

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.02.020

缝合泡沫夹层结构复合材料三点弯曲性能研究^{*}

赖家美¹, 鄢冬冬¹, 饶欣远¹, 王科¹, 黄志超²

(1. 南昌大学机电工程学院聚合物成型研究室, 南昌 330031; 2. 华东交通大学载运工具重点实验室, 南昌 330013)

摘要:采用改进锁式缝合方法,在真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺基础上制备了缝合泡沫夹层结构复合材料,对其进行了三点弯曲测试,并对缝合参数对其弯曲性能的影响进行了实验研究。实验结果表明,在弯曲载荷作用下,其结构的失效大部分是由于芯材的剪切破坏,在缝合密度较大和纤维层较多的情况下,弯曲性能优异。采用缝合泡沫夹层结构可以提高复合材料的弯曲性能。

关键词:缝合泡沫;夹层结构;三点弯曲;弯曲性能

中图分类号: TB 332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)02-0101-05

Study on Three-Point Bending Properties of Stitched Foam Sandwich Structure Composites

Lai Jiamei¹, Yan Dongdong¹, Rao Xinyuan¹, Wang Ke¹, Huang Zhichao²

(1. Polymer Processing Research Lab., College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Key Laboratory for Conveyance and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The stitched foam sandwich structure composites that were produced by using vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) technique with the improved lock stitching method, were used to carry out three-point bending test. The effects of stitching parameters on the flexural properties of the composites were studied. The experimental results reveal that the failure of its structure is mostly due to the core shear failure. The composite has the excellent flexural properties, with the stitching denser and more fibrous layer. Therefore, the stitched foam sandwich structure can improve the bending properties of the composites.

Keywords: stitched foam; sandwich structure; three-point bending; flexural property

缝合泡沫夹层结构复合材料是先进复合材料的一种表现形式,在夹层结构复合材料中,使用泡沫作为芯层来增加厚度,由于泡沫密度较低,故可在质量增加很少的前提下,大幅度提高复合材料的刚度^[1]。夹层结构复合材料的应用范围越来越广泛,但其横向力学性能较弱,特别是在上下面板跟芯材结合处的界面强度较低,在外加载荷的作用下很容易产生分层破坏^[2]。Li Bing等^[3]采用面板和夹层泡沫缝合成预成型件,再用成本很低的非热压罐成型工艺,制成一种全厚度缝合的复合材料闭孔泡沫夹层结构。通过这种方法,使得界面强度有了很大的提高,也保留了较高的弯曲刚度比^[4]。这些研究者的主要工作集中在复合材料整体弯曲性能的研究上,对缝合泡沫夹层结构复合材料的有关参数对复合材料弯曲性能的影响没有进一步研究。笔者讨论了缝合泡沫夹层结构复合材料的主要工艺参数对其弯曲力学性能的影响,以便为工程应用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

不饱和聚酯树脂: TH110-350R, 日本 U-PICA

株式会社;

固化剂: KP-100, 美国 SYRGIS 公司;

双向玻璃纤维布: LT600, 浙江成如旦新能源科技有限公司;

导流网: VI160, 上海沥高科技有限公司;

脱模布: PP-85WB, 厦门维曼材料科技有限公司;

真空袋膜: Vacfilm 400Y, 上海沥高科技有限公司;

缝线、底线: Kevlar29, 1 500 旦, 东莞生茂线带有限公司;

聚氨酯(PUR)泡沫: 厦门维曼材料科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

树脂收集器: SJQ-10 型, 厦门维曼材料科技有

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51263015, 51265012), 江西省自然科学基金资助项目(20122BAB206011)

联系人: 赖家美, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事聚合物基复合材料的研究与应用

收稿日期: 2015-11-25

限公司;

真空泵: X-25 型,德国 Busch 股份有限公司;

数控水刀: HSQ3020 型,南京合展精密技术有限公司;

电子万能试验机: Reger30kN 型,深圳市瑞格尔仪器有限公司。

1.3 实验方法

笔者在本实验中采用改进锁式缝合方法^[5]缝合泡沫夹层结构复合材料,如图 1 所示。采用真空辅助树脂传递模塑 (VARTM) 工艺制备复合材料,其示意图如图 2 所示。

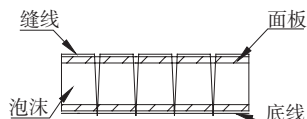


图1 改进锁式缝合方法缝合泡沫夹层结构复合材料示意图

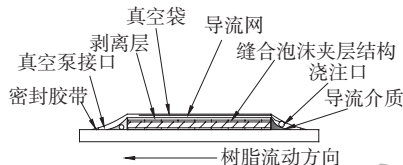


图2 VARTM 工艺示意图

面板材料为 LT600 双轴向玻璃纤维布,其纤维体积分数为 60%。缝线和底线均为 1500 旦的 Kevlar29,取缝线直径 $d=2\text{ mm}$ 。试件的长度为 200 mm,宽度为 60 mm,厚度因铺纤维层数不同而不同。实验组别及相应缝合参数如表 1 所示。

表 1 实验组别及相应缝合参数

组别	针距/mm	行距/mm	纤维层数
1	10	15	3
2	15	15	3
3	20	15	3
4	15	10	3
5	15	15	3
6	15	20	3
7	15	15	3
8	15	15	6
9	15	15	9

将双轴向玻璃纤维布和 PUR 泡沫芯层按顺序先铺层好,再用缝线缝合完后得到预制件。采用 VARTM 工艺,即先将缝合好的预制件放在钢化玻璃板上,再用真空袋密封好,确认无漏气后,打开真空泵抽真空,利用真空负压排出上下表面玻璃纤维布和缝线柱中的气体并完成不饱和聚酯树脂对纤维的浸渍,最终实现固化成型。

缝合后的泡沫夹层结构复合材料的几何形态将发生变化,缝线的引入会使缝线周围的纤维被挤

开,从而发生弯曲,使得各单层在缝线周围出现棱形空白区。当浸润树脂后就会形成富树脂区,从而对材料的力学性能产生一定影响^[6]。

1.4 性能测试

弯曲性能参照 GB/T 1446-2005 及 GB/T 1456-2005,在电子万能试验机上进行测试。采用三点弯曲试验,三点弯曲的最大弯矩在测试件中心压头下部位,下表面受拉,上表面受压^[7]。

2 结果与讨论

缝合泡沫夹层结构复合材料不是均一材料,其受力方式多样,载荷分布不均匀。在三点弯曲作用下复合材料的破坏模式有纤维张力破坏、内部剪切破坏、外表面张力破坏、内部剪切压力破坏及外表面压力破坏等^[8]。

2.1 缝合泡沫夹层结构复合材料的弯曲回弹现象

图 3 和图 4 分别为缝合泡沫夹层结构复合材料的弯曲变形实验和回弹现象。



图3 缝合泡沫夹层结构复合材料的弯曲变形实验

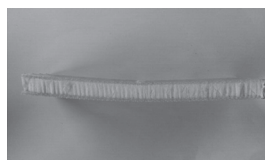


图4 缝合泡沫夹层结构复合材料的回弹现象

对比观察图 3 和图 4 可知,缝合泡沫夹层结构复合材料在受到弯曲载荷时有很大的变形,而在卸载后,试件出现相当明显的弯曲回弹现象,且这种回弹程度比金属大很多。试件在弯曲过程中,加载到一定程度后,上下面板会产生塑性变形,而夹层泡沫会产生弹性变形,并且复合材料在整个塑性变形过程中,弹性变形一直存在;当外加载荷卸除后,因为复合材料夹层结构的刚度较大,且夹芯层为泡沫,残余应力存在较少,所以回弹很明显。

泡沫的主要力学性能虽低,但它具有相对密度低、比弹性模量高、比强度高的优点。泡沫芯材在受到弯曲载荷作用时被压缩,应力集中的地方增多,产生的裂纹相应增多^[9]。缝合泡沫夹层结构复合材料上面板在受到弯曲载荷后,将力传递到泡沫夹芯层,泡沫被持续加载过程中,泡沫上层出现崩塌,而泡

沫中心层则才开始变形,出现弯曲。泡沫内外层呈现一种不均匀地吸收弯曲能量的模式。夹层结构中心层泡沫在受弯曲载荷后,体积明显发生了改变,产生一定的褶皱^[10]。泡沫被压缩后成腰鼓形,只要泡沫层不被压实,泡沫都是一种有效的缓冲材料;当卸载后,泡沫出现恢复现象,所以缝合泡沫夹层结构复合材料会出现如此明显的弯曲回弹。

2.2 缝合参数对缝合泡沫夹层结构复合材料弯曲性能的影响

测试不同缝合参数对缝合泡沫夹层结构复合材料弯曲强度和弯曲弹性模量的影响,结果如图5、图6所示。

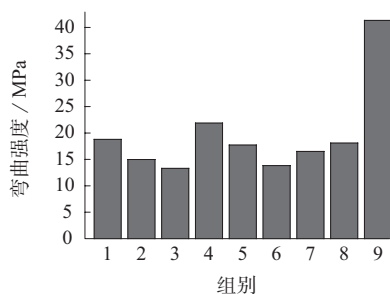


图5 缝合参数对缝合泡沫夹层结构复合材料弯曲强度的影响

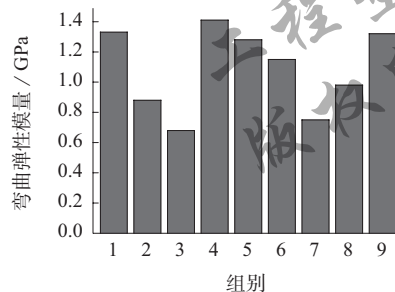


图6 缝合参数对缝合泡沫夹层结构复合材料弯曲弹性模量的影响

由图5和图6可看出,对于1~3组,保持行距为15 mm、纤维层数为3层不变,缝合泡沫夹层结构复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量随着针距的增加呈现逐渐减小的趋势,当针距为10 mm时,复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量出现最大值(第1组)。对于第4~6组,保持针距为15 mm、纤维层数为3层不变,随着行距的增加,复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量也呈逐渐减小的趋势,当行距为10 mm时,复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量出现最大值(第4组)。对比针距和行距对弯曲强度的影响,可以发现,二者对弯曲强度和弯曲弹性模量的影响基本一致,即在缝合密度大的情况下,复合材料的弯曲性能优异。对于第7~9组,保持针距和行距均为15 mm,随着纤维层数的增加,复合

材料的弯曲强度和弯曲弹性模量均呈逐渐增加的趋势,当纤维层数为9层时,复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量出现最大值(第9组)。

缝合泡沫夹层结构复合材料的弯曲性能取决于其破坏方式,不仅与纤维、缝线树脂柱、基体及界面的性能等有关,还与试件的跨高比以及弯曲断裂挠度等有密切关系。在缝合泡沫夹层结构复合材料中,缝线树脂柱是一个重要结构,其承载能力强,在泡沫结构未破坏的前提下,缝合密度越大,复合材料的弯曲性能越优异^[11]。在三点弯曲实验中,第1~6组是针对缝合密度而设定的参数,在针距、行距均较小的情况下,缝合密度越大,缝线树脂柱相应越多,故复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量大,即弯曲性能好;而对于第7~9组,在针距、行距一定时,由于纤维层数增加,复合材料上下表层的玻璃纤维层变厚,其承载能力变强,所以,层数越多,其弯曲性能越好。

2.3 缝合参数对缝合泡沫夹层结构复合材料弯曲挠度和弯曲能量的影响

缝合参数对缝合泡沫夹层结构复合材料弯曲挠度和弯曲能量的影响如图7、图8所示。

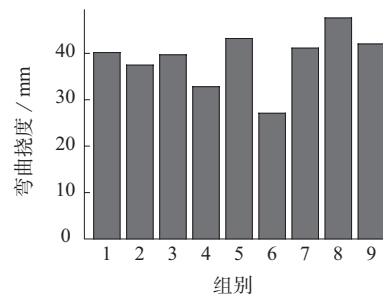


图7 缝合参数对缝合泡沫夹层结构复合材料弯曲挠度的影响

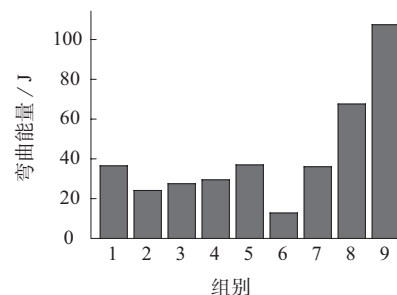


图8 缝合参数对缝合泡沫夹层结构复合材料弯曲能量的影响

观察图7和图8可知,对于第1~3组,保持行距为15 mm、纤维层数为3层不变,针距对缝合泡沫夹层结构复合材料弯曲挠度和弯曲能量的影响与对弯曲强度和弯曲弹性模量的影响不同,弯曲挠度和弯曲能量随着针距的增加出现一个波动情况,

二者的变化趋势一致,当针距为 10 mm 时弯曲挠度和弯曲能量出现最大值(第 1 组)。对于第 4~6 组,保持针距为 15 mm、纤维层数为 3 层不变,行距对复合材料弯曲挠度和弯曲能量影响情况跟针距对其的影响一样,同样出现一个波动情况,当行距为 15 mm 时弯曲挠度与弯曲能量出现最大值(第 5 组)。对于第 7~9 组,保持针距和行距均为 15 mm 不变,复合材料的弯曲挠度不是随着纤维层数的增加而增大,而是在纤维层数为 6 层时弯曲挠度出现最大值(第 8 组),而弯曲能量随着纤维层数的增加而增大,当纤维层数为 9 层时弯曲能量出现最大值(第 9 组)。

缝合泡沫夹层结构复合材料不是均一的结构,承载弯曲力的方式比较复杂,在加载过程中,缝合泡沫夹层结构复合材料弯曲挠度与弯曲能量的变化趋势基本是一致的。

2.4 缝合参数对缝合泡沫夹层结构复合材料最大弯曲正应力的影响

缝合参数对缝合泡沫夹层结构复合材料最大弯曲正应力的影响如图 9 所示。

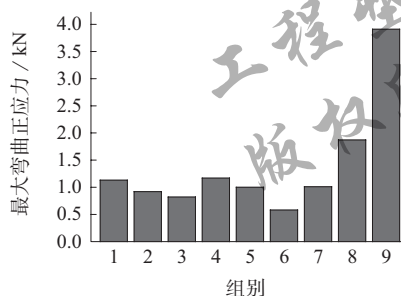


图9 缝合参数对缝合泡沫夹层结构复合材料最大弯曲正应力的影响

观察图 9 可知,对于第 1~3 组,保持行距为 15 mm、纤维层数为 3 层不变,随着针距的增加,缝合泡沫夹层结构复合材料的最大弯曲正应力呈递减趋势,当针距为 10 mm 时,复合材料的最大弯曲正应力出现最大值(第 1 组)。对于第 4~6 组,保持针距为 15 mm、纤维层数为 3 层不变,缝合泡沫夹层结构复合材料的最大弯曲正应力随着行距的增加而减小,当行距为 10 mm 时,复合材料的最大弯曲正应力出现最大值(第 4 组)。对于 7~9 组,保持针距和行距均为 15 mm 不变,缝合泡沫夹层结构复合材料的最大弯曲正应力随着纤维层数的增加而增大,当纤维层数为 9 层时,复合材料的最大弯曲正应力出现最大值(第 9 组)。

在缝合泡沫夹层结构复合材料受到弯曲载荷时,复合材料内部的弯曲正应力按刚度比分配,将主

要由增强纤维及缝线树脂柱承担。由于复合材料夹层结构的两块面板都能承受载荷且内部有很多缝线树脂柱,故复合材料在受力时的应力扩展方式会比较复杂且内部表征较难观测,但宏观表现较易观察,对比试样破坏情况与万能试验机上的可视化结果图可知,在弯曲加载过程中,破坏现象出现时,缝线树脂柱承担弯曲应力,然后将力传递到夹芯泡沫层,当整个夹层结构破坏时,出现最大弯曲力。

2.5 缝合泡沫夹层结构复合材料三点弯曲的载荷-位移曲线

在三点弯曲载荷作用下,试件的弯曲挠度不仅包括弯曲正应力引起的弯曲挠度,而且包括弯曲剪应力引起的弯曲挠度。同时,弯曲挠度会引起支座反作用力对试件横截面产生一个附加弯矩。缝合参数对缝合泡沫夹层结构复合材料三点弯曲的载荷-位移曲线的影响如图 10~图 12 所示。

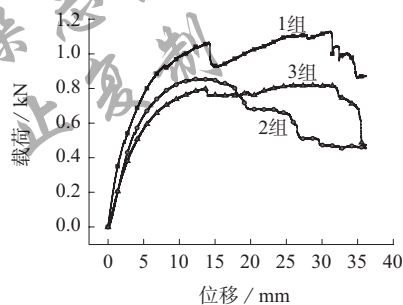


图10 针距对缝合泡沫夹层结构复合材料载荷-位移曲线的影响

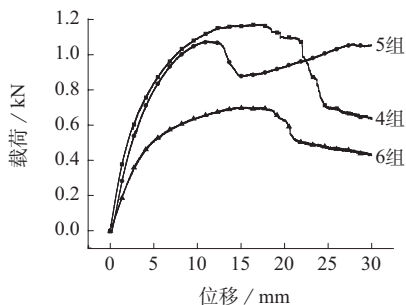


图11 行距对缝合泡沫夹层结构复合材料载荷-位移曲线的影响

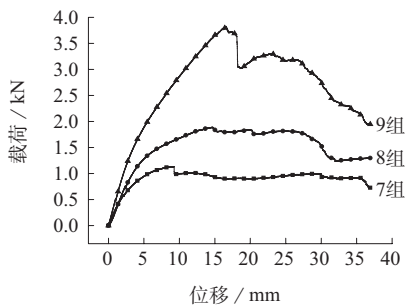


图12 纤维层数对缝合泡沫夹层结构复合材料载荷-位移曲线的影响
对比观察图 10、图 11 和图 12 可知,缝合泡沫

夹层结构复合材料试件在受到弯曲破坏时,无明显屈服点,复合材料的缝合密度越大或纤维层数越多,复合材料的承载能力越大。在加载后有极限载荷存在,抗弯曲能力较好。对于第1~3组针距的影响中,极限载荷分别为1.129,0.856,0.821 kN。对于第4~6组行距的影响中,极限载荷分别为:1.129,1.087,0.701 kN。对于第7~9组纤维层数的影响中,极限载荷分别为:1.132,1.888,3.824 kN。试件在加载的过程中,破坏现象大多一致,没有出现特殊的破坏现象^[12]。弯曲过程中,压头的作用使得缝线树脂柱发生形变,另外面板剪切力的作用也会进一步使其发生形变,使得缝线树脂柱与面板无法保持垂直状态,且随着载荷的增加而倾斜。

分析载荷-位移曲线可知,在曲线的起始阶段有一段呈近似线性的增加,此时面板在受力之后,形成一种上面板受压缩与下面板受拉伸的状态,随着载荷的增大,弯曲挠度相应增大,试件开始发生弯曲,此时缝线树脂柱逐渐被压弯。当位移达到15 mm左右时,弯曲载荷值达到最大,随后载荷值突然下降。实验过程中可以观察到,与压头较近的缝线树脂柱被破坏,这种破坏是从缝线树脂柱的最细部位开始的,之后缝线树脂柱被压断。同时泡沫也开始出现破坏趋势,泡沫中出现初始裂纹,载荷则迅速减小,但可继续承载,之后在较高载荷下出现新裂纹,发生第二次破坏,这种现象主要是芯材泡沫出现了剪切破坏的结果。之后即便载荷继续增加,再也不会达到之前的载荷峰值。

3 结论

(1) 缝合泡沫夹层结构复合材料剪切刚度较大,在受弯曲载荷后,由于泡沫的柔性及回弹系数较大,复合材料会出现很大程度的回弹。

(2) 缝合泡沫夹层结构复合材料的弯曲强度、最大弯曲正应力及弯曲弹性模量随着针距和行距的增加而减小,随着纤维层数的增加而增大;弯曲断裂挠度和断裂能量随着针距、行距及纤维层数的增加无规律性变化。

(3) 缝合泡沫夹层结构复合材料在加入缝线后,缝线树脂柱的承载能力好,弯曲性能随着缝线树脂柱密度的增加而增大,在缝合密度较大和纤维层数较多的情况下,缝合泡沫夹层结构复合材料的弯曲性能较好。

参考文献

[1] 史文华. 复合材料泡沫夹层板极限承载能力研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2011.

- Shi Wenhua. Study of the ultimate load of the composite sandwich plate[D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [2] 孙春方, 薛元德, 胡培. 复合材料泡沫夹层结构力学性能与试验方法 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2005(2):3-6.
- Sun Chunfang, Xue Yuande, Hu Pei. Mechanical properties and test method for foam core sandwich structure[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2005(2):3-6.
- [3] Li Bing, Li Zheng, Zhou Jie, et al. Damage localization in composite lattice truss core sandwich structures based on vibration characteristics[J]. Composite Structures, 2015, 126:34-51.
- [4] 刘华峰, 赵凯辉, 王佩艳, 等. 缝合复合材料泡沫夹层结构的平压和剪切性能研究 [J]. 中国机械工程, 2011(10):1 213-1 215.
- Liu Huafeng, Zhao Kaihui, Wang Peiyan, et al. Study on mechanical behavior of composites stitched foam sandwich panels under flatwise compression and shear[J]. China Mechanical Engineering, 2011(10):1 213-1 215.
- [5] 张发, 姜丽丽, 孙宝忠. 泡沫夹层结构复合材料机翼模型弯曲破坏形态有限元模拟 [J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2013(2):135-139, 145.
- Zhang Fa, Jiang Lili, Sun Baozhong. FEM simulation of failure modes under bending test for composite wing with foam sandwich structure[J]. Journal of Donghua University:Natural Science, 2013(2):135-139, 145.
- [6] 杜龙, 矫桂琼, 黄涛, 等. Z-pin 增强对泡沫夹层结构弯曲和振动性能的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2009(6):741-745.
- Du Long, Jiao Guiqiong, Huang Tao, et al. The influence of Z-pin reinforcement on the flexure and vibration properties of foam core sandwich[J]. Materials Science and Technology, 2009(6):741-745.
- [7] 尉坤. 含缺陷蜂窝夹层板的弯曲力学性能分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- Yu Kun. Analysis of bending mechanical properties of honeycomb sandwich structure with defects[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2012.
- [8] Tuwair H, Hopkins M, Volz J, et al. Evaluation of sandwich panels with various polyurethane foam-cores and ribs[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 79:262-276.
- [9] Lameiras R, Barros J, Azenha M, et al. Development of sandwich panels combining fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors.Part II:Evaluation of mechanical behaviour[J]. Compos Struct, 2013, 105:460-470.
- [10] 赵锐霞, 尹亮, 潘玲英, 等. PMI 泡沫夹层结构性能研究 [J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(5):34-37.
- Zhao Ruixia, Yin Liang, Pan Lingying, et al. Properties of PMI Foam Sandwich Structure[J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(5):34-37.
- [11] Wu Zhihua, Zeng Jingcheng, Xiao Jiayu. Flexural performance of integrated 3D composite sandwich structures[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2014, 33(16):1 496-1 507.
- [12] Chen A, Davalos J F. Development of facesheet for honeycomb FRP sandwich panels[J]. J Compos Mater, 2012, 46(26):3 277-3 295.