①~⑥表示经纬纱及顺序;1~6表示经纱及顺序。

如图2所示,均可视为三层网状结构,经纱1、3织上层面板,经纱2、4织下层面板,经纱5、6织中间的夹芯层,将上、下面板层按矩形方式接结为一整体,接结后的立体结构网眼呈矩形,各层组织均为平纹。

#### 1.2.2 三维夹芯织物的制备

根据图2确定经纬纱的排列顺序,画出三维夹芯织物的纹板图(以夹芯层高度20 mm为例),如图3所示(图中左侧数字与经向剖面图中的纬纱顺序数相对应,经纱从左到右依次与经向剖面图中的经纱顺序数相对应)。

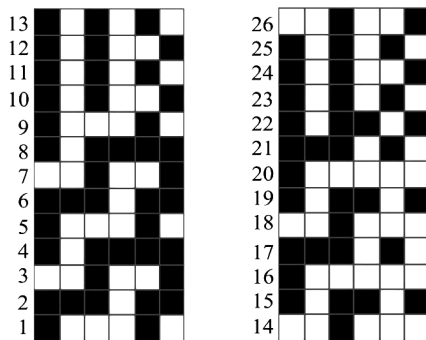


图3 三维夹芯织物的纹板图

Fig. 3 Lifting plan of the 3D sandwich fabric

筒子架提供2个系统经纱,一个是上下面板层经纱,另一个是夹芯层经纱;由于经纱循环数较小,穿综方法采用顺穿法;为了降低纱线与钢筘之间的摩擦,穿筘方法采用一筘一穿法,筘号为公制20<sup>#</sup>;将纹板图输入到织样机电脑中,在SGA598型全自动剑杆织样机上进行织造。

#### 1.2.3 三维织物夹芯复合材料的制备

以环氧树脂E-51和9055型固化剂作为树脂基体体系,采用手糊成型工艺将三维夹芯织物复合制成三维织物夹芯复合材料,具体的复合过程如下:

(1)将E-51和9055型固化剂以5:2的比例,在恒速搅拌器的作用下均匀混合,得到树脂胶液;

(2)在模具上涂一层脱模剂,2 min后将1/3的树脂胶液倾倒在模具上并用刷子铺开至织物大小,然后把织物平铺于附着胶液的区域;

(3)用辊子压实织物,将剩余的2/3树脂胶液均匀缓慢地倾倒在织物上表面,用刷子将上表面的胶液涂刷均匀;

(4)将涂覆好的织物与模具一起放入干燥箱内加热烘干,设定温度为90°C,烘干时间为8 h。

### 1.3 性能测试

压缩性能测试,按照GB/T 1453—2005<sup>[8]</sup>进行。试件尺寸为60 mm×60 mm,测试加载速度为2 mm/min;弯曲性能测试,按照GB/T 1456—2005<sup>[9]</sup>进行。试件尺寸为100 mm×30 mm,测试加载速度为2 mm/min,下夹头跨距为60 mm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 压缩性能

#### 2.1.1 压缩特性

三维织物夹芯复合材料的压缩载荷—位移曲线图如图4所示。

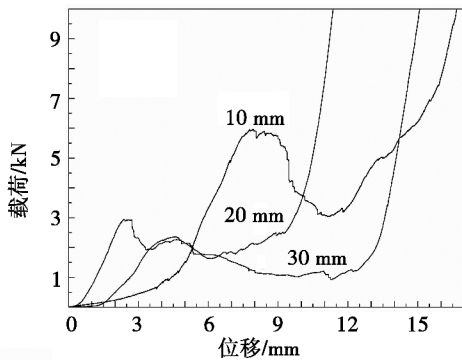


图4 压缩载荷—位移曲线图

Fig. 4 Load-displacement curves of compression

由图4可知,在载荷加载的初始阶段,材料处于弹性变形状态,曲线呈现上升的趋势;载荷进一步的增加,曲线上升的趋势变缓并逐渐达到最大值,此时可以断断续续地听到试样件破坏的脆断声,同时可以看到材料夹芯层与面板层的连接处呈现发白的现象并出现裂纹,如图5(a)、(b)、(c)所示;然后,材料表面的裂纹越来越大,夹芯层与面板层的部分纤维发生脆断,且夹芯层逐渐开裂并倒塌,材料的抗压强度达到极限,曲线呈现缓慢下降的趋势;最后,压缩载荷的继续增加,完全倒塌的夹芯层和上下面板层叠加在一起被压实,压缩载荷快速增加,曲线呈现急剧上升的趋势,材料被完全破坏,如图5(d)(e)(f)所示。

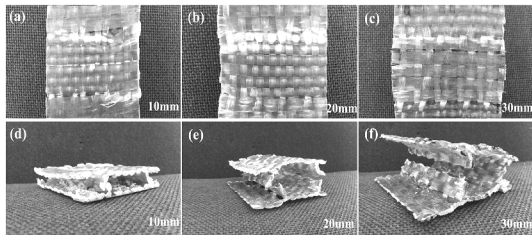


图5 压缩破坏形貌图

Fig. 5 Breakage photographs of compression

#### 2.1.2 夹芯层高度对压缩性能的影响

夹芯层高度对三维织物夹芯复合材料压缩强度的影响如图6所示。由图6可知:随着夹芯层高度的增加,三维织物夹芯复合材料的压缩强度逐渐下降,压缩弹性模量也逐渐下降。夹芯层高度为10 mm时,压缩强度为1.65 MPa,压缩弹性模量为11.03 MPa;夹芯层高度为20 mm时,压缩强度为0.97 MPa,压缩弹性模量为7.34 MPa;夹芯层高度为30 mm时,压缩强度为0.65 MPa,压缩弹性模量为5.65 MPa。这是因为材料的压缩强度主要取决于材料的宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015年 第2期

结构,当夹芯层高度较小的时候,夹芯层机织物的经纱与纬纱交织比较紧密,纤维与树脂基体的结合更加牢固,此时材料的压缩强度较大;当夹芯层高度增加的时候,夹芯层机织物交织疏松,高度越大越容易出现失稳的现象,因此压缩强度明显下降。而材料的高度增加,其压缩强度下降,夹芯层的刚度也随之下降,从而弹性模量也逐渐下降<sup>[10-11]</sup>。

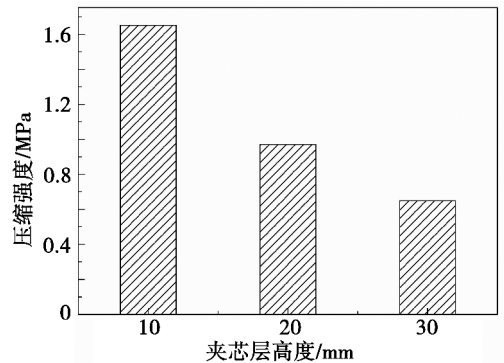


图6 夹芯层高度对压缩强度的影响

Fig. 6 Effect of core height on compressive strength

### 2.2 弯曲性能

#### 2.2.1 弯曲特性

三维织物夹芯复合材料的弯曲载荷—位移曲线图如图7所示。

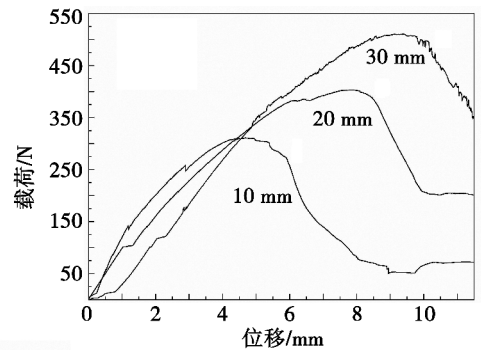


图7 弯曲载荷—位移曲线图

Fig. 7 Load-displacement curves of flexure

由图7可知三维织物夹芯复合材料的弯曲特性:首先,弯曲载荷加载的初始阶段,试样件没有明显的变化,载荷随位移呈线性变化,曲线呈现缓慢上升的趋势;其次,随着载荷的不断增加,可以清晰地听到纤维断裂和树脂基体开裂的声响,可以看到上面板层开始弯曲下塌并出现部分开裂的现象,同时夹芯层开始弯曲倒塌;然后,随着载荷进一步的增加,材料的抗弯强度达到峰值,曲线上升到最大值;最后,上夹头与上面板层的接触区域完全开裂,夹芯层缓慢倒塌,曲线呈现缓慢下降的趋势。

#### 2.2.2 夹芯层高度对弯曲性能的影响

夹芯层高度对三维织物夹芯复合材料弯曲强度的影响如图8所示。由图8可知:随着夹芯层高度的增加,三维织物夹芯复合材料的弯曲强度逐渐上升,

弯曲弹性模量逐渐下降。夹芯层高度为 10 mm 时, 弯曲强度为 2.00 MPa, 弯曲弹性模量为 24.99 MPa; 夹芯层高度为 20 mm 时, 弯曲强度为 2.45 MPa, 弯曲弹性模量为 19.03 MPa; 夹芯层高度为 30 mm 时, 弯曲强度为 2.59 MPa, 弯曲弹性模量为 9.90 MPa。这是因为材料的弯曲强度主要取决于复合材料的面板和夹芯层的高度, 面板织物的组织结构、密度、厚度等参数均相同, 当夹芯层的高度增加时, 材料的惯性矩随之增加, 因此弯曲强度随着材料高度的增加而上升<sup>[11-12]</sup>。

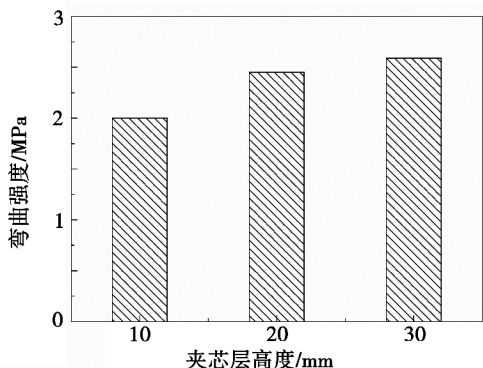


图 8 夹芯层高度对弯曲强度的影响

Fig. 8 Effect of core height on flexural strength

夹芯层高度相同的条件下, 三维织物夹芯复合材料的纬向弯曲强度明显大于经向弯曲强度, 如图 9 所示(夹芯层高度 20 mm)。除了与面板经纬纱线特性有关, 和夹芯层在经纬向的间距以及形态不同也有关, 经向夹芯层具有一定的间距, 纬向夹芯层间距为 0, 因此纬向强度明显较大<sup>[11-12]</sup>。

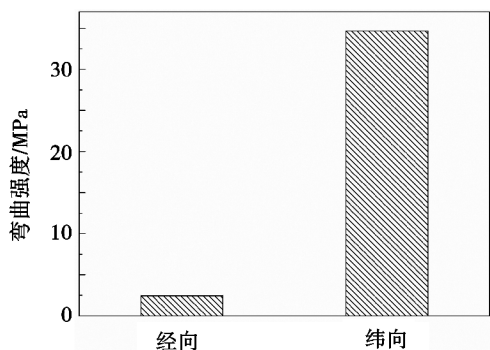


图 9 经纬向弯曲强度

Fig. 9 Flexural strength in warp and weft directions

### 3 结论

(1) 随着夹芯层高度的增加, 三维织物夹芯复合材料的压缩强度逐渐下降, 压缩弹性模量也逐渐下

降。

(2) 随着夹芯层高度的增加, 三维织物夹芯复合材料的弯曲强度逐渐上升, 弯曲弹性模量逐渐下降。

(3) 夹芯层高度相同, 三维织物夹芯复合材料的纬向弯曲强度明显大于经向弯曲强度。

### 参考文献

- [1] 周光明, 薄晓莉, 匡宁. 整体中空夹层复合材料的弹性性能分析[J]. 复合材料学报, 2010, 27(1): 185-189
- [2] 薛志鹏, 钱坤, 李鸿顺. 整体中空夹层复合材料芯材倾角与平压性能关系的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(6): 3-5
- [3] 周光明, 钟志珊, 张立泉, 等. 整体中空夹层复合材料力学性能的实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(1): 11-15
- [4] 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
- [5] Shyr T W, Pan Y H. Low velocity impact responses of hollow core sandwich laminate and interply hybrid laminate [J]. Composite Structures, 2004, 64(2): 189-198
- [6] Corigliano A, Rizzi E, Papa E. Experimental characterization and numerical simulations of a syntactic-foam/glass-fibre composite sandwich [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(11): 2169-2180
- [7] 姚秀冬, 周叮, 刘伟庆. 复合材料夹层板芯层内树脂柱对性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2009, 27(6): 937-941
- [8] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. GB/T1453-2005 夹层结构或芯子平压性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005
- [9] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. GB/T1456-2005 夹层结构弯曲性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005
- [10] 曹海建, 钱坤, 魏取福, 等. 三维整体中空复合材料压缩性能的有限元分析[J]. 复合材料学报, 2011, 28(1): 230-234
- [11] 高爱君, 李敏, 王绍凯, 等. 三维间隔连体织物复合材料力学性能[J]. 复合材料学报, 2008, 25(2): 87-94
- [12] 曹海建, 钱坤, 盛东晓, 等. 芯材高度对整体中空复合材料力学性能的影响[J]. 上海纺织科技, 2010, 38(9): 54-57

(编辑 吴坚)