

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.10.019

整体中空夹层复合材料平压性能的实验^{*}

王狄辉,周光明,刘畅,王校培,李文龙

(南京航空航天大学机械结构力学与控制国家重点实验室,南京 210016)

摘要:选取了不同织造参数和基体材料的试验件进行了平压试验,观察描述了平压试验中试验件的破坏过程,并将得到的实验数据进行整理分析。讨论了厚度、绒经密度、基体材料以及绒经粗细对于整体中空夹层复合材料平压性能的影响。发现随着厚度的增加,绒经密度的减小,材料的平压强度减小;基体材料不同,材料的平压强度也明显不同;绒经的粗细对平压性能影响显著。

关键词:夹层复合材料;整体中空;平压试验;平压性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)10-0090-04

Experiment on Flatwise Compression Performance of Integrated Hollow Sandwich Composites

Wang Dihui, Zhou Guangming, Liu Chang, Wang Xiaopei, Li Wenlong

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract : Flatwise compression test was done selecting different weaving parameters and matrix materials, the failure process of the test during the experiment was observed and described, experimental data was arranged and analysed. The influences of thickness, pile density, matrix and pile thickness to the integrated hollow sandwich composites were discussed. It is found that with the thickness increasing and pile density decreasing, the flatwise compression strength decreases, the matrix is different, the strength is also different, and the thickness of the pile has a great influence on the flatwise compression performance.

Keywords : sandwich composite ; integrated hollow ; flatwise compression test ; flatwise compression performance

整体中空夹层复合材料是一种新型的夹芯材料,国外称之为三明治结构,由纬纱、地经纱和绒经构成。地经纱和纬纱交织构成上下面板,绒经穿过上下面板,并在上下面板之间撑起一片空间构成芯材部分,芯材部分往往呈“8”字形或“X”字形。它相比于传统的夹层结构复合材料,其面板与芯材由纤维连成一体,具有较好的层间性能。此外,由于该材料具有高强轻质、耐冲击和抗分层的特点^[1-2],在飞机、船舶和建筑等行业具有广泛的应用前景。

国内外学者对该材料进行了实验和理论研究^[3-4]。M. Sadighi等^[5]对该材料进行了包括侧拉、侧压等在内的力学性能测试。D. Dhont^[6]通过实验对比分析了不同厚度整体中空夹层复合材料对拉伸强度、压缩强度、弯曲强度以及剪切强度等力学性能的影响。周光明等^[7-8]通过建立整体中空夹层复合材料的细观模型进行了弹性性能的分析。O. Velecela等^[9]研究了侧压工况下此种材料的失效模式,并运用有限元方法进行了模拟。M. V. Hosur等^[10]针对不同补强面板的中空夹层复合材料进行了低速冲击

实验研究,发现(玻璃/碳)纤维混杂面板具有良好的抗冲击能力。A. Corigliano^[11]将聚氨酯泡沫填充在该材料芯层进行了弯曲试验,发现其刚度和强度大大提高。曹海建等^[12-13]利用有限元软件建立了该材料的结构模型,进行了压缩性能分析。高爱军等^[14]研究了该材料在平压、剪切和三点弯曲载荷下的力学特性和破坏模式,分析了不同织物结构参数对不同工况的影响。

由于在实际应用中,整体中空夹层复合材料主要承受压缩和低速冲击。因此,对于其平压性能的实验研究具有很大的必要性,而较多学者仅从试件厚度、绒经密度、绒经倾斜角等方面对其进行了平压实验研究。

笔者除了从不同厚度、不同绒经密度这两方面

^{*} 江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD),南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfj20160111),中央高校基本科研业务费专项

联系人:周光明,教授,主要从事复合材料设计、制备一体化研究

收稿日期:2016-07-13

进行研究,还选取了一系列不同树脂、不同纱线粗细的试验件进行了平压试验,根据试验结果讨论了不同织造参数和基体材料对其平压性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

整体中空夹层复合材料:南京玻璃纤维研究院;

环氧树脂 (EP): WSR618(E-51),南通星辰合成材料有限公司;

不饱和聚酯树脂:欣叶豪化工有限公司;

苯二甲酸(环氧固化剂):长沙市化工研究所;

邻苯二甲酸二丁酯(增塑剂):上海长久化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器及设备

微机控制万能试验机: CMT5504 型,美特斯工业系统(中国)有限公司。

1.3 试样制备

先将 EP,固化剂、增塑剂按 10 : 2 : 1 的质量比调和,然后采用手糊成型工艺^[15]将中空织物制成中空平板,待其固化后切割成标准样件。具体织物参数如表 1 所示。

表 1 整体中空夹层复合材料织物参数表

树脂种类	试件厚度/mm	纱线规格/ Tex			密度/(ends·cm ⁻¹)		
		经	纬	纬	经	纬	纬
EP	3	64	128	128	18(减密)	21	18
	3	64	128	128	21	21	18
	3	64	128	128	24(加密)	21	18
	5	64	128	128	18(减密)	21	18
	5	64	128	128	21	21	18
	5	64	128	128	24(加密)	21	18
	8	64	128	128	18(减密)	21	18
	8	64	128	128	21	21	18
	8	64	128	128	24(加密)	21	18
	10	64	128	128	21	21	18
不饱和聚酯树脂	10	192	256	256	12	12	14
	3	64	128	128	21	21	18
	5	64	128	128	21	21	18
	8	64	128	128	21	21	18
	8	64	128	128	21	21	18
	10	64	128	128	21	21	18
	10	64	128	128	21	21	18

1.4 性能测试

平压试验按照 GB 1453-1987 测试,试件尺寸为 60 mm×60 mm,每种规格 6 件。将试验件压缩至破坏即可得到其平压强度。平压强度 σ_c 按下式进行计算:

$$\sigma_c = \frac{P_{\max}}{a^2}$$

式中: $P_{\max}$ ——破坏载荷, N ;

a ——试验件边长, mm。

其中一个试件平压试验的位移载荷曲线如图 1 所示。试验及试样破坏过程如图 2 所示。从图 1 可看到,试样压紧之后,材料开始进入 I 阶段,此时载荷随位移呈线性增长,变形仍为弹性变形;随后芯材发生屈曲,芯材与面板连接处出现损伤,但仍可继续承载,载荷随位移呈非线性缓慢增长;随着载荷的进一步增大,“8”字形结构交叉处也出现损伤,实验进入 II 阶段,载荷开始掉落;最终试件的芯材完全崩塌,实验进入 III 阶段,试样破坏,载荷作用在面板和破坏的芯材上,又开始回升。

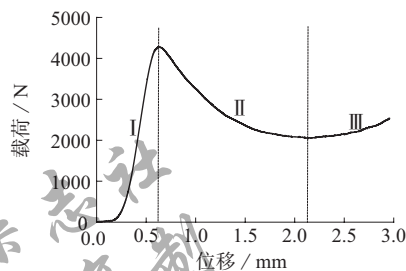


图 1 平压试验位移载荷曲线

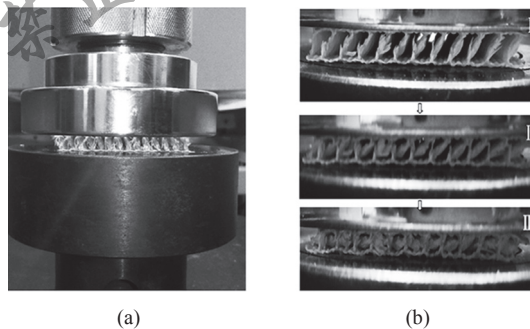


图 2 平压试验及试样破坏过程

图 3 为试验后试样细观图。通过观察图 3 可以清楚地看到,图中断裂线处及圆圈处的部位纤维发生断裂,说明了整体中空夹层复合材料在承受压缩作用时,芯材“8”字形结构交叉处及芯材与面板交界处应力较大,容易发生破坏,且该种破坏主要为芯材的屈曲破坏及压缩破坏。

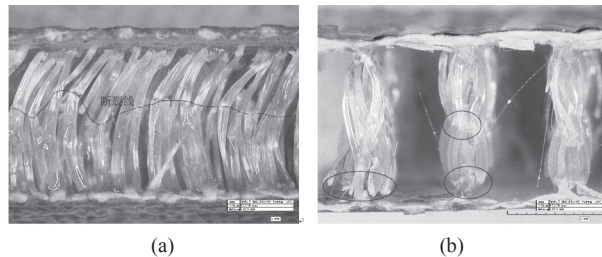


图 3 试验后试样细观图

2 结果与讨论

对不同织造参数及基体材料的试验件进行平压试验,计算得到不同的平压强度,取有效数据的平均值,对数据进行整理分析,讨论各因素对整体中空夹层复合材料平压性能的影响。

2.1 厚度与基体材料对平压强度的影响

对不同厚度的环氧树脂基与不饱和聚酯树脂基的试验件进行平压试验,将所得数据进行整理可得图4结果。

从图4中可以看出,随着厚度的增加,两种基体的试验件平压强度下降明显。这是因为当厚度较小时,组成“8”字形的两根纱线贴合较紧,树脂填满纱线间的空隙,使芯材变为一根较粗的短杆,相对于细长杆,它更不易失稳和破坏,从而增强了材料的平压强度。此外,由于成型工艺的原因,也导致了相对于厚度较小的试验件,厚度大的试验件的芯材的胶含量可能较小,从而也降低了其平压强度。从图中还可以看出,随着芯材厚度的增加,平压强度并非线性减小,而是呈减缓趋势减小。这是因为当芯材厚度较小时,芯材会比较接近“X”形结构,而在厚度较大时接近“8”字形结构,芯材结构的变化导致了平压强度不随芯材厚度的增大而线性减小。

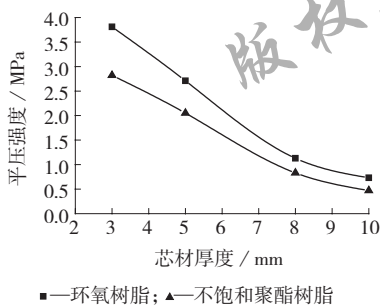


图4 平压强度随芯材厚度的变化

将不饱和聚酯树脂基试验件的实验数据与环氧树脂基试验件进行对比,可以清楚地看到,厚度相同时,不饱和聚酯树脂成型的试验件的平压强度明显地低于环氧树脂成型的试验件,并且不饱和聚酯树脂基的整体中空夹层复合材料的平压强度仅为相同厚度下环氧树脂基试验件的64%~75%。这说明了基体材料的种类也是影响其平压性能的一个重要因素。因此,可根据实际生产应用所需的强度要求,选用不同种类的基体材料以达到节约成本的目的。

2.2 绒经密度对平压强度的影响

图5示出厚度为3,5 mm和8 mm不同绒经密度的环氧树脂基试验件的平压强度。由图5可知,

当芯材厚度相同时,平压强度随着绒经密度的增加而增大,且芯材厚度越小,这种变化越线性。一方面,平压时主要是绒经受力,随着绒经密度的提高,其平压强度必然会提高;另一方面,随着绒经密度的增加,绒经之间的间距缩小,相邻的两根绒经互相接触,在压缩时产生协同效应,从而在一定程度上也增加了其平压强度。而且由于成型工艺等原因,导致了当芯材厚度较大时,试验件存在的缺陷也会较大,因此这种变化的线性程度会随着芯材厚度的增加而变差。

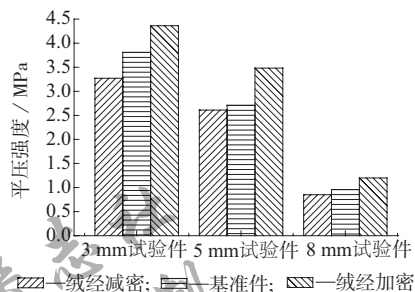


图5 平压强度随绒经密度的变化

2.3 纱线粗细对平压强度的影响

表2为环氧树脂基10 mm试验件在不同纱线粗细下的平压强度。对比这两个试验数据可以看出,纱线加粗能显著地提高材料的平压强度。且通过织物参数表可以知道,和基准试件相比,粗纱试验件的绒经的总体积是基准件的1.7倍,但平压强度却是其11.9倍。当纱线较细时,芯材主要以失稳的方式发生破坏;而纱线较粗时,芯材不易失稳,压缩破坏会比较明显。由于试件受压缩载荷作用时,屈曲破坏与压缩破坏会同时发生,所以仅简单地使用失稳条件或强度理论来量化纱线粗细和其平压强度的关系会存在较大的误差。因此,如要深入讨论两者间的关系,仍需进行大量的实验来验证所提理论的准确性。在实际生产过程中,根据材料实际的使用要求,尤其是对于材料质量较为敏感的航空航天领域,在材料质量一定的情况下,可通过调整绒经的截面积来实现材料平压性能的优化设计。

表2 环氧树脂基10 mm试验件在不同纱线粗细下的平压强度

性能	试验件种类	
	基准件	粗纱试验件
平压强度 / MPa	0.30	3.58

3 结论

(1) 芯材厚度对于整体中空夹层复合材料的平压性能影响显著,随着厚度的增加,材料的平压强度明显减小,且当芯材厚度增加到一定程度时,这种变

化会发生减缓,呈现非线性。

(2) 基体材料对整体中空夹层复合材料的平压性能影响较大。使用不饱和聚酯树脂基的试件的平压强度仅为使用环氧树脂基试件的 64%~75%,因此在实际生产中,考虑生产成本应结合材料的使用强度要求。

(3) 绒经密度对于整体中空夹层复合材料的平压性能影响显著,绒经密度减少,材料的平压强度明显减小。且由于成型工艺等原因,试件厚度越大,这种变化的线性程度越差。

(4) 绒经的粗细对整体中空夹层复合材料的平压性能影响显著。在绒经总体积增大至基准件的 1.7 倍时,平压强度却提高到了原先的 11.9 倍,所以对于纱线粗细的优化设计在减重、增强等方面有着十分重要的意义。

(5) 对于整体中空夹层复合材料,手糊成型工艺对于芯材厚度较小的试验件的成型效果较好。但在实际应用中,当材料厚度大到一定程度,仍需改善成型工艺。

参考文献

- [1] Vaidya U K, Hosur M V, Earl D, et al. Impact response of integrated hollow core sandwich composite panels[J]. Composites Part A, 2000, 31:761-772.
- [2] 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.
- [3] 王梦远,曹海建,钱坤,等. 三维机织间隔复合材料结构对其力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(11):53-58.
Wang Mengyuan, Cao Haijian, Qian Kun, et al. Effect of structure of three dimensional woven distance composites on mechanical properties[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(11):53-58.
- [4] 钟崇岩,曹海建,李娟. 组织结构对三维整体中空复合材料压缩性能的影响[J]. 材料导报, 2012(S2):279-281.
Zhong Chongyan, Cao Haijian, Li Juan. Influence of organization structures on compressive property of 3-D integrated sandwich composites[J]. Materials Review, 2012(S2):279-281.
- [5] Sadighi M, Hosseini S A. Finite element simulation and experimental study on mechanical behavior of 3D woven glass fiber composite sandwich panels[J]. Composites Part B:Engineering, 2013, 55:158-166.
- [6] Dhont D. The mechanical performance of 3D woven sandwich composites[J]. Composite Structures, 1999, 47(4):687-690.
- [7] 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.
Zhou Guangming, Zhong Zhishan, Zhang Liquan, et al. Experimental investigation on mechanical properties of hollow integrated sandwich composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, 39(1):11-15.
- [8] 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.
Zhou Guangming, Bo Xiaoli, Kuang Ning. Analysis of elastic property for hollow integrated sandwich composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(1):185-189.
- [9] Velecela O, Soutis C. Prediction of crushing morphology of GRP composite sandwich panels under edgewise compression[J]. Composites:Part B, 2007, 38:914-923.
- [10] 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, 65:103-115.
- [11] Corigliano A, Rizzi E. Experimental characterization and numerical simulations of a syntactic-foam / glass-fibre composite sandwich[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(11):2 169-2 180.
- [12] 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.
Cao Haijian, Qian Kun, Wei Qufu, et al. Finite element analysis of the compressive properties of 3D integrated sandwich composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(1):230-234.
- [13] 曹海建,冯古雨,俞科静,等. 碳纤维 / 环氧树脂基中空夹芯复合材料压缩性能的有限元法研究[J]. 纺织学报, 2015, 36(9):50-54.
Cao Haijian, Feng Guyu, Yu Kejing, et al. Compressive properties of carbon fiber / epoxy resin hollow sandwich composites based on finite element software[J]. Journal of Textile Research, 2015, 36(9):50-54.
- [14] 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):87-93.
Gao Aijun, Li Min, Wang Shaokai, et al. Experimental study on the mechanical characteristics of 3-D spacer fabric composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(2):87-93.
- [15] 匡宁,周光明,张立泉,等. 整体夹芯中空复合材料的开发与应用[J]. 玻璃纤维, 2007, 5(5):15-20.
Kuang Ning, Zhou Guangming, Zhang Liquan, et al. Development and application of integrated hollow core sandwich composite[J]. Fiber Glass, 2007, 5(5):15-20.

欢迎订阅, 欢迎投稿, 欢迎刊登广告