

点阵增强型复合材料夹层结构制备与力学性能

方 海， 刘伟庆， 万 里

(南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要：选用 H-60 PVC 泡沫、四轴向玻璃纤维布以及乙烯基酯树脂，通过在 PVC 泡沫芯材上、下表面开正交布置的齿槽及沿芯材厚度方向穿孔，采用先进的真空导入成型工艺，制备出在玻璃纤维面板与 PVC 泡沫芯材界面具有创新构型的点阵增强型复合材料夹层结构。研究结果表明：真空导入成型工艺充模速度快、成型效率高；点阵增强型复合材料夹层结构经乙烯基树脂柱增强后，其剪切与平压性能均有一定的提高。另外，通过三点弯曲与四点弯曲试验，观察了试件的典型受弯破坏形态；利用经典夹层梁理论预估了试件抗弯刚度和受弯极限承载力，理论预估值与实测值符合较好。

关键词：真空导入成型工艺；点阵增强型；复合材料夹层结构；力学性能

中图分类号：TB332; TB301 文献标识码：A

Mechanical Properties and Manufacturing Process of Grooved Perforation Sandwich Composites

FANG Hai, LIU Wei-qing, WAN Li

(College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: H-60 PVC foam, four-axis E-glass non-woven fabric and vinyl resin are selected to fabricate a type of reinforced sandwich composite as grooved perforation sandwich(GPS) by the advanced vacuum infusion molding process(VIMP). The interfacial structure between the face and core of GPS is innovative because of the acuminate grooves in both sides of foam core and the holes perforated along core's height. The fabrication results show that VIMP is a high-speed and cost-effective manufacturing method. The shear and flatwise compression properties of GPS are enhanced by the resin column inclusions. The typical flexural failure modes of specimens are observed. The flexural stiffness and ultimate loading capacity of GPS are studied by ordinary sandwich beam theory and the theoretical data tally with the tested data.

Key words: vacuum infusion molding process (VIMP); grooved perforation sandwich (GPS); sandwich composite; mechanical property

大型/异型复合材料夹层结构构件可采用低成本且快速成型的真空导入成型工艺(vacuum infusion molding process, VIMP)制备，该工艺方法灵活，能够一次成型带有夹芯、加筋、预埋的大型结构件，且成型工艺绿色环保，已成为复合材料领域的重要发展方向之一^[1]。采用树脂基纤维面板

收稿日期：2007-09-20；修订日期：2007-12-19

基金项目：江苏省属高校自然科学重大基础研究项目(06KJA56002)；南京工业大学博士学位论文创新基金资助项目(BSCX200719)

作者简介：方 海(1981—)，男，江苏仪征人，南京工业大学博士生。E-mail:fanghainjut@163.com

和泡沫或轻木芯材的复合材料夹层结构可以达到理想的结构性能(如强度、刚度、疲劳和冲击韧性等),且具有轻质、耐腐蚀、电磁屏蔽等特点,可替代钢结构面板制造各种结构构件,从而大幅度提高军事设施、车辆、舰船、建筑、桥梁等结构性能和使用效果。如瑞典海军的轻型护卫舰 Visby 号,长 73 m,舰上的部件如船体、甲板和上层建筑等大型构件均采用这种用真空导入成型工艺制造的复合材料夹层结构^[2]。目前,美国海军正全面展开真空导入制备复合材料夹层结构的研究^[3]。在我国风力叶片制造领域,这种真空导入成型工艺也已悄然兴起,并逐步向舰船领域渗透。在建筑领域,美国、澳大利亚等国家已采用真空导入成型工艺一次成型大跨建筑屋盖、桥面板、道面垫板、轻便舟桥等大型构件^[4]。在我国,不仅在结构加固领域广泛应用复合材料,而且用其作为结构构件的应用也正方兴未艾,如用于混凝土结构的纤维筋和预应力筋、斜拉桥的纤维拉索、拉挤成型玻璃钢空腹桥面板等。但采用真空导入工艺快速制备具有夹芯材料的复合材料夹层结构作为建筑结构件的研究与应用目前尚处于空白阶段。为此,本文在传统复合材料夹层结构制备与研究的基础上,设计并制备了适合真空导入成型工艺的点阵增强型(grooved perforation sandwich, GPS)复合材料夹层结构,对其剪切、平压与抗弯性能及破坏形态进行了实验研究,并应用经典夹层梁理论预估了其极限承载力,以促进其作为新型建筑材料在我国推广应用。

1 制备工艺

1.1 实验材料

乙烯基酯树脂:上纬(上海)精细化工有限公司生产的 901-P 低粘度乙烯基树脂,需要 1.2% (质量分数)的过氧化甲乙酮(MEKP)作为固化剂;增强材料:法国圣戈班集团常州技术材料有限公司生产的 800 g/m² 四轴向[0/45/90/-45]准正交玻璃纤维布;PVC 泡沫:瑞典 DIAB 公司生产的 H-60 PVC 泡沫,密度为 60 kg/m³。

1.2 真空导入工艺

本实验所采用的真空导入成型工艺基本原理参见图 1。在模具上依次铺放两层干的 800 g/m² 四轴向[0/45/90/-45]准正交玻璃纤维布,形成[0/45/90/-45/0/45/90/-45]铺层,然后在其上面放置上、下表面均开有正交布置的齿槽且沿厚度方向穿孔的 PVC 泡沫芯材,再在该泡沫芯材的上表面放置两层玻璃纤维布(见图 2),并依次铺上脱模布、导流布,最后用真空袋将其密封。在型腔抽真空的过程中,乙烯基酯树脂可在大气压作用下沿树脂管注入真空袋内,并沿导流布分布、流动而浸渍玻璃纤维束,当乙烯基酯树脂浸渍到 PVC 泡沫芯材时即可沿其表面分布的齿槽和圆孔流动到下表面的玻璃纤维布上。由于所采用的乙烯基酯树脂粘度较低,浸渍性较好,同时,该树脂可在室温下固化,因此,成型时无需加热加压处理。

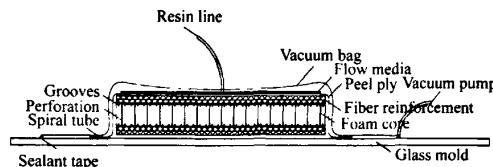


图 1 真空导入成型工艺
Fig. 1 Vacuum infusion molding process

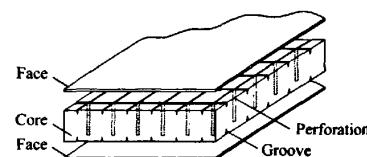


图 2 点阵增强型复合材料夹层结构
Fig. 2 Grooved perforation sandwich

本实验采用的模具为平板玻璃,成型时可观察 PVC 泡沫芯材上、下表面乙烯基酯树脂的流动情况。乙烯基酯树脂的具体流动过程为:15 s 后,乙烯基酯树脂浸渍 PVC 泡沫芯材下表面;60 s 后,乙烯基酯树脂基本完成 PVC 泡沫芯材上、下表面充模;150 s 后,PVC 泡沫芯材所有的边角无干点,整个充模过程完成。充模结束后,仍保持真空状态 40 min。6 h 后脱模。

实验发现,在 PVC 泡沫芯材上、下表面布置的齿槽为乙烯基酯树脂提供了快速流动通道,而沿其厚度方向穿过的圆孔则保证了乙烯基酯树脂在上、下两个表面的均匀流动,从而使整个充模过程

迅速、顺利，并且使试件在室温下短时间固化。填满齿槽的乙烯基酯树脂将玻璃纤维面板与 PVC 泡沫芯材铆在一起，圆孔内的乙烯基酯树脂则形成乙烯基酯树脂柱，可起到螺栓的作用，将上、下玻璃纤维面板与 PVC 泡沫芯材铆在一起，提高了玻璃纤维面板与 PVC 泡沫芯材的抗剥离能力。

2 力学性能实验

2.1 剪切、平压性能测试

点阵增强型复合材料夹层结构主要由乙烯基酯树脂、玻璃纤维面板和由点阵乙烯基酯树脂柱增强的 PVC 泡沫芯材组成。经测试，玻璃纤维面板的弹性模量为 8 730 MPa，拉伸强度为 223.7 MPa。增强前、后 PVC 泡沫芯材的剪切性能与平压性能实验结果见表 1。由表 1 可见，PVC 泡沫芯材采用点阵乙烯基酯树脂柱增强后，其剪切强度平均提高了 9.2%，剪切模量平均提高了 3.5%；平压强度平均提高了 74.4%，平压模量平均提高了 13.1%。

表 1 PVC 泡沫芯材剪切与平压性能实验结果

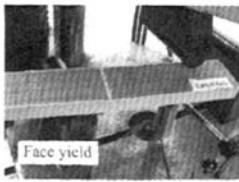
Table 1 Results of shear test and flat compressive test of foam core

Specimen	Shear strength/MPa		Shear modulus/MPa		Flat compressive strength/MPa		Flat compressive modulus / MPa	
	Test	Average	Test	Average	Test	Average	Test	Average
Unreinforced	0.76		20.0		0.90		70.0	
1	0.83		21.4		1.55		78.5	
GPS	2	0.83	20.9	20.7	1.50	1.57	82.3	79.2
	3	0.82	19.9		1.62		76.7	

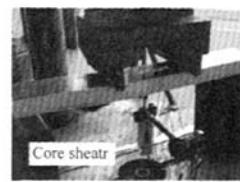
2.2 抗弯性能测试

根据文献[5]制备 3 个不同跨度的点阵增强型复合材料夹层结构三点弯曲试梁(three point flexural test, 简称 tf)，梁宽为 80 mm，跨度分别为 150, 300, 450 mm。跨度为 150 mm 的短试梁在变形较小的情况下即发生 PVC 泡沫芯材剪切破坏，而跨度为 300, 450 mm 的三点弯曲试梁呈现上玻璃纤维面板受压屈曲破坏(见图 3(a))，其三点弯曲荷载 P—跨中位移 f 曲线见图 4(a)。

为了研究点阵增强型复合材料夹层结构的抗弯刚度，本实验制备了 3 个四点弯曲试梁(four point flexural test, ff)，梁跨度为 450 mm，采用三分点加载形式。试梁典型破坏形态均为 PVC 泡沫芯材剪切破坏，并同时引起 PVC 泡沫芯材与玻璃纤维面板的剥离(见图 3(b))，其四点弯曲荷载一跨中位移曲线见图 4(b)。由图 4(b)可见，PVC 泡沫夹层结构的位移变化以弹性发展为主，但当荷载达到极限位移约 2/3 时，由于 PVC 泡沫芯材的剪切变形以塑性发展为主，其荷载一跨中位移曲线的斜率呈降低趋势，并在进入塑性阶段后，出现了一小段屈服平台；当达到极限荷载时，PVC 泡沫芯材发生剪切破坏，其荷载一跨中位移曲线开始下降。试梁破坏时的挠度约 20 mm，为跨度的 1/20~1/25。



(a) Failure modes of three point flexural test



(b) Failure modes of four point flexural test

图 3 试梁典型破坏形态

Fig. 3 Failure modes of sandwich



(a) Load-midspan deflection curves of three point flexural test

(b) Load-midspan deflection curves of four point flexural test

图 4 试梁荷载 跨中位移曲线

Fig. 4 Load-midspan deflection curves

表 2 为试梁四点弯曲实验结果, 其中: 抗弯刚度 D 由式(1)计算

$$D = a\Delta P(3l^2 - 4a^2)/48\Delta w \quad (1)$$

式中: a 为加载点至反力支座之间的距离, mm; l 为测量挠度的标距, 即试梁的跨距, mm; ΔP 为荷载增量, 位于比例极限以下, N; Δw 为在荷载增量 ΔP 作用下全跨度内所产生的挠度, mm.

表 2 试梁四点弯曲实验结果

Table 2 Results of four point flexural test

Specimen	Ultimate	Ultimate	Ultimate flexural moment		Flexural stiffness $\times 10^6$	
	loading /kN	deflection /mm	Test	Average	Test	Average
GPS	1	3.368	20.2	0.253	378.11	
	2	3.318	20.5	0.249	475.86	426.44
	3	3.365	21.1	0.252	425.35	

3 受弯理论与分析

3.1 抗弯刚度

由于 PVC 泡沫芯材的弹性模量相对于玻璃纤维面板小许多, 同时, 玻璃纤维面板厚度仅 1.5 mm, 相对于 PVC 泡沫芯材厚度 25 mm 薄许多, 因此, 本实验仅考虑上、下玻璃纤维面板绕夹层结构中性轴的抗弯刚度^[6], 其表达式为

$$D = E_f b t_f d^2 / 2 \quad (2)$$

式中: E_f 为玻璃纤维面板的弹性模量, 8 730 MPa; b 为试梁宽度, 80 mm; t_f 为玻璃纤维面板厚度, 1.5 mm; d 为夹层结构高度, 28 mm.

由式(2)可求得试梁的抗弯刚度理论值为 $410.66 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$, 与试验值 $426.44 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ 相差 3.7%, 基本吻合.

3.2 极限承载力

按经典夹层梁理论分析夹层结构截面的应力分布, 玻璃纤维面板中的最大正应力 σ_f 为

$$\sigma_f = M/b t_f d \quad (3)$$

式中: M 为弯矩, $\text{N} \cdot \text{mm}$.

PVC 泡沫芯材所受的剪应力 τ_c 为

$$\tau_c = Q/bd \quad (4)$$

式中: Q 为剪力, N.

对于实验中观察到的 2 种主要破坏模式, 有

(1) 当 $\sigma_f = M/b t_f d \geq \sigma_{yf}$ (σ_{yf} 表示玻璃纤维面板受压屈服临界强度), 玻璃纤维上面板易发生受压

屈曲破坏。如果是三点弯曲试梁，则其玻璃纤维面板临界屈曲荷载 P_{cr} 可表示为

$$P_{cr} = 4\sigma_{y1}bd t_f/l \quad (5)$$

(2) 当 $\tau_c = Q/bd \geq \tau_{yc}$ (τ_{yc} 表示 PVC 泡沫芯材受剪临界强度)，PVC 泡沫芯材易发生剪切破坏。如果是三点或四点弯曲试梁，则其 PVC 泡沫芯材临界剪切荷载 P'_{cr} 可表示为

$$P'_{cr} = 2\tau_{yc}bd \quad (6)$$

将试梁极限荷载实测值以及根据式(5),(6)求得的理论值列于表 3。由表 3 可见，跨度为 150, 300 mm 的三点弯曲试梁其极限荷载理论值与实测值存在一定差异，分别为 10.3%, 38.8%。通过分析可知，跨度较小的点阵增强型复合材料夹层梁加载受弯时，其玻璃纤维面板与 PVC 泡沫芯材易处于局部受压状态，从而导致其抗弯极限荷载尚未达到理论值时即告破坏。跨度较大(450 mm)的三点、四点弯曲试梁其极限荷载理论值与实测值均吻合较好，这表明利用经典夹层梁理论的简单方法预估点阵增强型复合材料夹层结构承载力具有较好的工程实用精度。

表 3 试梁极限荷载实测值与理论值对比

Table 3 Comparison between theoretical and tested ultimate flexural loading capacity

Test mode	Span/mm	Ultimate loading /kN			Failure mode
		Test	Theoretical	Difference/%	
Three point flexural test	150	3.372	3.718	10.3	Core shear
	300	2.272	3.154	38.8	Face yield
	450	1.993	1.971	1.1	Face yield
Four point flexural test	450	3.350	3.320	-0.9	Core shear

4 结论

1. 真空导入成型工艺充模速度快、成型效益高，适合制备大型/异型复合材料夹层结构构件。
2. PVC 泡沫芯材表面的齿槽以及沿厚度方向的圆孔为成型过程中乙烯基酯树脂充模提供了快速流动通道。
3. 点阵增强型复合材料夹层结构的剪切、平压性能均较增强前的 PVC 泡沫有了一定提高，点阵布置的乙烯基酯树脂柱对 PVC 泡沫芯材起到了增强作用。
4. 点阵增强型复合材料夹层结构的抗弯刚度主要由玻璃纤维面板的性能与夹层结构的厚度控制，其理论值与实测值吻合较好。
5. 点阵增强型复合材料夹层结构受弯时，容易发生玻璃纤维面板屈曲和 PVC 泡沫芯材剪切破坏，可利用经典夹层梁理论预估其极限抗弯荷载。

参考文献：

- [1] 李新华,祝颖丹,王继辉,等.沟槽型真空注射成型工艺的研究[J].复合材料学报,2003,20(4):111—116.
LI Xinhua,ZHU Yindan,WANG Jihui,et al. Study on vacuum infusion molding process based on grooves[J]. Journal of Composite Materials,2003,20(4):111—116. (in Chinese)
- [2] MOURITZ A P,GELLERT E,BURCHILL P,et al. Review of advanced composite structure for naval ships and submarines [J]. Composite Structures,2001,53(11):21—41.
- [3] BROWN L,SIMLER J. Navy experts explain the newest material & structural technologies[J]. Amptiac Quarterly, 2003,7 (3):21—25.
- [4] van ERP G M,CATTEL C,AYERS A. A fair dinkum approach to fibre composites in civil engineering[J]. Construction and Building Materials,2006,20(1):2—10.
- [5] GB/T 1456—88,夹层结构弯曲性能试验方法[S].
GB/T 1456—88, Test method for flexural properties of sandwich construction[S]. (in Chinese)
- [6] ALLEN H G. Analysis and design of structural sandwich panels[M]. London,Pergamon Press,1969.